

**ESTUDIO COMPARATIVO DE CONTAMINACIÓN  
ATMOSFÉRICA POR LA OPERACIÓN DE UN S.I.T.M. EN  
BUCARAMANGA**

JUAN PABLO AMADO ORDUZ  
JUAN SEBASTIÁN GÓMEZ BERNATE

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA

2004

**ESTUDIO COMPARATIVO DE CONTAMINACIÓN  
ATMOSFÉRICA POR LA OPERACIÓN DE UN S.I.T.M. EN  
BUCARAMANGA**

JUAN PABLO AMADO ORDUZ  
JUAN SEBASTIÁN GÓMEZ BERNATE

Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero Civil

Director

VÍCTOR MANUEL CASTELLANOS  
Ingeniero de Vías y Transportes Msc.

Codirector

JUAN CARLOS CASTRO  
Ingeniero Químico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA

2004

## AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer muy especialmente por su colaboración en el desarrollo de este proyecto a:

**Víctor Manuel Castellanos**, Director de este proyecto, por su continua colaboración y su apoyo en los momentos cruciales de la investigación. Sus conocimientos en la materia de tráfico y transportes, fueron claves para la culminación de éste estudio.

**Juan Carlos Castro**, Director de este proyecto, por su incesante dedicación y orientación en todas las etapas del proyecto. Gracias a él, fue posible realizar ésta investigación.

**Manuel Ignacio Amaya**, asesor del proceso investigativo, por brindarnos sus experiencias y conocimientos. Fue él quien nos inició en el apasionante mundo de la calidad del aire.

**Eliseo Osorio**, Gerente del proyecto METROLÍNEA, por permitirnos tener acceso a todos los estudios del Sistema de Transporte Masivo y orientarnos con sus amplios conocimientos en el tema.

**James Lents**, director del Programa de Estudios de Política Ambiental de la Universidad de California, por su asesoría permanente en el tema de las emisiones vehiculares.

También queremos agradecer por su tiempo y colaboración a:

- Alain Claipper y Erika Zárate del EPFL(Suiza)
- Milciades Florez y Jorge Pérez de la Dirección de Tránsito de Bucaramanga
- Claudia Castellanos de la CDMB
- Orlando Santos de Calibraciones Técnicas S.A.
- Juan Amado de ESAO Ltda.
- Verónica Manzi y Luis Belalcazar de la UNIANDES
- Gustavo Ruiz y Mauricio Cardeñosa del ICP
- Jaime Espejo de Bureau Veritas.
- Germán Gavilán y Jairo Puentes, profesores de la UIS
- Ciudad Digital
- CAMPESA S.A.
- Direcciones de Tránsito del área metropolitana de Bucaramanga
- Área Metropolitana de Bucaramanga
- K - 2 Ingeniería Ltda.
- Secretaría de Infraestructura de Bucaramanga
- Fundación LES
- Escuela de Ingeniería Civil de la UIS
- Subdirección de Normatización y Calidad Ambiental de la CDMB
- Janneth Sanabria, Julián Velandia, Robert Pacheco, Sergio León, Adriana Margarita Gómez, Martín Bernate y Carlos Andrés Amado
- A todos aquellos que de una u otra forma hicieron posible la culminación del proyecto.

MUCHAS GRACIAS.

*A Dios,  
A nuestros padres y hermanos,  
A nuestras familias,  
A nuestras novias,  
A nuestros amigos,  
A nuestros profesores,  
A la Fundación LES,*

**JUAN PABLO Y JUAN SEBASTIÁN**

## ACRÓNIMOS Y NOMENCLATURAS

- Nomenclatura Química

CFC: Compuestos clorofluorcarbonados.

CO: Monóxido de Carbono

CO<sub>2</sub>: Dióxido de Carbono

HC: Hidrocarburos

NO<sub>2</sub>: Dióxido de Nitrógeno

NO<sub>x</sub>: Óxido de Nitrógeno de valencia x

O<sub>2</sub>: Oxígeno

O<sub>3</sub>: Ozono

PAN: Nitratos de Peroxiacilo.

PM<sub>10</sub>: Material particulado menor a 10 micras

PM<sub>2,5</sub>: Material particulado menor a 2,5 micras

SO<sub>2</sub>: Dióxido de azufre

SO<sub>x</sub>: Óxido de Azufre de valencia x

VOC: Compuestos orgánicos volátiles

- Términos en inglés

Background: Concentración de fondo

Driving Behavior: Comportamiento vehicular

Fleet File: Archivo de distribución de la flota vehicular

Idle emissions: Emisiones en reposo

Link: Línea de flujo vehicular

Location File: Archivo de datos de condiciones locales

Running emissions: Emisiones en movimiento

Soak time: Tiempo que transcurre apagado el motor de un vehículo

- Acrónimos

AC: Sistema de Aire acondicionado

AMB: Área Metropolitana de Bucaramanga

CDMB: Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga

CE - CERT: Centro de Investigación Ambiental de la Universidad de California en Riverside

DANE: Departamento Administrativo Nacional de Estadística

EEA: Agencia Ambiental Europea

EGR: [Exhaust Gas Recirculation] Sistema de recirculación de gases de escape

EPA: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos

EURO: Clasificación tecnológica vehicular europea

FE: Factor de emisión

FLS: Fuente lineal finita

FTP: [Federal Test Procedure] Procedimiento federal estándar para ciclos de conducción

GNC: Gas natural comprimido

HCM: [Highway Capacity Manual] Manual de Capacidad de Autopistas

HDV: [Heavy Duty Vehicles] Vehículos de trabajo pesado

I / M: Programa de inspección y mantenimiento

IBUCA: Índice de Calidad del Aire para Bucaramanga

IVE: [International Vehicle Emissions Model] Modelo internacional de emisiones vehiculares

KRV: Kilómetros recorridos por vehículo

LDV: [Light Duty Vehicles] Vehículos livianos

MPFI: Sistema de inyección de gasolina multipunto

OMS: Organización Mundial de la Salud

PCV: [Positive Crankcase Ventilation] Sistema de control de emisiones evaporativas

Ppm: Partes por millón

SIP: [State Implementation Plans] Planes de implementación estatales de los Estados Unidos

SITM: Sistema Integral de Transporte Masivo

SPFI: Sistema de inyección de gasolina monopunto

TBE: Tasas básicas de emisión

VOC: Compuestos orgánicos volátiles

VSP: [Vehicle Specific Power] Potencia específica del vehículo

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	33
1. INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA	34
1.1. LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE: UN PROBLEMA GLOBAL	34
1.2. EL PROBLEMA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LAS CIUDADES	38
1.3. LA CALIDAD DEL AIRE EN BUCARAMANGA	41
1.3.1. El problema del transporte en Bucaramanga	45
1.4. CONSECUENCIAS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	48
1.4.1. Los efectos en la salud humana	49
1.4.1.1. Monóxido de Carbono	51
1.4.1.2. Óxidos de Nitrógeno y contaminantes secundarios	52
1.4.1.3. Hidrocarburos	57
1.4.1.4. Óxidos de azufre	57
1.4.1.5. Material Particulado	59
1.5. LA LUCHA CONTRA LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	61
1.5.1. La gestión de los recursos atmosféricos	63
1.5.2. La aplicación de los mejores medios practicables	63
1.5.3. La combinación de ambos enfoques	64
2. ESTADO DEL ARTE EN SIMULACIÓN ATMOSFÉRICA	66
2.1. CONCEPTOS BÁSICOS DE LA TÉCNICA DE SIMULACIÓN	66
2.2. MÉTODOS PARA ESTIMAR LAS EMISIONES	67
2.2.1. Aplicación inversa de modelos de dispersión	68
2.2.2. Pruebas de dinamómetro de chasis y modelos de emisión	69
2.2.2.1 COPERT III	71
2.2.2.2. MOBILE	75
2.2.2.3 PART 5	81
2.2.2.4 IVE (INTERNATIONAL VEHICLE EMISSION MODEL)	82
2.2.2.5. CMEM (COMPREHENSIVE MODAL EMISSIONS MODEL)	86

2.3. ESTIMACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE CONTAMINANTES POR FUENTES MÓVILES EN UN ÁREA DETERMINADA	88
2.3.1. Modelos de dispersión Gaussiana para fuentes móviles	90
2.3.1.1. CALINE / CAL3QHC	90
2.3.1.2. ADMS Urban / ADMS Roads	94
2.3.1.3. Otros modelos Gaussianos	95
2.3.2. Modelos para cañones urbanos (Street Canyons)	97
2.3.2.1. Geometría de los Cañones de vía	98
2.3.2.2. El Viento	99
2.3.2.3 Dispersión de Contaminantes	100
2.3.2.4. Modelos para Cañones urbanos	101
2.4. SELECCIÓN DE LOS MODELOS	103
2.4.1. COPERT III + Modelo europeo de dispersión	104
2.4.2. MOBILE + Modelo de la EPA	105
2.4.3. IVE + Modelo de la EPA	106
2.4.4. Selección	106
3. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	107
3.1. ALCANCES DEL PROYECTO	107
3.2. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	109
3.2.1. Delimitación	109
3.2.2. Descripción del corredor vial de la Carrera 15	110
3.2.3. Intersecciones consideradas en la modelación	112
3.2.3.1. Intersección Carrera 15 con Avenida Quebrada Seca	112
3.2.3.2. Intersección Carrera 15 con Calle 36	113
3.2.3.3. Intersección Carrera 15 con Calle 45	115
3.2.3.4. Intersección Carrera 15 con Calle 50 y Carrera 17	116
3.3. METODOLOGÍA DEL PROYECTO	118
3.3.1. Datos primarios	120
3.3.2. Datos Secundarios	121

3.4. PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DEL SITM METROLÍNEA	122
4. EMISIONES VEHICULARES	126
4.1 PROCESO DE EMISIÓN EN LOS VEHÍCULOS	126
4.1.1 El motor de combustión interna	128
4.1.1.1. Primer tiempo: ADMISIÓN	128
4.1.1.2. Segundo tiempo: COMPRESIÓN	129
4.1.1.3. Tercer Tiempo: EXPANSIÓN	130
4.1.1.4. Cuarto tiempo: ESCAPE	130
4.1.2 Proceso de combustión	131
4.1.2.1 Proceso Químico	131
4.1.2.2 Proceso Físico	134
4.2 MODELO INTERNACIONAL DE EMISIONES VEHICULARES IVE	136
4.2.1 Aspectos básicos del modelo	137
4.2.1.1 Requerimientos técnicos	137
4.2.1.2. Descripción del Modelo	137
4.2.1.3. Proceso de Cálculo	138
4.2.2. Módulo de Cálculo	141
4.2.3. Módulo de Localidad (Location File)	144
4.2.3.1. Información general	146
4.2.3.2. Altitud	147
4.2.3.3. Programa de Inspección y Mantenimiento I/M	147
4.2.3.4. Uso del aire Acondicionado (AC)	148
4.2.3.5. Pendiente de la Vía (Road Grade)	148
4.2.3.6. Características del Combustible	149
4.2.3.7. Temperatura y Humedad Relativa	150
4.2.3.8. Menú desplegable para hora	151
4.2.3.9. Distancia / Tiempo	151
4.2.3.10. Número de Arrancadas	152
4.2.3.11. Etiquetas Standard y Multi-Stop	153
4.2.3.12. Campos para la entrada del comportamiento vehicular	153

4.2.3.13 Velocidad Promedio	161
4.2.3.14. Patrones de encendidos o arranques	167
4.2.3.15. Totales	167
4.2.3.16. Menú Archivo (FILE)	168
4.2.4. Módulo de Distribución de la Flota Vehicular (Fleet File)	168
4.2.4.1 Distribución del parque automotor	170
4.2.4.2. Tipo de Vehículo y Servicio	175
4.2.4.3. Tamaño del Motor	177
4.2.4.4. Tipo de combustible	178
4.2.4.5. Kilometraje Recorrido por vehículo KRV (edad)	182
4.2.4.6. Sistema de Alimentación de Combustible	189
4.2.4.7. Control de emisiones evaporativas (PCV)	190
4.2.4.8. Control de emisiones de escape	190
4.2.4.9 Asignación de las tecnologías identificadas a las flotas circulantes en las diferentes intersecciones	194
4.2.5. Módulo de ajuste de las Tasas Básicas de Emisión TBE	208
4.2.5.1. Proceso para la calibración del modelo	210
4.3. RESULTADOS OBTENIDOS	212
4.3.1 Emisiones de Vehículos en Movimiento	218
4.3.1.1 Emisiones de CO	218
4.3.1.2 Emisiones de PM10	235
4.3.2 Emisiones de Vehículos en Reposo	251
5. DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES	252
5.1. METEOROLOGÍA Y DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES	252
5.1.1. Radiación solar	253
5.1.2. Viento	255
5.1.3. Estabilidad atmosférica	256
5.2. MODELO DE DISPERSIÓN GAUSSIANO CAL3QHC	259
5.2.1. Cálculo de la longitud de cola	259
5.2.1.1. Condiciones no saturadas	262

5.2.1.2. Condiciones sobre-saturadas	264
5.2.2. Dispersión de los contaminantes	266
5.2.2.1. Formulación Gaussiana de los elementos	267
5.2.2.2. Modelo de zona de mezcla	270
5.2.2.3. Dispersión vertical ( $\sigma_z$ )	272
5.2.2.4. Dispersión horizontal ( $\sigma_y$ )	273
5.3. DATOS DE ENTRADA AL CAL3QHC	274
5.3.1. Variables meteorológicas	274
5.3.1.1. Velocidad de asentamiento y deposición	274
5.3.1.2. Velocidad y dirección del viento	276
5.3.1.3. Estabilidad atmosférica	278
5.3.1.4. Altura de Mezcla	280
5.3.1.5. Concentración de fondo (Background)	282
5.3.2. Variables espaciales	283
5.3.2.1. Coeficiente de rugosidad superficial	283
5.3.2.2. Características de las vías de flujo (Links).	285
5.3.2.3. Ancho de mezcla	286
5.3.2.4. Altura de la fuente de emisión	286
5.3.2.5. Ubicación de los receptores	286
5.3.3. Variables de tráfico	290
5.3.3.1. Ciclo y tipo de semáforo	290
5.3.3.2. Rata de arribo a cada intersección	291
5.3.3.3. Volúmenes vehiculares	292
5.3.3.4. Flujo de saturación por carril	293
5.3.4. Emisiones	294
5.3.4.1. Factor de emisión en movimiento (Running) [gr/veh-milla]	294
5.3.4.2. Factor de emisión en reposo (Idle) [gr/hora]	294
5.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	295
5.4.1. Consideraciones iniciales	296
5.4.2. Comparación con la Estación de Monitoreo Centro	299

5.4.2.1. Análisis de las concentraciones de Monóxido de Carbono (CO)	302
5.4.2.2. Análisis del Material Particulado menor a 10 micras (PM10)	302
5.4.3. Comparación entre la situación actual y la proyectada con el funcionamiento del SITM	305
5.4.3.1. Perfil de concentraciones en la vía	305
5.4.3.2. Variación horaria de concentraciones en diferentes intersecciones	306
5.4.3.3. Variación de concentraciones a diferentes distancias perpendiculares a la vía	306
5.4.3.4. Variación horaria de las concentraciones máximas en la zona de estudio	307
5.4.4. Análisis de las comparaciones entre la situación actual y el SITM	315
5.4.4.1. Perfiles de concentración	315
5.4.4.2. Análisis de las intersecciones	319
5.4.4.3. Distancia perpendicular de los receptores	322
5.4.4.4. Niveles máximos de concentración	323
5.4.5. Comparación porcentual entre la situación actual y el SITM	325
CONCLUSIONES	328
RECOMENDACIONES	331
BIBLIOGRAFÍA	334
ANEXOS	341

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1: Imagen satelital del hueco en la capa de ozono sobre la Antártica	35
Figura 1-2: Las congestiones vehiculares son una situación común en todos los países en desarrollo	40
Figura 1-3: Panorámica de la ciudad de Bucaramanga	42
Figura 1-4: Concentración de contaminantes registrados en la Estación Zona Centro	44
Figura 1-5: Los Angeles en un día típico de verano (izquierda) y en invierno (derecha)	55
Figura 2-1: Ubicación de los receptores en un estudio de dispersión para un túnel urbano.	68
Figura 2-2: Prueba de chasis dinamométrico en Estados Unidos (FTP)	70
Figura 2-3: Interfaz gráfica del modelo COPERT III	72
Figura 2-4: Validación del modelo MOBILE6 usando túneles de autopistas	79
Figura 2-5: Mapa conceptual del funcionamiento del modelo IVE	83
Figura 2-6: Vehículo de tres ruedas que es posible de modelar con el IVE	85
Figura 2-7: Estudio a mesoescala de la contaminación en Bogotá y sus alrededores.	90
Figura 2-8: Representación gráfica de la dispersión en la zona de mezcla del modelo CALINE4	91
Figura 2-9: Integración del modelo ADMS – Roads con un SIG	95
Figura 2-10: Ejemplo de un cañón urbano en Bogotá (Colombia)	98
Figura 2-11: Clasificación Geométrica de un Street Canyon	99
Figura 3-1: Secuencia S-N Intersecciones Modeladas	111

Figura 3-2: Intersección de la Carrera 15 con la Avenida Quebrada Seca	112
Figura 3-3: Intersección de la Carrera 15 con la Calle 36	113
Figura 3-4: Intersección de la Carrera 15 con la Calle 45	115
Figura 3-5: Intersección de la Carrera 15 con la Calle 50 y la Carrera 17	116
Figura 3-6: Intersección de la Carrera 15 con la Calle 56	117
Figura 3-7: Diagrama de flujo descriptivo de la metodología utilizada en el proyecto	118
Figura 3-8: Descripción de las rutas troncales y alimentadoras	124
Figura 4-1 Puntos de Emisión de Gases	127
Figura 4-2: Motor de Combustión Interna	128
Figura 4-3 Primer tiempo: Admisión	128
Figura 4-4 Segundo Tiempo: Compresión	129
Figura 4-5: Tercer Tiempo: Expansión (Explosión)	130
Figura 4-6: Cuarto Tiempo: Escape	130
Figura 4-7: Efectos de la Relación Aire – Combustible sobre la emisiones vehiculares	133
Figura 4-8: Etapas en el Proceso Físico de la Combustión	134
Figura 4-9: Estructura Interna del Modelo	137
Figura 4-10: Ventana del Módulo de Cálculo	141
Figura 4-11: Archivo de Salida, de Santiago de Chile en formato TXT	143
Figura 4-12: Ventana del Módulo de Localidades	145
Figura 4-13 Variación en la emisión de CO, para diferentes condiciones de operación de los motores	154
Figura 4-14: Módulo de CGPS usado en la determinación del VSP	156
Figura 4-15: Variación de la Velocidad de los Autos en la Cra 15 entre Calle 45 y Calle 50 Sentido N-S	163
Figura 4-16: Variación de la Velocidad de los Buses en la Cra 15 entre Calle 45 y Calle 50 Sentido N-S	163

Figura 4-17: Variación de la Velocidad bajo las condiciones Actuales en la Cra 15 entre Calle 45 y Calle 50, Sentido N-S	165
Figura 4-18: Variación de la Velocidad bajo las condiciones futuras (SITM) en la Cra 15 entre Calle 45 y Calle 50, Sentido N-S	166
Figura 4-19: Dispositivo VOCE usado en la determinación de la distribución de los tiempos que demoran los vehículos apagados	168
Figura 4-20: Ventana del Módulo de Distribución de la Flota Vehicular	169
Figura 4-21: Distribución de Autos Particulares por Modelo en el Área Metropolitana de Bucaramanga	172
Figura 4-22: Distribución de Taxis por Modelo en el Área Metropolitana de Bucaramanga	172
Figura 4-23: Distribución de Camiones por Modelo en el Área Metropolitana de Bucaramanga	173
Figura 4-24: Distribución de Buses por Modelo en el Área Metropolitana de Bucaramanga	173
Figura 4-25: Edad de la Flota de Transporte Público Colectivo	175
Figura 4-26: Composición Flota Vehicular en el Área Metropolitana de Bucaramanga	176
Figura 4-27: Combustible usados por la Flota de Taxis, en el Área Metropolitana de Bucaramanga	178
Figura 4-28: Composición por tipo, de los vehículos convertidos a Gas Natural	180
Figura 4-29: Vehículo modelo para el SITM METROLÍNEA	188
Figura 4-30: Variación del volumen horario, para la Carrera 15 con Calle 56 Sentido S-N	197
Figura 4-31: Curva Oferta Demanda Estación Centro Sentido S-N	200
Figura 4-32: Curva Oferta Demanda Estación Centro Sentido N-S	201
Figura 4-33: Variación Horaria de la demanda de transporte En sentido N-S, para las condiciones de operación del SITM	205

Figura 4-34: Variación Horaria de la demanda de transporte En sentido S-N, para las condiciones de operación del SITM	206
Figura 4-35: Ventana del Módulo de Ajuste de las tasas básicas de emisión TBE	208
Figura 4-36: Pruebas dinamométricas para determinar las TBE	209
Figura 4-37: Ciclos de Conducción del FTP	210
Figura 4-38: Archivo de Salida, de la Calle 36 sentido E-W, en formato TXT	213
Figura 4-39: Comparación de las Tasas de Emisión Promedio de CO, para Vehículos en movimiento en vías arterias	215
Figura 4-40: Comparación de las Tasas de Emisión Promedio de CO, para Vehículos en Reposo (IDLE)	216
Figura 4-41: Comparación de las Tasas de Emisión Promedio de PM, para Vehículos en movimiento en vías arterias	217
Figura 4-42: Comparación de las Tasas de Emisión Promedio de PM, para Vehículos en Reposo (IDLE)	217
Figura 4-43: Emisiones Totales Horaria de CO (gr.), para las diferentes alternativas modeladas	219
Figura 4-44: Aporte por clase vehicular a la contaminación por CO, Condiciones Actuales	220
Figura 4-45: Aporte por clase vehicular a la contaminación por CO, SITM GAS	220
Figura 4-46: Aporte por clase vehicular a la contaminación por CO, SITM DIESEL	221
Figura 4-47: Emisión Horaria de CO, para Vehículos en movimiento en el sentido E-W de las intersecciones seleccionadas.	222
Figura 4-48 Emisión Horaria de CO, para Vehículos en movimiento en el sentido W-E de las intersecciones seleccionadas.	222
Figura 4-49: Aporte por intersección, en los Sentidos E-W y W-E a la contaminación por CO, debida a los vehículos en movimiento	223

Figura 4-50: Emisiones horarias actuales de CO, por clase vehicular, en la Cra 17 con Calle 50 Sentido S-N	224
Figura 4-51: Variación del volumen horario, para la Carrera 17 con Calle 50 Sentido S-N	224
Figura 4-52: Emisiones de CO por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Avenida Quebrada Seca, sentido N-S, para las diferentes alternativas planteadas	225
Figura 4-53: Emisiones de CO por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Calle 36, Sentido N-S, para las diferentes alternativas planteadas	226
Figura 4-54: Emisiones de CO por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Calle 45, Sentido N-S, para las diferentes alternativas planteadas	226
Figura 4-55: Emisiones de CO por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Calle 50, Sentido N-S, para las diferentes alternativas planteadas	227
Figura 4-56: Emisiones de CO por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Calle 56, Sentido N-S, para las diferentes alternativas planteadas	227
Figura 4-57: Emisiones horarias actuales de CO, por clase vehicular, en la Cra 15 con Calle 50, Sentido N-S	229
Figura 4-58: Variación del volumen horario, para la Carrera 15 con Calle 50 Sentido N-S	229
Figura 4-59: Emisiones de CO por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Avenida Quebrada Seca, sentido S-N, para las diferentes alternativas planteadas	230
Figura 4-60: Emisiones de CO por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Calle 36, Sentido S-N, para las diferentes alternativas planteadas	230

Figura 4-61: Emisiones de CO por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Calle 45, Sentido S-N, para las diferentes alternativas planteadas	231
Figura 4-62: Emisiones de CO por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Calle 50, Sentido S-N, para las diferentes alternativas planteadas	231
Figura 4-63: Emisiones de CO por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Calle 56, Sentido S-N, para las diferentes alternativas planteadas	232
Figura 4-64: Emisiones horarias actuales de CO, por clase vehicular, en la Cra 15 con Calle 56, Sentido S-N	233
Figura 4-65: Variación del volumen horario, para la Carrera 15 con Calle 56, Sentido S-N	234
Figura 4-66: Emisiones Totales Horaria de PM (gr), para las diferentes alternativas modeladas	235
Figura 4-67: Aporte por clase vehicular a la contaminación por PM, Condiciones Actuales	236
Figura 4-68: Aporte por clase vehicular a la contaminación por PM, SITM GAS	237
Figura 4-69: Aporte por clase vehicular a la contaminación por PM, SITM DIESEL	237
Figura 4-70: Emisión Horaria de PM, para Vehículos en movimiento en el sentido E-W de las intersecciones seleccionadas.	238
Figura 4-71: Emisión Horaria de PM, para Vehículos en movimiento en el sentido W-E de las intersecciones seleccionadas.	239
Figura 4-72: Aporte por intersección, en los Sentidos E-W y W-E a la contaminación por PM, debida a los vehículos en movimiento	239
Figura 4-73: Aporte a la contaminación por PM, por clase vehicular, para la Carrera 17 con calle 50, Sentido S-N	240

Figura 4-74: Emisiones horarias actuales de PM, por clase vehicular, en la Cra 17 con Calle 50, Sentido S-N	241
Figura 4-75: Emisiones de PM por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Avenida Quebrada Seca, sentido N-S, para las diferentes alternativas planteadas	242
Figura 4-76: Emisiones de PM por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Calle 36 Sentido N-S, para las diferentes alternativas planteadas	242
Figura 4-77: Emisiones de PM por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Calle 45 Sentido N-S, para las diferentes alternativas planteadas	243
Figura 4-78: Emisiones de PM por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Calle 50 Sentido N-S, para las diferentes alternativas planteadas	243
Figura 4-79: Emisiones de PM por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Calle 56 Sentido N-S, para las diferentes alternativas planteadas	244
Figura 4-80: Aporte a la contaminación por PM, por clase vehicular, para la Carrera 15 con calle 50, Sentido N –S	245
Figura 4-81: Emisiones horarias actuales de PM, por clase vehicular, en la Cra 15 con Calle 50, Sentido N-S	246
Figura 4-82: Emisiones de PM por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Avenida Quebrada Seca, sentido S-N, para las diferentes alternativas planteadas	247
Figura 4-83: Emisiones de PM por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Calle 36, Sentido S-N, para las diferentes alternativas planteadas	247
Figura 4-84: Emisiones de PM por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Calle 45, Sentido S-N, para las diferentes alternativas planteadas	248

Figura 4-85: Emisiones de PM por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Calle 50, Sentido S-N, para las diferentes alternativas planteadas	248
Figura 4-86: Emisiones de PM por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Calle 56, Sentido S-N, para las diferentes alternativas planteadas	249
Figura 4-87: Emisiones horarias actuales de PM, por clase vehicular, en la Cra 15 con Avenida Quebrada Seca, Sentido S-N	250
Figura 4-88: Variación del volumen horario, para la Carrera 15 con Calle 56, Sentido S-N	251
Figura 5-1: Las capas de la atmósfera y su espesor promedio	252
Figura 5-2: Fenómeno de isla de calor.	254
Figura 5-3: La desviación de los vientos de gran escala en los hemisferios norte y sur	256
Figura 5-4: La altura de mezcla es el punto donde la temperatura de la parcela de aire es igual a la temperatura ambiental.	257
Figura 5-5: Relación de colas y demoras para una intersección señalizada en condiciones cercanas a la saturación.	261
Figura 5-6: Relación de colas y demoras para una intersección sobresaturada.	265
Figura 5-7: Series de elementos que utiliza el modelo CALINE	268
Figura 5-8: Distribución Gaussiana de una FLS (Finite Lineal Source)	269
Figura 5-9: Diagrama de cálculo de la velocidad de asentamiento en función del diámetro.	276
Figura 5-10: Nomograma de Pasquill	279
Figura 5-11: Ubicación de los links y receptores establecidos para la modelación (Calle 56 a Calle 45)	288
Figura 5-12: Ubicación de los links y receptores establecidos para la modelación (Calle 45 a Quebrada Seca)	289

Figura 5-13: Ubicación esquemática de la Estación de Monitoreo y la Estación Meteorológica	296
Figura 5-14: Ubicación en planta de la estación de monitoreo y la estación meteorológica	297
Figura 5-15: Comparación gráfica entre las concentraciones de la Estación Centro y los resultados del modelo (Receptor TELEB)	301
Figura 5-16: Perfil de concentraciones de CO en las diferentes zonas adyacentes a la Carrera 15	308
Figura 5-17: Perfil de concentraciones de PM10 en las diferentes zonas adyacentes a la Carrera 15	309
Figura 5-18: Variación horaria de las concentraciones para las diferentes intersecciones (Parte I)	310
Figura 5-19: Variación horaria de las concentraciones para las diferentes intersecciones (Parte II)	311
Figura 5-20: Variación horaria de las concentraciones para las diferentes intersecciones (Parte III)	312
Figura 5-21: Variación de la concentración de contaminantes con la distancia perpendicular a la vía	313
Figura 5-22: Valores máximos horarios de concentración en toda la zona de estudio	314

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1-1: Los gases del efecto invernadero	37
Tabla 1-2: Población estimada en el Área Metropolitana de Bucaramanga.	41
Tabla 1-3: Indicador de la contaminación del aire (Índice IBUCA)	44
Tabla 1-4: Datos de oferta y demanda en las principales vías de la ciudad.	47
Tabla 1-5: Efectos agudos esperados por contaminación fotoquímica	56
Tabla 1-6: Niveles promedios de 24 horas de mezclas de contaminación atmosférica conteniendo SO <sub>2</sub> y partículas en suspensión por encima de los cuales se pueden esperar efectos agudos sobre la salud humana	58
Tabla 1-7: Estimación de los efectos asociados a los niveles medios diarios de contaminación atmosférica por partículas en suspensión.	60
Tabla 2-1: Tipos de emisión en vehículos automotores considerados por el Mobile6	76
Tabla 2-2: Lista de variables que intervienen en el CMEM y deben ser proveídas por el usuario.	87
Tabla 2-3: Comparación básica de modelos gaussianos europeos para fuentes móviles	96
Tabla 2-4: Clasificación Geométrica de los Cañones de Vía	99
Tabla 3-1: Coordenadas de los puntos extremos de la zona de estudio.	109
Tabla 4-1: Factores de ajuste empleados por el modelo	139
Tabla 4-2 Variables de los ajustes por conducción	140
Tabla 4-3 Valores promedio de temperatura y humedad relativa usados en la modelación	150
Tabla 4-4: Aforo Vehicular Calle 36 Sentido E-W	152

Tabla 4-5: Distribución del comportamiento conducción, para una vía arteria en Santiago de Chile	158
Tabla 4-6: Distribución del comportamiento de conducción, para una vía arteria en Santiago de Chile, en condiciones de congestión vehicular	158
Tabla 4-7: Asignación en función de la velocidad, del comportamiento de conducción, para la Calle 36 sentido E-W en el periodo entre la 6 AM y la 6 PM.	159
Tabla 4-8: Distribución del comportamiento de conducción, para la condiciones de operación de los vehículos en reposo.	160
Tabla 4-9: Distribución de las Flotas analizadas en la estimación de la velocidad	162
Tabla 4-10: Ponderación de la Velocidad para las condiciones Actuales en Carrera 15 entre Calle 45 Y Calle 50, Sentido N-S	165
Tabla 4-11 Ponderación de la Velocidad para las condiciones futuras (SITM) en Cra 15 entre Calle 45 Y Calle 50, Sentido N-S	166
Tabla 4.12 Composición del parque automotor circulante en el Área Metropolitana de Bucaramanga hasta Julio de 2003	171
Tabla 4-13: Clases Vehiculares incluidas en la investigación	175
Tabla 4-14 Tamaños del motor incluidos en el modelo	177
Tabla 4-15: Ventajas y Desventajas de los combustibles	182
Tabla 4-16: Determinación del tamaño de la muestra para la obtención de la actividad vehicular	184
Tabla 4-17: Promedios de Actividad Vehicular para autos y Taxis	186
Tabla 4-18: Clasificación por edad, de los tipos vehiculares seleccionados	188
Tabla 4-19: Reducción en porcentaje de las emisiones en motores diesel	191
Tabla 4-20: Tecnologías Identificadas en el Área Metropolitana para los autos Particulares	192

Tabla 4-21: Tecnologías Identificadas en el Área Metropolitana para los Taxis, Buses, Busetas, Camiones y METROLÍNEA	193
Tabla 4-22: Características Tecnológicas de los vehículos propuestos para el SITM	193
Tabla 4-23: Volúmenes horarios de Autos, Buses y Camiones en la Calle 45 Sentido W-E	194
Tabla 4-24: Proporción de buses y busetas en los eventos pico y no pico	195
Tabla 4-25: Proporción de Autos particulares y taxis, en los eventos pico y no pico	196
Tabla 4-26: Cálculo de la composición promedio diaria de la flota circulante por la Carrera 15 con Calle 56, sentido S-N	198
Tabla 4-27: Resumen de la composición promedio diaria, de la flota circulante por las diferentes intersecciones	199
Tabla 4-28: Índice de Ocupación Horario, Sentidos N-S y S-N, Estación Centro	202
Tabla 4-29: Capacidad de los buses, busetas y micros.	203
Tabla 4-30: Resumen demanda y flota requerida para el SITM, sentido Norte Sur.	204
Tabla 4-31: Resumen demanda y flota requerida para el SITM, sentido Sur Norte.	206
Tabla 4-32: Resumen de la composición promedio diaria, para la flota circulante por la carrera 15, bajos las condiciones de operación del SITM	207
Tabla 4-33: Composición de los Archivos de entrada	212
Tabla 4-34: Composición de las corridas del Modelo	213
Tabla 4-35: Emisiones y Factores de emisión horarios para la Calle 36 sentido E-W	215
Tabla 4-36: Emisiones Totales de CO (gr), por tipo de vehículo para las alternativas modeladas	219

Tabla 4-37: Emisiones horarias actuales de CO (gr.), por clase vehicular, en la Calle 50 con Cra 17 Sentido S-N	223
Tabla 4-38: Emisiones horarias actuales de CO (gr.), por clase vehicular, en la Carrera 15 con Calle 50 Sentido N-S	228
Tabla 4-39: Emisiones horarias actuales de CO (gr.), por clase vehicular, en la Carrera 15 con Calle 56 Sentido S-N	233
Tabla 4-40: Emisiones Totales de PM (gr.), por tipo de vehículo para las alternativas modeladas	236
Tabla 4-41: Emisiones horarias actuales de PM (gr), por clase vehicular, en la Carrera 17 con Calle 50 Sentido S-N	240
Tabla 4-42: Emisiones horarias actuales de PM (gr.), por clase vehicular, en la Carrera 15 con Calle 50 Sentido N-S	246
Tabla 4-43: Emisiones horarias actuales de PM (gr.), por clase vehicular, en la Carrera 15 con Avenida Quebrada Seca Sentido S-N	250
Tabla 5-1: Distribución de las partículas por conteo y por ciento en volumen en una muestra atmosférica típica, como una función del tamaño.	275
Tabla 5-2: Condiciones atmosféricas promedios horarias para los meses de Abril a Junio utilizadas en el modelo.	280
Tabla 5-3: Coeficientes de rugosidad superficial para diferentes usos del suelo	284
Tabla 5-4: Tipos de semáforos que considera el CAL3QHC	290
Tabla 5-5: Clasificación de la rata de llegada a la intersección	291
Tabla 5-6: Archivos de entrada para las modelaciones de dispersión	295
Tabla 5 -7: Velocidades y rangos de dirección del viento modificado	299
Tabla 5-8: Descripción de zonas utilizadas en el perfil de concentraciones	305
Tabla 5-9: Reducción del CO por el funcionamiento del SITM en las diferentes intersecciones	321

Tabla 5-10: Reducción del PM10 por el funcionamiento del SITM en las diferentes intersecciones	322
Tabla 5-11: Reducción de los niveles máximos de CO por el funcionamiento del SITM	324
Tabla 5-12: Reducción de los niveles máximos de PM10 por el funcionamiento del SITM	325
Tabla 5-13: Reducción de los niveles máximos y promedios de CO para toda la zona	326
Tabla 5-14: Reducción de los niveles máximos y promedios de PM10 para toda la zona	327
Tabla 5-15: Reducción de los niveles máximos y promedios de CO para todas las horas	327
Tabla 5-16: Reducción de los niveles máximos y promedios de PM10 para todas las horas	327

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A: METODOLOGÍA PROPUESTA	342
ANEXO B: RESUMEN ESTUDIOS DE VELOCIDAD	343
ANEXO C: FACTORES DE EMISIÓN	345
ANEXO D: EMISIONES TOTALES HORARIAS	349
ANEXO E: EMISIONES TOTALES POR INTERSECCIÓN Y TIPO DE VEHÍCULO	355
ANEXO F: CONCENTRACIONES HORARIAS POR RECEPTOR	359
ANEXO G: CURVAS ISOPLETAS	368

## RESUMEN

### TITULO

ESTUDIO COMPARATIVO DE CONTAMINACIÓN ATMOSFERICA POR LA OPERACIÓN DE UN S.I.T.M. EN BUCARAMANGA \*

### AUTORES

JUAN PABLO AMADO ORDUZ \*\*

JUAN SEBASTIÁN GÓMEZ BERNATE\*\*

### PALABRAS CLAVES

Sistema Integrado de Transporte Masivo

Contaminación Atmosférica

Calidad del Aire

Modelamiento

Fuentes Móviles

Contaminantes No Reactivos

Emisión

Dispersión

### DESCRIPCIÓN O CONTENIDO

En este estudio se busca evaluar la reducción en las concentraciones de monóxido de carbono (CO) y material particulado menor a 10 micras (PM10), por la operación de un sistema integrado de transporte masivo (SITM) en Bucaramanga, para el tramo de la Carrera 15 entre la Avenida Quebrada Seca y la Calle 56. También se busca establecer una metodología aplicable a ciudades intermedias, para estudios similares.

Sus dos componentes claves, son las emisiones vehiculares y la dispersión de éstas en la zona, los cuales se estiman mediante la implementación de modelos. Para la etapa de emisión, las principales variables a determinar son los volúmenes vehiculares, la composición tecnológica de la flota y su velocidad, para este fin, se recopiló información existente y se realizaron mediciones in situ. Por su parte, la etapa de dispersión se alimenta con las emisiones obtenidas, la geometría de la zona y las condiciones meteorológicas.

Los resultados obtenidos indican que con la implementación del SITM, se disminuyen las concentraciones de CO aproximadamente en un 10%, mientras que las concentraciones de PM10 se reducen en un 80%, esto se debe a la disminución en los volúmenes de buses y a sus mejores características tecnológicas. La metodología utilizada puede ser extendida a investigaciones a mayor escala y con mayor profundidad.

Hoy en día son muy valiosos los esfuerzos encaminados al control de la contaminación del aire, debido a los nocivos efectos de esta sobre la salud humana, la vegetación y las obras civiles. Por esta razón se han desarrollado herramientas de modelación, como las usadas en este estudio, que permiten evaluar la conveniencia de las diferentes medidas de control de transporte.

---

\* Trabajo de Grado presentado para optar al título de Ingeniero Civil.

\*\* Facultad de Ingenierías Físicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Directores: Víctor Manuel Castellanos y Juan Carlos Castro.

## ABSTRACT

### TITLE

COMPARATIVE STUDY OF ATMOSPHERIC CONTAMINATION FOR THE OPERATION OF A MASSIVE TRANSPORT SYSTEM IN BUCARAMANGA

### AUTHORS

JUAN PABLO AMADO ORDUZ \*\*

JUAN SEBASTIAN GOMEZ BERNATE \*\*

### KEY WORDS

Massive Transport System

Air Pollution

Air Quality

Modeling

Mobile sources

Pollutants Non Reagents

Emission

Dispersion

### DESCRIPTION OR CONTENT

This study is guided to evaluate the reduction in the concentrations of monoxide of carbon (CO) and particulate matter less than 10 microns (PM10), for the operation of a massive transport system in Bucaramanga, for the tract of the Carrera 15 between the Avenue Quebrada Seca and the Calle 56. Also, it establishes an applicable methodology to intermediate cities, for similar studies.

Their two key components are the vehicular emissions and the dispersion of these in the area, which are considered by means of the implementation of models. For the first one, the main variables to determine are the vehicular volumes, the technological composition of the fleet and the speed of this, for these, existent information was gathered and they were carried out mensurations in situ. On the other hand, the dispersion stage feeds with the obtained emissions, the geometry of the area and the meteorological conditions.

The obtained results indicate that with the implementation of the massive transport system, it diminishes the concentrations of CO approximately in 10%, while the concentrations of PM10 decrease in 80%; this is due to the decrease in the volumes of buses and to their best technological characteristics. The used methodology can be extended to investigations to more scale and with more depth.

Today, the efforts guided to the control of the contamination of the air are very valuable, due to the noxious effects of this over the human health, the vegetation and the structures. For this reason modelation tools have been developed, as those used in this study that allow evaluating the convenience of the different transportation control measures.

---

\* Degree Study leading to the degree of Civil Engineer.

\*\* Faculty of physical mechanics engineering. School of Civil Engineering. Directors: Víctor Manuel Castellanos y Juan Carlos Castro.

## INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire urbano afecta la salud de miles de millones de personas al año y causa pérdidas económicas incalculables en estructuras urbanas, cultivos y gastos médicos. Las ciudades en los países en desarrollo son las más afectadas por esta situación, debido al uso de tecnologías anticuadas, la falta de planeación vial y urbana y la mínima inversión de los gobiernos para solucionar estos problemas.

Las fuentes móviles son los emisores de contaminantes más peligrosos en las ciudades, principalmente por el mal estado de la flota vehicular y las vías de circulación, la cercanía a las personas, y la diversidad y complejidad de sus fuentes.

En Bucaramanga, los niveles de contaminación han llegado a alcanzar niveles preocupantes en muchas zonas de la ciudad, siendo la zona centro de la ciudad una de las más contaminadas. El tráfico de esta zona se caracteriza por presentar congestiones y bajas velocidades de circulación, principalmente por el exceso de oferta en el transporte colectivo. El proyecto de implementación de un Sistema Integral de Transporte Masivo (SITM) en la ciudad, busca disminuir la sobreoferta, mejorar la tecnología de los vehículos, y en general organizar todo el transporte público colectivo.

Se espera que con éste estudio se pueda cuantificar el beneficio que produce a la ciudad, la implantación de un SITM en la calidad del aire, al tiempo que se establece una metodología estándar que permita evaluar la viabilidad atmosférica de diferentes medidas de control de transporte en ciudades intermedias.

## 1. INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA

### 1.1. LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE: UN PROBLEMA GLOBAL

Durante las últimas décadas, el mundo ha experimentado un interés creciente alrededor de los cambios que el hombre produce en la atmósfera y las alteraciones en el balance ecológico terrestre, como consecuencia de un veloz, y usualmente, desordenado progreso tecnológico.

Pero a pesar de ser un tema de interés actual, los efectos de la contaminación del aire han sido documentados desde hace muchos siglos. Por ejemplo, a finales del siglo XIII en Londres, se registran las primeras pruebas de contaminación atmosférica por causas antropogénicas; en narraciones hechas por cronistas de la época, se describe como el humo producido por la combustión del “carbón de mar” producía una espesa niebla que cubría la ciudad.<sup>1</sup> Durante cientos de años este no dejó de ser un problema puntual, que no implicaba grandes consecuencias en la salud humana, y por tanto no se estudió a fondo.

Con el crecimiento insostenible de la industria y la tecnología durante los últimos 100 años, el problema se volvió más común y peligroso en las grandes ciudades. Se estima que las concentraciones de CO<sub>2</sub>, principal producto de la combustión, han aumentado un 10% en el mundo desde 1890 y que siguen creciendo a una rata del 0.27% anual.<sup>2</sup>

---

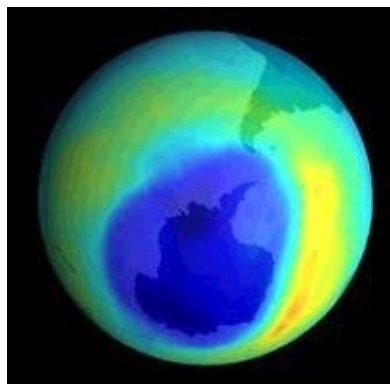
<sup>1</sup> COOPER, C. David y ALLEY, F.C. Air Pollution Control. 2ª ed. USA: Waveland Press, 1994.

<sup>2</sup> SANTA CRUZ, Alejandro. Difusión de contaminantes en la atmósfera. [en línea] Rosario (Argentina). 2000. <http://www.modeladoingenieria.edu.ar>.

Las incontroladas emisiones de las chimeneas industriales, y luego el crecimiento vertiginoso del parque automotor, convirtieron a la contaminación del aire en una prioridad sanitaria en las ciudades industrializadas, en las que miles de personas morían por problemas relacionados a los altos niveles de polución.

Este problema, obligó a los países industrializados a desarrollar legislaciones estrictas que impulsaron el desarrollo de nuevos combustibles y procesos industriales más “limpios”, y alejaron los centros productivos del centro de las ciudades. Pero el crecimiento exponencial de la industria y el automóvil compensaron una menor rata de emisión, con una mayor cantidad de fuentes, y el problema continuó presente, aunque solo se concentraba en las ciudades.

Fue en 1982 cuando se prenden las alarmas mundiales sobre el problema. En ese año la estación japonesa SYOWA descubre un hueco en la capa de ozono sobre la Antártica, y se descubre que éste es causado por el uso indiscriminado en todo el mundo de clorofluorocarbonos (CFC), sustancias que reaccionan con el ozono de la estratosfera terrestre y que poseen una muy larga vida. (Ver Figura 1-1)



*Figura 1-1: Imagen satelital del hueco en la capa de ozono sobre la Antártica*

*Fuente: Internet.*

A este problema se le suma el fenómeno de la lluvia ácida en varios países, por causa de las altas concentraciones de óxidos inorgánicos y el descubrimiento de un aumento paulatino de la temperatura global, en lo que se llama el efecto invernadero por los altos niveles de CO<sub>2</sub>. Este aumento en la temperatura podría generar un cambio climático de consecuencias terribles en la Tierra. Algunos científicos se atreven a afirmar que ya se están observando los efectos del cambio climático, aunque otros aseguran que es un proceso normal en nuestro planeta.

Lo cierto es que el problema de la contaminación atmosférica es global, por lo que se deben tomar medidas que involucren a todos los países con el fin de disminuir las emisiones en todo el mundo. Con ese fin fue realizada la cumbre de la Tierra en 1992 en Rio de Janeiro, en el que participaron más de 120 países, y en el que se dio el primer paso para la firma del Protocolo de Kyoto, donde actualmente se señalan las metas de emisión en el mundo.

El Protocolo de Kyoto<sup>3</sup>, firmado en la mencionada ciudad japonesa en 1997, es un acuerdo mundial dirigido a disminuir las emisiones que provocan el efecto invernadero. En la Tabla 1-1 se describen los gases causantes del efecto invernadero y sus principales fuentes.

El tratado establece unos niveles máximos de emisión para cada país y así lograr que en el 2012 se tengan los mismos niveles de contaminantes que en 1990. Actualmente no ha podido entrar en vigor pues Rusia y Estados Unidos, quienes aportan el 17 y 36% respectivamente de las emisiones globales de CO<sub>2</sub>, no han ratificado el acuerdo.

---

<sup>3</sup> UNFCCC. Protocol of Kyoto. [en línea]. 2003. <http://unfccc.int>

Gas del efecto invernadero	% total de los gases	Fuentes y % del total
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	50	Combustibles fósiles (35) Deforestación (10) Agricultura (3) Industria (2)
Metano (CH <sub>4</sub> )	16	Combustibles fósiles (4) Deforestación (4) Agricultura (8)
Óxido nitroso (N <sub>2</sub> O)	6	Combustibles fósiles (4) Agricultura (2)
Clorofluorcarbonados (CFC)	20	Industria (20)
Ozono (O <sub>3</sub> )	8	Combustibles fósiles (6) Industria (2)

*Tabla 1-1: Los gases del efecto invernadero*

*Fuente: CEPIS/OPS. Conceptos básicos sobre meteorología de la contaminación del aire*

El Protocolo también expone unos mecanismos de flexibilidad, donde se describe como los países pueden comerciar sus derechos de emisión con otras naciones. Por ejemplo, un país que reduzca su emisión a niveles menores que los especificados por el Protocolo, puede vender ese cupo a un país que supere los niveles señalados.

Otra opción que se plantea, es que los países que poseen grandes extensiones de bosques y selvas, cobren a las naciones contaminantes por su papel como receptores de dióxido de carbono. Los países contaminantes podrían aumentar su cupo de emisión de esta manera, al tiempo que se financia a las naciones en desarrollo para que cuiden y mantengan extensas zonas verdes.

El futuro de la humanidad en la Tierra, está dependiendo del compromiso de las naciones más industrializadas con el crecimiento sostenible, aunque la

incertidumbre actual sobre la ratificación del Protocolo de Kyoto no abriga muchas esperanzas sobre cambios radicales a corto plazo.

En un futuro ya muy cercano, cuando las diferentes naciones del mundo sientan en sus economías el fuerte golpe del deterioro ambiental, ocurrirán sin duda los cambios más drásticos. El problema es que para ése día ya podría ser muy tarde.

## 1.2. EL PROBLEMA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LAS CIUDADES

La calidad del aire en las ciudades sigue siendo otra parte importante del problema. La gran concentración de personas en las ciudades, el uso generalizado del automóvil como medio principal de movilización, la cercanía de los centros industriales a los centros residenciales y la falta de planeación urbana, siguen deteriorando la calidad de vida de las personas en los grandes centros urbanos.

Una de las primeras ciudades que sufrieron los efectos del desarrollo industrial en la calidad del aire, fue Londres, que desde la Edad Media ha tenido que restringir el uso del carbón, por las terribles nubes insalubres que se formaban sobre la ciudad. Con la revolución industrial, también llegaron nuevos combustibles menos contaminantes, como el petróleo y sus derivados, pero con el auge de la producción y el invento del automóvil, la cantidad de fuentes emisoras aumentó increíblemente, por lo que el problema se agravó.

El problema llegó a su punto más crítico en la ciudad de Londres, en Diciembre de 1952, cuando por una prolongada inversión térmica se formó una densa niebla fotoquímica o “smog”, que causó más de 4000 muertos en

una semana y 8000 más en los tres meses siguientes.<sup>4</sup> Esta situación condujo a la elaboración del Acta de Aire Limpio de Gran Bretaña en 1956.

Uno de los países pioneros en las medidas de control de las emisiones fue los Estados Unidos, que desde antes del desastre de Londres comenzó a trabajar en políticas estrictas de control de emisiones. En 1942, Pittsburg, conocida como la ciudad humosa por su industria siderúrgica y actividad ferroviaria, fue la primera ciudad en desarrollar medidas efectivas de control y disminución de contaminantes, que fijaban límites estrictos a las industrias y hogares.<sup>5</sup>

De esta manera, los Estados Unidos se ponen a la vanguardia en materia de medidas de control de emisiones. En el año de 1955 se firma el Acta para el Control de la Contaminación del Aire, que traía las primeras herramientas para manejar el problema. Luego, en 1970 se crearía la CAAA (Clear Air Act Amendments), un poderoso conjunto de políticas dirigidas a disminuir los niveles de contaminación en los siguientes años en todo el país.<sup>6</sup>

Muchos países seguirían su ejemplo y actualmente prácticamente todos los países del mundo cuentan en su legislación con herramientas que procuren controlar las emisiones atmosféricas en las ciudades, en procura de una mejor calidad de vida de sus habitantes.

Especial atención merecen las emisiones de contaminantes provenientes de fuentes móviles, especialmente por vehículos automotores, cuyo número ha crecido de manera exponencial<sup>7</sup> en todo el mundo y presentan el problema

---

<sup>4</sup> WINTROBE, Maxwell y otros. Harrison: Medicina Interna. Tomo II. 4ª. ed. México: Mc. Graw – Hill, 1973. p. 1493 – 1496

<sup>5</sup> SANTA CRUZ Alejandro. Op. cit., p. 8-9

<sup>6</sup> COOPER C. David. Op. cit., p. 16-17

<sup>7</sup> Según proyecciones de las Naciones Unidas, durante los últimos 40 años el número de automóviles ha crecido por un factor de 10, mientras que la población lo ha hecho por un factor de 2.

de ser variadas, complejas y encontrarse muy cercanas a los seres humanos, animales y construcciones.

Actualmente la problemática de la calidad del aire urbano se está trasladando a los países en vías en desarrollo, como lo señala la OMS: “El rápido crecimiento industrial y demográfico, combinado con el mejoramiento de los niveles de vida, están produciendo en los países en desarrollo modalidades de uso de los vehículos automotores similares a los del mundo industrializado.”<sup>8</sup>



*Figura 1-2: Las congestiones vehiculares son una situación común en todos los países en desarrollo*

*Fuente: Internet*

Lastimosamente, la mayoría de países en desarrollo no han adelantado estrategias gubernamentales que combatan el problema, por lo que la situación puede empeorar en los próximos años. Es por esto que se hace imperante adelantar investigaciones, que diagnostiquen la calidad del aire en las ciudades y señalen estrategias de control de emisiones, antes que el problema sea inmanejable.

---

<sup>8</sup> OMS. Taller sobre contaminación atmosférica causada por vehículos automotores - Guía del instructor. [en línea] 1997. [http:// www.ba.uca.edu.ar](http://www.ba.uca.edu.ar)

### 1.3. LA CALIDAD DEL AIRE EN BUCARAMANGA

Bucaramanga es la sexta ciudad de Colombia en importancia y tamaño, es la capital del departamento de Santander, que agrupa en su Área Metropolitana a más de un millón de habitantes<sup>9</sup>. El Área Metropolitana la conforman la ciudad de Bucaramanga, y los municipios aledaños de Floridablanca, Piedecuesta y Girón. En la Tabla 1-2 se presenta un cuadro con las poblaciones estimadas en el Área Metropolitana de Bucaramanga para el año 2003.

Municipio	Población (2003)
Bucaramanga	558.748
Floridablanca	248.575
Girón	114.522
Piedecuesta	100.687
TOTAL	1.022.532

*Tabla 1-2: Población estimada en el Área Metropolitana de Bucaramanga.*

*Fuente: Gobernación de Santander.*

La ciudad se encuentra ubicada a los 7° 08' de latitud norte con respecto al Ecuador y 73° 08' de longitud al Oeste de Greenwich, en medio de la Cordillera Oriental, sobre una terraza inclinada rodeada por altas montañas. Su topografía es 15% plana, 30% ondulada y el restante 55% es quebrada. La ciudad cubre un área de 165 Km<sup>2</sup> a una altura promedio sobre el nivel del mar de 959 m. Presenta un clima tropical de montaña y temperatura promedio de 23° C.

Estas condiciones topográficas y meteorológicas de Bucaramanga, se convierten en factores potenciadores de la contaminación ambiental cuando

---

<sup>9</sup> GOBERNACIÓN DE SANTANDER. Diciembre de 2003

ocurren procesos atmosféricos adversos, como inversiones térmicas prolongadas, periodos continuos de alto brillo solar y de atmósfera estable.



*Figura 1-3: Panorámica de la ciudad de Bucaramanga*

*Fuente: [www.bucaramanga.gov.co](http://www.bucaramanga.gov.co)*

Su actividad económica es netamente comercial; aunque existen otros renglones representativos tales como la industria del calzado, la confección, la prestación de servicios de salud, finanzas y educación. Otro sector significativo de la economía bumanguesa es el agropecuario, que administra y comercializa en la ciudad la producción de los municipios cercanos<sup>10</sup>.

Por ser una ciudad comercial, se presenta una importante actividad vehicular en todo el perímetro urbano, por lo que la contaminación proveniente de estas fuentes es más significativa que la que proviene de la mediana industria local.

Según los planes gubernamentales, se planea convertir la ciudad en el centro tecnológico e investigativo del país, en un proyecto denominado “Bucaramanga Tecnópolis”, el cual busca: “hacer del área metropolitana de Bucaramanga una región competitiva donde la ciencia y la tecnología se

---

<sup>10</sup> ALCALDÍA DE BUCARAMANGA. Información. [en línea] 2004. <http://www.bucaramanga.gov.co>

articulen a los procesos socioeconómicos para lograr una mayor calidad de vida para todos sus habitantes”.<sup>11</sup>

Sin duda uno de los pilares que garantizan una buena calidad de vida en las ciudades, es la conservación de los recursos ambientales, y se hace necesario mantener estándares adecuados de calidad del aire para este fin. Un aire de calidad repercute en significativas disminuciones de las enfermedades respiratorias y cardiovasculares, y menores niveles de estrés, entre otros cambios positivos en la calidad de vida de las personas.

Por medio de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire, que administra la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), se han encontrado concentraciones de Ozono, Material Particulado y NO<sub>x</sub> cercanas a los límites promedios mensuales estipulados en las normas colombianas. Para algunos días del mes, se superan los valores de la norma.<sup>12</sup>

La herramienta utilizada a nivel local para la medición de los niveles de contaminación es el IBUCA, el cual es un índice de calidad del aire, que relaciona la concentración de contaminantes medida y el valor permisible en la norma ambiental. Según esta relación, se asigna un color y un valor adimensional de 1 a 10, al nivel de contaminación. Este índice, permite establecer como se encuentra la calidad del aire con respecto a la normatividad actual vigente.

En la Tabla 1-3 se describe la nomenclatura utilizada en el índice IBUCA:

---

<sup>11</sup>CORPLAN. Bucaramanga Tecnópolis - Estrategia de competitividad para el Área Metropolitana de Bucaramanga. [CD – ROM] Bucaramanga. 2002

<sup>12</sup> CDMB. Diagnóstico de la calidad del aire en Bucaramanga. Septiembre de 2003

IBUCA	Equivalente porcentual en términos del valor de la norma	Descriptor	Color
0 – 1.25	0 – 12.5	Bueno	Verde
1.26 – 2.50	12.6 – 25	Moderado	Amarillo
2.51 – 7.50	25.1 – 75	Regular	Naranja
7.51 – 10.0	75.1 – 100	Malo	Rojo
Mayor de 10.0	Supera el valor de la norma	Peligroso	Púrpura

Tabla 1-3: Indicador de la contaminación del aire (Índice IBUCA)

Fuente: CDMB. 2003

Uno de los puntos más críticos de la ciudad en lo que respecta a la calidad del aire, es la zona centro de la ciudad, debido a la alta concentración de vehículos que circulan por este sector a bajas velocidades. En la figura 1-4 se ilustran los promedios mensuales de contaminación medidos en los últimos dos años en la estación Centro, usando el índice IBUCA:

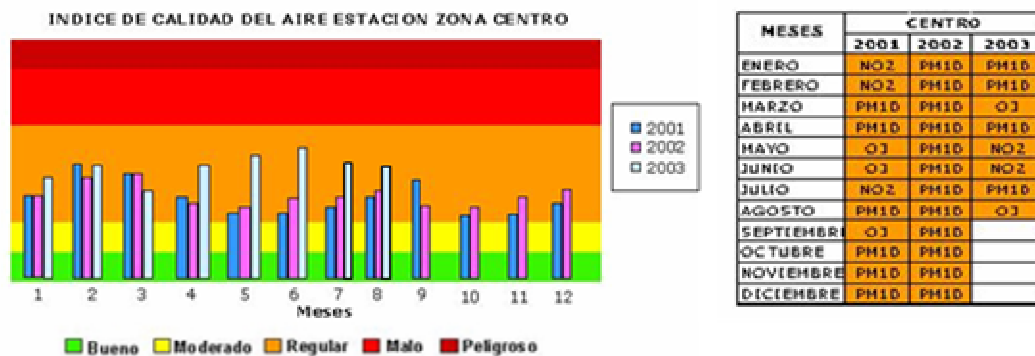


Figura 1-4: Concentración de contaminantes registrados en la Estación Zona Centro

Fuente: CDMB. Septiembre de 2003

Como se observa en la gráfica, la contaminación registrada en esta zona se presenta principalmente por concentraciones significativas de material particulado menor a diez micras [PM10], ozono [O3] y dióxido de nitrógeno [NO2], “debido principalmente al considerable tránsito de vehículos con

motores de combustión interna, que utilizan combustibles como gasolina y ACPM que son las fuente principales de formación de estos compuestos”<sup>13</sup>. Además, según el IBUCA, la contaminación del aire en la zona se cataloga como “regular”, aunque en las horas pico de mayor flujo vehicular se pueden presentar concentraciones significativamente mayores.

### 1.3.1. El problema del transporte en Bucaramanga

Las ciudades latinoamericanas, y en general todas las principales ciudades de los países en vía de desarrollo, presentan problemas de contaminación atmosférica, causados principalmente por los vehículos automotores.

Las causas del crecimiento en los niveles de contaminación en las ciudades del tercer mundo son principalmente “el alto número de motocicletas; la elevada proporción de taxis, autobuses y camiones que circulan junto con tractores y vehículos lentos no motorizados; las grandes flotas de autobuses y camiones pesados impulsados por motores de gasolina que rinden poco y producen altas emisiones; el parque de vehículos cuya edad promedio es mucho mayor que en el mundo desarrollado y, lo que es de suma importancia, la frecuente falta de espacios viales urbanos y la gestión ineficiente del tránsito.”<sup>14</sup>

Bucaramanga, padece de todos estos problemas comunes a las modernas ciudades tercermundistas, pero además posee un agudo problema en la circulación vial causado por “la concentración de rutas de servicio público en muy pocas vías de la red, la baja capacidad vehicular de las vías arterias y la

---

<sup>13</sup> CDMB. Op. cit.

<sup>14</sup> OMS. Op. cit.,. Pág. 5

rigidez horaria que la cultura ciudadana posee en el desarrollo de sus actividades.”<sup>15</sup>

Estos aspectos causan congestiones en las principales vías de la ciudad, que no solo causan inconvenientes sociales y económicos, sino que desencadenan problemas de contaminación atmosférica en las zonas más vulnerables.

Según estudios de transporte en la ciudad, la zona más afectada por la congestión vehicular es la Carrera 15, que cruza la ciudad de norte a sur, donde se presentan las mayores concentraciones de transporte público. Estos datos coinciden con los niveles más altos de contaminación en la ciudad que se registran en ésta zona.

Allí, se presenta una oferta de transporte hasta de 260 mil pasajeros por día por sentido. Este valor supera ampliamente la demanda de transporte público en la Carrera 15, el cual no supera los 40 mil pasajeros por día por sentido.<sup>16</sup> Como se puede observar en la Tabla 1-4, existe una sobreoferta de servicio público en todas las vías arterias de la ciudad.

Otro problema del sistema actual de transporte público urbano, es la vejez de los buses que prestan éste servicio en la ciudad, pues muchos de estos ya cumplieron su vida útil o no se les aplica constante mantenimiento.

---

<sup>15</sup> GEOTÉCNICA. Transporte Masivo Para el Área Metropolitana de Bucaramanga. - Estudio para el Diseño Conceptual y Prediseño Técnico. – Tomo I. Bucaramanga. 2000.

<sup>16</sup> GEOTÉCNICA Op. cit.

Tramo	Demanda	Oferta	Índice
	(pas/día)	(pas/día)	(%)
Carrera 15 (La Virgen - Av. Quebrada Seca)	30.000	130.000	23
Autopista Floridablanca (Motoeste - Cañaveral)	40.000	120.000	33
Carrera 33 (Calle 14 - Calle 56)	40.000	100.000	40
Calle 9 (Carrera 15 - Carrera 27)	9.000	120.000	8
Calle 14 (Carrera 15 - Carrera 33)	11.000	80.000	14
Calle 56 (Carrera 33 - Transv. Metropolitana)	30.000	110.000	27
Autopista Girón (Car. 27 - Transv. Metropolitana)	4.000	60.000	7
Transv. Central (Autop. Floridab.- Autop. Girón)	8.000	80.000	10

*Tabla 1-4: Datos de oferta y demanda en las principales vías de la ciudad.*

*Fuente: GEOTÉCNICA. Bucaramanga 2003*

Para combatir éste problema se viene desarrollando lentamente el Programa de Reposición de Autobús a nivel nacional, impulsado por el Ministerio de Transportes, que busca reemplazar los autobuses más antiguos de circulación por modelos nuevos que usen combustibles menos contaminantes, como el Gas Natural Comprimido.

Una alternativa que se plantea al problema, es la implantación de un Sistema Integral de Transporte Masivo que permita la organización general del transporte público en la ciudad. Este sistema puede ser subterráneo o elevado, o usar las vías actuales de las ciudades, determinando corredores exclusivos de circulación de buses, en lo que se denomina un sistema a nivel de vía.

Los sistemas de transporte elevado o subterráneos, tipo metro, han demostrado ser muy efectivos en Colombia y el mundo, pero requieren de inversiones iniciales muy altas, que muchas ciudades no pueden asumir. En

cambio, los sistemas terrestres de carriles exclusivos son mucho más económicos y presentan muy buenos niveles de servicio y comodidad, como es el caso del Sistema TRANSMILENIO en Bogotá.

En Bucaramanga, ya se ha comenzado a desarrollar el proyecto METROLÍNEA, el cual busca centralizar el transporte público de la ciudad y brindar a los usuarios un servicio más rápido, eficiente y con vehículos menos contaminantes. Los efectos en la contaminación del aire del sistema serán evaluados por éste proyecto.

#### 1.4. CONSECUENCIAS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Cuando algunas sustancias o compuestos se encuentran en el aire en concentraciones o niveles tales que pueden causar daños o molestias a personas, animales, vegetación o materiales se denominan contaminantes atmosféricos. En países como los Estados Unidos, la contaminación causa pérdidas anuales de billones de dólares a causa de sus efectos negativos en bosques, cultivos, edificios, ciudades y cuerpos<sup>17</sup>

Las plantas y cultivos se ven afectados directamente por el ozono. Grandes zonas de cultivo de trigo y otros cereales son destruidos por oleadas de ozono provenientes de ciudades ubicadas a cientos de kilómetros. La lluvia ácida causada por la condensación de óxidos de azufre y nitrógeno también afecta de forma muy negativa a las plantas y animales.

La visibilidad es otro factor que se afecta de manera importante por la contaminación. Aparte de sus efectos psicológicos en la población, la

---

<sup>17</sup> PIMA COUNTY DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL QUALITY AIR INFO NOW WEB SITE. [en línea] Arizona, 2004. <http://www.airinfonow.com/index.asp>.

disminución en la visibilidad afecta los vuelos comerciales y daña la vista de paisajes naturales, lo que afecta el turismo.

Uno de los principales efectos de la contaminación, por sus importantes consecuencias económicas, es el acelerado daño en la fachada de los edificios urbanos y estructuras cercanas a zonas de gran carga de contaminantes. Esto incluye monumentos de gran valor histórico y arquitectónico como el Partenón en Atenas o el Coliseo en Roma

#### 1.4.1. Los efectos en la salud humana

Respirar aire contaminado es peligroso y si la dosis del contaminante, es decir la relación entre tiempo de exposición y concentración, es lo suficientemente alta, puede ser mortal. Los compuestos y partículas peligrosas entran directamente a nuestro organismo al respirar, afectan todo el sistema respiratorio y entran a la sangre en el intercambio de los alvéolos. Sus efectos pueden asimilarse a los de fumar, aunque ésta última actividad es más intensa y peligrosa.

El aire enrarecido de las ciudades es un problema grave, que afecta la calidad de vida de las ciudades y dispara los índices de enfermedades cardio - respiratorias, con el consecuente aumento en el gasto gubernamental en materia de salud. El Banco Mundial estima que del 2 al 5 por ciento de las muertes en países en vías de desarrollo, son causados por concentraciones de contaminantes elevadas<sup>18</sup>

---

<sup>18</sup> WORLD RESOURCES INSTITUTE. World Resorces 2002 – 2004. [en línea]. Washington. 2003. <http://www.wri.org>

El 'problema del problema' es la diversidad de factores que influyen en agravarlo, como son "la complejidad de los contaminantes múltiples del aire, el gran número de fuentes de donde provienen, y la gran población expuesta."<sup>19</sup> Por lo tanto se requiere de un trabajo interdisciplinario y desde diferentes enfoques, que ataque las causas del problema y mitigue sus efectos.

Los síntomas por la exposición a altas concentración de contaminantes, cambian de un individuo a otro, presentándose los principales problemas médicos en aquellas personas con enfermedades cardiovasculares preexistentes, o en aquellas susceptibles por su edad: niños y ancianos. A su vez, los síntomas son diferentes según el tipo o combinación de contaminantes a los que se está expuesto.

Los contaminantes que resultan de los procesos de combustión, provienen de diversas fuentes, tanto naturales como producidas por el hombre. Estos contaminantes dependen de la composición del combustible y de las sustancias presentes en el proceso de combustión que son emitidas a la atmósfera.

Es importante notar que usualmente las personas en las ciudades se encuentran expuestas a una gran variedad de contaminantes atmosféricos, los cuales actúan en conjunto y crean un efecto sinérgico de gran peligrosidad.<sup>20</sup>

Los contaminantes provenientes de fuentes móviles, pueden agruparse en las siguientes clases:

---

<sup>19</sup> WINTROBE, Maxwell y otros. Op. cit., p. 1493

<sup>20</sup> WORLD RESOURCES INSTITUTE. Op. cit.

- Monóxido de Carbono
- Óxidos de Nitrógeno
- Hidrocarburos
- Óxidos de Azufre
- Material Particulado

#### 1.4.1.1. Monóxido de Carbono

Los principales combustibles son los compuestos orgánicos basados en cadenas de carbono y oxígeno (como la madera o la gasolina), los cuales son una fuente de energía conocida desde la prehistoria. En el proceso de la combustión se rompen éstas cadenas de carbono y se combinan con el oxígeno, produciendo óxidos de carbono, de dos o cuatro valencias: el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

El dióxido de carbono es el principal producto de la combustión y es uno de los gases predominantes en la atmósfera, y para que tenga efectos nocivos en un ser humano, debe encontrarse en altísimas concentraciones (por ejemplo, si se está en un lugar cerrado con un vehículo encendido por mucho tiempo). No se considera como un contaminante urbano, aunque a nivel global, el aumento de los niveles de CO<sub>2</sub> causa el llamado 'efecto invernadero'.

Por otro lado, el CO es un estado intermedio en la formación del CO<sub>2</sub>, cuando no existe suficiente oxígeno en el proceso. La OMS lo define como un "gas incoloro, inodoro y tóxico, producido por la combustión incompleta de combustibles a base de carbón, entre los que se incluyen la gasolina, el petróleo y la leña... también se produce debido a la combustión incompleta

de numerosos productos naturales y sintéticos.<sup>21</sup> Tiene la propiedad de combinarse con la hemoglobina de la sangre, reduciendo la distribución de oxígeno a los órganos y tejidos. Al contrario de otros contaminantes, las concentraciones de CO aumentan en los meses más calurosos

Cuando se presentan altos niveles de CO, se presentan síntomas en la mayoría de personas como:

- Disminución de la visibilidad
- Dolor de cabeza
- Estrés y reducción de la capacidad productiva
- Complicaciones cardio-respiratorias en la población susceptible

#### 1.4.1.2. Óxidos de Nitrógeno y contaminantes secundarios

Los óxidos de nitrógeno son producidos en los procesos de combustión y su concentración presenta una clara dependencia con la temperatura y la calidad de la mezcla. Estos factores también determinan la proporción de óxido nítrico (NO) u óxido nitroso (NO<sub>2</sub>) que se formará. Es importante aclarar que también se produce N<sub>2</sub>, pero éste gas no tiene implicaciones para la salud humana.

Las concentraciones de estos óxidos aumentan cuando existen diferencias de temperatura en el dispositivo en el que ocurre la combustión, que para un vehículo convencional corresponde al pistón. Es por esto que la producción de óxido de nitrógeno es mucho mayor en los primeros minutos de funcionamiento del vehículo, cuando las paredes del pistón están frías; esto explica también porque los procesos químicos que involucran a los óxidos de

---

<sup>21</sup> OMS. Op. cit., p. 145

nitrógeno (como el smog) ocurren en las mañanas, cuando comienza la actividad vehicular.

Los gases de óxido de nitrógeno pueden viajar grandes distancias, causando una gran variedad de problemas ambientales y de salud en lugares alejados del sitio de emisión. En el viaje es común que sufran procesos químicos al combinarse con otros gases y por acción de la luz solar.

El principal problema de los óxidos de nitrógeno no es su presencia en sí, sino la capacidad que tienen para formar contaminantes secundarios mucho más peligrosos, como lo es el ozono, y de potenciar la formación de material particulado en la atmósfera.

La contaminación fotoquímica es el nombre que se le ha dado al proceso de producción de contaminantes secundarios en la atmósfera, por causa de complejas reacciones químicas en presencia de la luz solar. Los principales componentes de éste procesos son los óxidos de nitrógeno, los hidrocarburos, el oxígeno y la luz ultravioleta del sol.

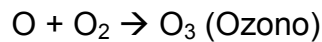
Se considera que el ozono es el contaminante secundario más perjudicial para la salud humana, pero algunos efectos, como la irritación ocular, se le atribuyen a otros contaminantes fotoquímicos como los nitratos orgánicos y los aldehídos

El proceso se puede simplificar en tres etapas:<sup>22</sup>

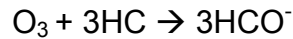
- 1) La luz ultravioleta, rompe las partículas de óxido de nitrógeno, liberando partículas libre de oxígeno, que reaccionan con el oxígeno molecular y forman ozono en zonas muy cercanas a la superficie de la Tierra.

---

<sup>22</sup> MARCANO, Jose E. Los Recursos naturales – La contaminación atmosférica. [en línea] 2003. <http://www.jmarcano.com/index.html>



2) El ozono reacciona con los hidrocarburos presentes, creando reactivos libres muy activos.



3) Por último, estos radicales activos reaccionan con otros radicales y con los contaminantes primarios, para dar origen a otros contaminantes fotoquímicos secundarios:



La formación de contaminación fotoquímica se ve favorecida por algunos factores microclimáticos: presencia de un sistema de alta presión, elevada radiación solar y vientos débiles. En días con éste tipo de características atmosféricas se puede percibir la contaminación fotoquímica como una nube espesa que cubre la ciudad, que se denomina por la palabra inglesa “smog” o “smog de Los Ángeles”, pues fue en esta ciudad la primera vez que se observó éste fenómeno, durante los días de verano. (Ver Figura 1-5)

Los principales síntomas en la salud humana por los altos niveles de ozono y otros contaminantes fotoquímicos en la troposfera son:

- Dificultad al respirar
- Pérdida notable de visibilidad
- Daños en el sistema respiratorio
- Disminución de la actividad cardiovascular
- Irritación ocular, de garganta y de otras mucosas

- Tos, fatiga y anemia



*Figura 1-5: Los Angeles en un día típico de verano (izquierda) y en invierno (derecha)*

*Fuente: Internet*

Según varios estudios epidemiológicos se ha determinado que el ozono es la “principal causa de los efectos de la contaminación fotoquímica sobre la salud humana en Norteamérica”. Estos mismos estudios han relacionado aumentos de  $50\mu\text{g}/\text{m}^3$  en los niveles de ozono con incrementos hasta del 4% en el número de ingresos hospitalarios por enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), del 3,5% en ingresos por asma y del 2,3% de defunciones por éstas causas.<sup>23</sup>

Los efectos en la salud humana por efecto del ozono, según la concentración en el ambiente y el tiempo de exposición, se pueden observar en la Tabla 1-5.

---

<sup>23</sup> BALLESTER DÍEZ Ferrán, y otros. Efectos de la contaminación atmosférica en la salud: una introducción. En: Revista Española de Salud Pública. [en línea]. Vol. 73 (no.2), 1999. <http://www.msc.es>

Nivel de ozono (µg/m <sup>3</sup> )	Irritación de ojos, nariz y garganta	Media de disminución de FEM (Flujo expiratorio máximo) en población activa en el exterior	Impedimento para realizar actividades al exterior	Respuesta inflamatoria, hipersensibilidad en personas activas en el exterior	Síntomas respiratorios (principalmente en adultos)	Clasificación global	
< 100	Sin efecto	Población General 0%	10% mas sensible de la población 0%	0%	Ninguna	Ninguno	-
200	En unas pocas personas sensibles	5%	10%	0%	Leve	Opresión en el pecho, tos	Ligero
300	<30% de la población	15%	30%	Algunos individuos	Moderada	Incremento de síntomas	Moderado
400	>50% de la población	50%	50%	Muchos individuos	Severa	Mayor incremento de síntomas	Severo

*Tabla 1-5: Efectos agudos esperados por contaminación fotoquímica en días caracterizados por niveles máximos de concentraciones de ozono de 1 hora. Indicado para niños y adultos jóvenes no fumadores sobre la base de las observaciones hechas en estudios*

*toxicológicos, clínicos y epidemiológicos*

*Fuente: OMS, 1992*

#### 1.4.1.3. Hidrocarburos

Por hidrocarburos denominamos a un gran conjunto de compuestos orgánicos, en los que solo se presentan moléculas de carbono e hidrógeno. Son las principales fuentes de energía actual, incluyendo los principales combustibles para vehículos automotores. Las emisiones vehiculares de hidrocarburos pueden provenir de dos fuentes: los gases de escape por combustión incompleta y por evaporación del combustible.

Una sub-clasificación de los hidrocarburos emitidos por los vehículos automotores, son los compuestos orgánicos volátiles o VOCs, llamados así por su propiedad de volatilizarse continuamente en condiciones normales. Estos compuestos usualmente se evaporan de los tanques de combustible mientras el auto está en movimiento o en reposo.

Como se mencionó anteriormente, los hidrocarburos son una de las causas en la formación del smog en las ciudades. Además algunos de éstos compuestos pueden llegar a ser tóxicos, o sea que tienen implicaciones directas y severas en la salud humana. Se ha comprobado que la concentración alta de VOCs es un factor cancerígeno y puede causar malformaciones congénitas.

#### 1.4.1.4. Óxidos de azufre

Los óxidos de azufre producidos por fuentes móviles, provienen principalmente de los vehículos diesel, aunque en los últimos años se ha comenzado a considerar importante el aporte de éste contaminante por vehículos a gasolina.

El dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) es el óxido más estable y el que más complicaciones presenta a la salud humana. Usualmente, la presencia de SO<sub>2</sub> se relaciona directamente con el material particulado, siendo este el origen de las partículas más pequeñas, al condensarse en el aire. La combinación de SO<sub>2</sub> y material particulado, provoca una parte importante de la contaminación de las grandes ciudades<sup>24</sup>, actuando en forma conjunta y por separado, en un fenómeno que se suele denominar “smog de invierno”

A diferencia de otros contaminantes, el SO<sub>2</sub> actúa muy rápidamente sobre la salud humana, usualmente a los pocos minutos de sufrir la exposición. Al igual que otros contaminantes afecta las funciones respiratorias y cardiovasculares.

Según estudios de la OMS, en la Tabla 1-6 se pueden apreciar los efectos en la salud humana según la concentración de SO<sub>2</sub> en el aire:

SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	Efectos sobre la salud	Grado de clasificación de los efectos
200	Disminución ligera y transitoria de la función pulmonar en niños y adultos que puede durar de 2 a 4 semanas	Moderados
250	Aumento de la morbilidad respiratoria entre los adultos susceptibles y posiblemente entre los niños	Moderado
400	Mayor incremento en la morbilidad respiratoria	Graves
500	Aumento de la mortalidad entre los ancianos y los enfermos crónicos	Graves

*Tabla 1-6: Niveles promedios de 24 horas de mezclas de contaminación atmosférica conteniendo SO<sub>2</sub> y partículas en suspensión por encima de los cuales se pueden esperar efectos agudos sobre la salud humana*

*Fuente: OMS, 1990<sup>25</sup>*

<sup>24</sup> WORLD RESOURCES INSTITUTE. Op. cit Cuadro 2.6

<sup>25</sup> BALLESTER DÍEZ Ferrán, y otros. Op. cit., p. 118

#### 1.4.1.5. Material Particulado

La contaminación atmosférica de partículas está formada por una mezcla compleja de partículas grandes y pequeñas de diferentes orígenes y composiciones químicas. Para las fuentes móviles, el material particulado proviene principalmente de los humos de escape de los motores diesel.

Estas partículas se pueden clasificar según su tamaño promedio. Se ha comprobado que las partículas más pequeñas suelen ser las más peligrosas para la salud, porque “se pueden inhalar y penetran en el interior de los pulmones, asentándose en zonas en las que los mecanismos de limpieza del organismo se declaran impotentes. Los constituyentes de estas partículas tienden a ser químicamente más activos y pueden ser también ácidos y, por tanto, muy destructivos”<sup>26</sup>.

Para los estudios de contaminación, se estudian las partículas con diámetro menor a 10 micras y se les ha denominado PM<sub>10</sub>. En los últimos años, partículas de diámetros aún menores han demostrado ser más importantes, por lo que en la actualidad se suelen analizar especialmente las partículas menores a 2,5 micras o PM<sub>2,5</sub>,

Estas pequeñas partículas (menores a 10 micras) tienen su origen principal en la combustión de los combustibles fósiles,<sup>27</sup> y se encuentran en el hollín y “humo negro” expulsado por el escape de los vehículos a diesel y gasolina, junto con procesos de condensación en la atmósfera de óxidos de nitrógeno y azufre.

---

<sup>26</sup> Ídem

<sup>27</sup> WORLD RESOURCES INSTITUTE. Op. cit Cuadro 2.6

Según estudios epidemiológicos recientes, se presenta la Tabla 1-7, donde se observan los efectos en la salud para diferentes variaciones en los niveles de material particulado.

Indicador del efecto sobre la salud	Cambio (%) del indicador de efecto asociado a un incremento de 10µg/m <sup>3</sup> de PM <sub>10</sub>
<i>Incremento de la mortalidad diaria</i> Muertes por todas las causas Muertes por causas respiratorias Muertes por causas del aparato circulatorio	1,0 3,4 1,4
<i>Incremento de la demanda de atención hospitalaria (enfermedades respiratorias)</i> Ingresos Urgencias	0,8 1,0
<i>Exacerbación del asma</i> Crisis asmáticas Uso de broncodilatadores Visitas a urgencias Ingresos hospitalarios	3,0 2,9 3,4 1,9
<i>Disminución de la función pulmonar</i> Volumen expiratorio máximo por segundo Flujo expiratorio máximo	0,15 0,08

*Tabla 1-7: Estimación de los efectos asociados a los niveles medios diarios de contaminación atmosférica por partículas en suspensión.*

*Fuente: Dockery y Pope, 1994<sup>28</sup>*

Recientes estudios señalan además, que aún pequeñas concentraciones de material particulado pueden ser perjudiciales para la salud, sin existir un umbral claro de concentración en el que estas partículas dejen de afectar a

<sup>28</sup> BALLESTER DÍEZ Ferrán, y otros. Op. cit., p. 118

las personas. Además se ha podido demostrar una relación directa entre el aumento de pequeñas concentraciones de material particulado, con incrementos en el índice de mortalidad, aún en poblaciones con bajos niveles de contaminación.<sup>29</sup>

### 1.5. LA LUCHA CONTRA LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA<sup>30</sup>

La contaminación atmosférica es uno de los principales problemas ambientales en los centros urbanos de mediano y gran tamaño alrededor del mundo. Suele ser el resultado de “la aplicación de una tecnología defectuosa o mal empleada, así como de la ausencia de criterios ambientales al realizar las planificaciones económicas nacionales.”

A diferencia de otras variables ambientales afectadas por el desarrollo de las ciudades (como las corrientes de agua superficial), disminuir los niveles de contaminación del aire por medio de tratamientos artificiales es una tarea prácticamente imposible en la actualidad. Esta labor se le deja a la naturaleza.

La atmósfera cuenta con las herramientas suficientes para procesar todos los contaminantes producidos por la actividad humana, de hecho, la producción global de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y demás contaminantes urbanos primarios, es causada en una gran proporción por medios naturales.

El problema de la contaminación urbana se debe a la gran concentración de las fuentes, lo que no permite la dispersión de contaminantes en la

---

<sup>29</sup> ARRIBAS-MONZON Federico y otros. Efectos de la contaminación atmosférica sobre la mortalidad diaria en la ciudad de Zaragoza. En: Salud Pública de México [en línea] Vol. 43 (no.4), 2001. [http://www.insp.mx/salud/43/434\\_3.pdf](http://www.insp.mx/salud/43/434_3.pdf)

<sup>30</sup> MARCANO, Jose E. Op. cit.

troposfera, ni el escape de estos a las capas superiores de la atmósfera, con la velocidad y eficiencia suficientes, como para no causar problemas en los organismos vivos.

Debido a la imposibilidad actual de diseñar mecanismos viables de remoción de contaminantes, la lucha contra la contaminación está centrada principalmente en diseñar estrategias gubernamentales de planificación y desarrollo sostenible, junto con la implementación de tecnologías cada vez más eficientes y menos contaminantes.

Las estrategias de disminución de contaminantes atmosféricos usualmente traen consecuencias económicas negativas, al igual que la mayoría de las medidas ambientales, por lo que es muy importante la optimización de los beneficios obtenidos a partir de estas estrategias. Por lo tanto, el primer paso debe consistir en un claro y preciso diagnóstico de la calidad del aire existente y las tecnologías aplicadas por los diferentes emisores.

Un diagnóstico adecuado de la calidad del aire en cualquier zona urbana, debe contener al menos los siguientes planes específicos:

- Realización de un inventario completo de las fuentes de contaminación, incluyendo las fuentes fijas y móviles, así como un estimado de las concentraciones de los contaminantes criterios en una zona determinada
- Estudio de las tecnologías utilizadas por las industrias y vehículos, así como las relaciones costo / beneficio de los cambios tecnológicos

- Desarrollo e implementación de modelos atmosféricos que permitan conocer las relaciones entre las emisiones en los distintos focos y la calidad del aire de los receptores
- Investigaciones epidemiológicas sobre los efectos en la salud, de las distintas concentraciones de contaminantes.
- Estudios económicos y ambientales sobre los daños en los bienes materiales y la ecología, por la contaminación ambiental

Alrededor del mundo, se han planteado dos enfoques distintos a la hora de formular estrategias para combatir la contaminación atmosférica:

#### 1.5.1. La gestión de los recursos atmosféricos

Esta estrategia se basa en la fijación de unas normas de calidad del aire que no deben sobrepasarse. Este tipo de estrategia es la que han desarrollado países como Estados Unidos, Alemania y Colombia.

En este tipo de estrategias, se exige a todas las industrias que cumplan con unos parámetros fijos de niveles máximos de contaminación, lo que puede ser discriminante para algunas actividades industriales, en las que por su proceso productivo, emiten más contaminantes.

#### 1.5.2. La aplicación de los mejores medios practicables

Esta estrategia esta basada en el control de las emisiones mediante el empleo de la mejor tecnología disponible, económicamente aplicable para la

reducción de la contaminación. Este tipo de estrategia se ha seguido principalmente en el Reino Unido.

Para este tipo de estrategias, se les exige a las industrias y vehículos, que apliquen la tecnología de punta existente, y por tanto la menos contaminante. Tiene el problema que los mejores medios practicables no garantizan una calidad del aire admisible, pues puede ocurrir que aunque se usa la tecnología menos contaminante existente, la densidad de las fuentes de emisión, las condiciones meteorológicas y la topografía influyan negativamente en mantener niveles no admisibles de contaminación.

### 1.5.3. La combinación de ambos enfoques

Hoy día se sabe que la mejor estrategia para combatir la contaminación atmosférica debe ser una combinación de ambos enfoques, en el que se hagan cumplir unas normas mínimas de calidad del aire en la zona, al tiempo que se estimule el uso de los mejores medios practicables en industrias y transportes.

Existen varios tipos de acciones correctivas y preventivas, que tienen el objetivo de mejorar la calidad del aire en los centros urbanos. Estas son algunos de los principales planes de acción que se aplican en la actualidad en todo el mundo:

- Usar sistemas de contención de gases y humos en industrias y vehículos (filtros, convertidores catalíticos, etc.)
- Optimizar los sistemas productivos en industrias, y adoptar nuevas tecnologías menos contaminantes

- Optimizar la capacidad de autopurificación de la atmósfera (Eleva la altura de las chimeneas, modificar la velocidad y temperatura de emisión de gases, utilizar dispersores de grandes dimensiones)
- Desarrollar técnicas de producción ambientalmente sostenibles
- Estimular el ahorro energético
- Planificar adecuadamente la estructura urbanística de las ciudades. (Localizar polígonos industriales con criterios medioambientales, alejar las vías de gran flujo vehicular de las zonas pobladas, fomentar el uso del transporte público, crear zonas verdes amortiguadoras, entre otras.)
- Realizar estudios previos de impacto ambiental
- Implementar programas de vigilancia de la calidad del aire (Redes de monitoreo ambiental).

Una vez se han formulado las estrategias de lucha contra la contaminación atmosférica, es necesario poner en práctica instrumentos legislativos eficaces que hagan posible la ejecución de tales estrategias. Una ley eficaz en combatir el problema ha de ser “políticamente aplicable, técnicamente posible y económicamente no ha de suponer dificultades excesivas.”

Por último, se hace indispensable desarrollar planes educativos que involucren a toda la comunidad, en los que se informen los peligros de la contaminación atmosférica y se expongan las diferentes maneras en que los ciudadanos, empresarios y entes gubernamentales, pueden ayudar a solucionar el problema.

## 2. ESTADO DEL ARTE EN SIMULACIÓN ATMOSFÉRICA

### 2.1. CONCEPTOS BÁSICOS DE LA TÉCNICA DE SIMULACIÓN

Simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real, con el propósito de entender el comportamiento de este sistema por medio de herramientas matemáticas.

La creación de modelos data de la época del renacimiento cuando los primeros científicos necesitaban abstraer la realidad en forma precisa y ordenada. En la II Guerra Mundial fueron muy importantes para resolver problemas de reacciones nucleares cuya solución experimental sería muy costosa. En esos años tomaron su estructura conceptual actual. Finalmente, desde el auge de la informática en los últimos años, son pieza clave del desarrollo tecnológico.

La simulación hoy en día se concibe como una de las más importantes herramientas para analizar el diseño y operación de sistemas y procesos. Los modelos no pretenden arrojar resultados exactos de la realidad, pero si el modelo es el adecuado, las aproximaciones que realiza son útiles para el investigador.

## 2.2. MÉTODOS PARA ESTIMAR LAS EMISIONES

Entre las fuentes móviles, la mayor carga de contaminantes proviene de los vehículos automotores. La combustión interna en los vehículos produce entre 25 y 100 reacciones químicas<sup>31</sup>, que dan como resultado una gran variedad de contaminantes en diferentes concentraciones, que pueden variar hasta en un 300% de vehículo a vehículo, dependiendo del tipo de automotor, la tecnología del motor, la existencia de dispositivos de control de emisiones, la altitud, la temperatura, entre otras variables.

Además de las emisiones por la operación de los vehículos, la evaporación del combustible del motor emite contaminantes al aire que deben ser considerados en el estudio de la contaminación por vehículos. Otras fuentes de contaminación se deben al desgaste de los frenos y a las pérdidas de combustible por fugas en el almacenamiento de combustible.

Esta complejidad y variabilidad de las emisiones por vehículos automotores impide la existencia de factores de emisión estáticos y universales, por lo que se han tenido que desarrollar otros métodos para el cálculo de la emisión por vehículos.

Actualmente se usan en el mundo principalmente dos métodos para la obtención de los factores de emisión de vehículos automotores: la prueba del dinamómetro de chasis y la aplicación inversa de modelos de dispersión en condiciones controladas (túneles vehiculares y cañones urbanos).

---

<sup>31</sup> WARK, Kenneth y WARNER, Cecil. Contaminación del aire origen y control. México: Limusa, 2002. p. 539

### 2.2.1. Aplicación inversa de modelos de dispersión

La aplicación inversa de modelos de dispersión, utiliza un modelo de dispersión matemáticamente simple, en el que sea posible el cálculo de los factores de emisión a partir de los resultados de concentración obtenidos en las estaciones de medición.

En el mundo se han desarrollado diversos modelos de dispersión para situaciones especiales de vía, como son los túneles vehiculares (Ver Figura 2-1) y los cañones urbanos. Estos modelos tienen la particularidad de poder simular de forma puramente física el movimiento de los contaminantes, por medio de un balance de masas, y permitir así que se pueda despejar la variable emisión de las ecuaciones de dispersión.

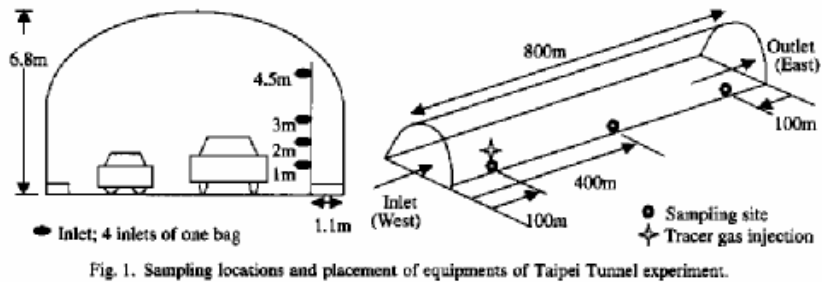


Figura 2-1: Ubicación de los receptores en un estudio de dispersión para un túnel urbano.

Fuente: Universidad de los Andes. Bogotá – Colombia 2002

Este tipo de metodologías para calcular los factores de emisión han sido utilizadas ampliamente en países como Suiza, Canadá, Francia, Argentina, etc. Presentan algunas ventajas frente al uso de pruebas de chasis dinamométrico, pues se obtienen emisiones reales generadas en las calles,

incluyen las emisiones por evaporación, y consideran un número más significativo de vehículos.<sup>32</sup>

El uso de esta metodología puede llegar a ser mucho más económica que el uso de dinamómetros de chasis, requiriendo únicamente realizar una o más campañas de medición en vías urbanas representativas del tráfico de la ciudad, con la configuración geométrica requerida.

### 2.2.2. Pruebas de dinamómetro de chasis y modelos de emisión

Este método determina las tasas básicas de emisión por medio de pruebas dinamométricas de chasis bajo ciertos ciclos de manejo. Luego, se aplica un modelo de emisión que modifique estas tasas básicas según las condiciones climáticas del lugar, las condiciones del tráfico vehicular y otras variables propias del sitio de determinación. Es el método más usado a nivel mundial para el cálculo de las emisiones vehiculares.

El principal inconveniente que presenta ésta metodología, es la baja muestra porcentual de vehículos que se prueban, principalmente por los costos que conlleva cada evaluación, tanto en equipos como en tiempo requerido. (Ver Figura 2-2).

---

<sup>32</sup> MANZI, Verónica. Selección y aplicación de una metodología para la estimación de los factores de emisión de las fuentes móviles vehiculares de la ciudad de Bogotá. En: Modelación de la Calidad del Aire a Escala Urbana (25 – 29 sep. 2003: Bogotá): Memorias. Bogotá: UNIANDES, 2003



*Figura 2-2: Prueba de chasis dinamométrico en Estados Unidos (FTP)*

*Fuente: Internet*

Además, las tasas básicas de emisión que se determinan con ésta metodología, pueden variar de forma importante entre diferentes regiones, principalmente porque los ciclos de manejo y el rendimiento de los motores cambian en cada país e incluso en diferentes zonas de un mismo país.

A pesar de estos inconvenientes, el uso de modelos de emisión con tasas básicas de emisión de otros países, se convierte en la mejor alternativa de estimación de las emisiones en muchas ciudades en las que no se cuenta con más recursos a la mano.

A nivel mundial se han desarrollado diferentes modelos de emisión con base a las pruebas de chasis dinamométrico, a continuación se exponen algunos de los principales modelos.

### 2.2.2.1 COPERT III<sup>33</sup>

El COPERT es un modelo de emisiones vehiculares desarrollado por la Agencia Ambiental Europea (EEA) y la Universidad de Thessaloniki (Grecia), basado en el resultado del proyecto COST 319 y las metodologías MEET en Europa. Su fin principal es ser la herramienta básica para la estimación de emisiones vehiculares, en todos los inventarios de emisiones que se realicen en el continente europeo, en el marco del programa CORINAIR.

Fue desarrollado principalmente para calcular emisiones a mesoescala (áreas de varios cientos de kilómetros) durante un año, aunque puede usarse con buena precisión para calcular emisiones en áreas de 1 Km<sup>2</sup> en periodos de 1 hora.

El modelo clasifica los vehículos según los estándares europeos (EURO 1, 2, etc.). Cada uno de estos estándares define la tecnología utilizada en los motores, en los equipos de disminución de emisiones y los combustibles. Al combinar la clasificación por tecnología con la clasificación por tipo de vehículo (bus, automóvil, etc.) se obtienen más de 100 tipos de categorías. La degradación de los vehículos según el uso también se rige por los estándares europeos.

Entre las particularidades de éste modelo, se encuentra la gran variedad de contaminantes que puede modelar, incluyendo una gran lista de tipos de VOCs. Además calcula por separado las emisiones vehiculares por operación, arranque en frío y evaporación; y según el tipo de manejo: urbano, rural o suburbano.

---

<sup>33</sup> NTZIACHRISTOS, Leonidas y SAMARAS, Zisis. COPERT III Computer programme to calculate emissions from road transport - User's manual (Version 2.1). [en línea] Copenhagen (Dinamarca): EEA, 2000. <http://vergina.eng.auth.gr>.

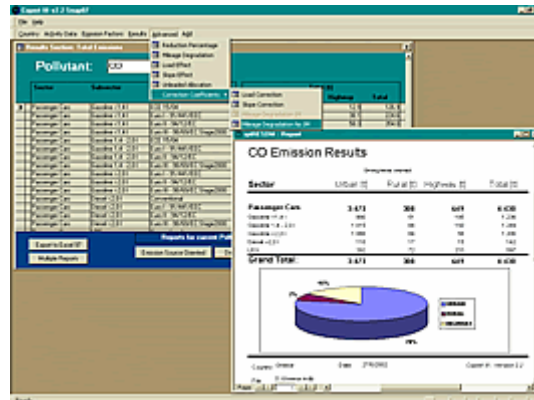


Figura 2-3: Interfaz gráfica del modelo COPERT III

Fuente: Internet

Las emisiones por evaporación se calculan para tres situaciones: para el vehículo en reposo, para el tiempo que permanece el motor caliente luego de apagado el carro (hot soak time) y mientras el vehículo está en funcionamiento.

a. Datos de entrada para COPERT III:

- Datos de los combustibles:
  - Consumo regional de gasolina y diesel
  - Composición química de la gasolina y diesel
  - Volatilidad de los combustibles (RVP)
- Datos de actividad vehicular:
  - Distribución de la flota vehicular en los estándares de la legislación europea (Pre - EURO, EURO I, EURO II, etc.)
  - Millas anuales recorridas por tipo de vehículo y por tipo de vía.
  - Tecnología utilizada para el control de emisiones y evaporación
  - Porcentaje de vehículos con inyección de gasolina
- Datos locales de tipo de manejo:

- Velocidad promedio por tipo de vehículo y de vía
- Distancia promedio de viaje.
- Datos geográficos y ambientales locales:
  - Máxima y mínima temperatura ambiente mensual
  - País de la Unión Europea en el que se llevará a cabo el análisis

b. Aplicaciones y validación:

- Europa

El modelo ha sido utilizado prácticamente en todos los países de la Unión Europea, principalmente en Alemania y Francia, que son los países más avanzados en materia de calidad del aire. En Italia fue utilizada la metodología CORINAIR y el modelo COPERT III para evaluar las estrategias de disminución de emisiones en la zona de Naples con muy buenos resultados, combinando el modelo con un sistema de información geográfica.<sup>34</sup>

Otros países han desarrollado sus propios modelos de emisión con base a la metodología europea de estimación de emisiones (MEET) y el modelo COPERT. Este es el caso de Suecia, donde se ha desarrollado el MIMOSA, un modelo apoyado por un sistema de modelamiento del flujo de tráfico y validado con mediciones locales de contaminantes. Con el MIMOSA se obtienen distribuciones más complejas de la velocidad vehicular en comparación con el COPERT III.<sup>35</sup>

---

<sup>34</sup> BARONE, G. y otros. Evaluation of the impact of emission reduction strategies in the Naples area. [en línea] Italia. 2001. [http://people.web.psi.ch/keller\\_j/kj.html](http://people.web.psi.ch/keller_j/kj.html)

<sup>35</sup> LEWYCKYJ N. y otros. MIMOSA: the coupling of a road emission model with a traffic flow model. [en línea] Göteborg (Suecia). 2002. <http://www.validationworkshop.ivl.se>

- Santiago de Chile<sup>36</sup>

La determinación de la carga de contaminantes por causa de la actividad vehicular en Santiago de Chile, se realizó combinando mediciones de chasis dinamométrico bajo ciclos de conducción locales y el modelo COPERT II (versión anterior al COPERT III). Para los vehículos livianos se usó el chasis dinamométrico en una muestra de 134 vehículos, con 14 ciclos de conducción diferentes, y para los vehículos pesados y motocicletas se usaron los factores de emisión incorporados con el COPERT II ante la imposibilidad de hacer mediciones con ciclos locales.

Para poder realizar el inventario de emisiones de toda la ciudad, se extendieron los factores de emisión obtenidos para los ciclos de conducción locales y los factores base del modelo COPERT, por medio del modelo integral de tráfico ESTRAUS, permitiendo simular el comportamiento vehicular en el periodo de un año.

- Bogotá (Colombia)<sup>37</sup>

Actualmente se está desarrollando un proyecto de modelación de la calidad del aire a escala urbana en ésta ciudad, en el que se utiliza el modelo COPERT III en la determinación de los factores de emisión para los vehículos automotores. Aunque actualmente se están utilizando los factores bases que provee el modelo bajo las condiciones de conducción europeas, se espera que en los próximos meses se puedan modificar éstos factores base, por los que resulten de la aplicación inversa de un modelo de dispersión a nivel local.

---

<sup>36</sup> OSSES Mauricio y otros. Modelo de emisión de contaminantes atmosféricos producidos por transporte urbano: el caso de Santiago de Chile. En: Ciencia Abierta [en línea]. Vol.15, 1997. <http://cabierta.uchile.cl>.

<sup>37</sup> ZARATE, Erika. Modelación de la calidad del aire para Bogotá. En: Modelación de la Calidad del Aire a Escala Urbana (25 – 29 sep. 2003: Bogotá); Memorias. Bogotá: UNIANDES, 2003

#### 2.2.2.2. MOBILE<sup>38</sup>

La serie de modelos MOBILE ha sido desarrollada en Estados Unidos por la Environment Protection Agency (EPA) para el cálculo de los factores de emisión en vehículos automotores, a partir de los resultados de las pruebas estándar nacionales de chasis dinamométrico (FTP y SFTP).

En su última versión, MOBILE6, se han complementado los factores de emisión base con mediciones en campo o “reales”. Actualmente la EPA trabaja en el desarrollo de una nueva generación de modelos de emisión (modelos MOVES), que permitan modelar la repercusión de las emisiones en el “efecto invernadero” y otros escenarios, a escala global

El MOBILE6 permite modelar todos los principales contaminantes emitidos por los vehículos (CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, HC), incluyendo un módulo especial para el material particulado y para los VOCs tóxicos. Estos contaminantes pueden provenir de diferentes tipos de emisiones relacionadas con la operación vehicular. En la Tabla 2-1 se describen los tipos de emisión considerados y los contaminantes relacionados con éstos.

---

<sup>38</sup> OTAQ. User's Guide to Mobile 6.1 and Mobile 6.2. Mobile Source Emission Factor Model [en línea] USA: EPA. 2002. <http://www.epa.gov/otaq>

TIPOS DE EMISIONES				
Número	Fuente	Descripción	Contaminantes*	Clases Vehiculares**
1	Running	Emisiones de escapes en el recorrido	Todos excepto ECARBON y GASPM	Todas
2	Start	Emisiones de escape por arranque (inicio del viaje)	HC, CO, NO	LD, MC
3	Hot Soak	Emisiones evaporativas por detenciones	HC, BENZ, MTBE	Gasolina, incluyendo MC
4	Diurnal	Emisiones evaporativas en el día, por el aumento de la temperatura	HC, BENZ, MTBE	Gasolina, incluyendo MC
5	Resting	Perdidas evaporativas por derramamientos y goteos	HC, BENZ, MTBE	Gasolina, incluyendo MC
6	Run Loss	Perdidas evaporativas en el recorrido	HC, BENZ, MTBE	Gasolina, sin incluir MC
7	Crankcase	Emisiones evaporativas en el cárter	HC, BENZ, MTBE	Gasolina, incluyendo MC
8	Refueling	Emisiones evaporativas por retanqueo.	HC, BENZ, MTBE	Gasolina, sin incluir MC
9	Brake wear	Material particulado de los frenos	Restos de frenos	Todas
10	Tire Wear	Material particulado de las llantas	Restos de llantas	Todas

\*ECARBON: Carbono Elemental, GASPM: Carbono total, HC: Hidrocarburos, BENZ: Benceno, MTBE: Methyl Tertiary Butyl Ether

\*\*LD: Vehículos ligeros, MC: Motocicletas

*Tabla 2-1: Tipos de emisión en vehículos automotores considerados por el Mobile6*

*Fuente: US EPA. User's Guide for Mobile6. 2001*

El modelo tiene como objetivos principales: 1) servir como herramienta para el desarrollo de inventarios de emisiones para los diferentes estados americanos y sus planes de implementación (SIPs), y 2) estimar las

emisiones que alimentan los diversos modelos de dispersión de la EPA. Fue diseñado para determinar emisiones a escala regional, pero puede llegar a usarse en estudios que abarquen desde países completos hasta simples intersecciones vehiculares.

Los datos de entrada, sobre todo las variables del tráfico vehicular, se basan en los formatos de información de las agencias estatales de los Estados Unidos, pero si el Estado norteamericano no cuenta con la información, se puede apoyar en los promedios nacionales.

a. Datos de entrada para el MOBILE6:

- Datos temporales y espaciales del sitio de estudio:
  - Año y mes de evaluación
  - Altitud
- Datos de la flota vehicular
  - Clasificación en 28 clases vehiculares según el tamaño del vehículo y el tipo de motor (gasolina o diesel).
  - Permite modelar vehículos que usen gas natural, pero si se cuenta con los factores de emisión bases.
  - Distribución anual del parque automotor circulante por categorías.
- Datos de actividad vehicular
  - Fracción del VMT (millas recorridas por vehículo) por tipo de vía, por clase de vehículo, por hora del día y por velocidad promedio.
  - Acumulación anual del kilometraje por categoría de vehículo.
- Datos para el cálculo de las emisiones por evaporación
  - Número de arrancadas del motor por hora del día
  - Tiempo que el motor permanece caliente entre arrancadas (soak time)

- Datos de los combustibles utilizados:
  - Volatilidad (RVP)
  - Contenido de oxígeno y azufre
- Datos atmosféricos locales
  - Temperatura horaria promedio
  - Humedad absoluta (diaria promedio) o relativa (horaria):
  - Nubosidad promedio y periodo de mayor brillo solar:
  - Hora promedio de salida y puesta de sol:
- Otros datos locales
  - Porcentaje de uso del aire acondicionado
  - Efecto de la legislación norteamericana
  - Incidencia del programa de inspección y mantenimiento (I/M)

#### b. Aplicaciones y validación

- Estados Unidos

La EPA ha exigido a todos los Estados (excepto a California que ha desarrollado su propio plan, con un modelo de emisión propio) el desarrollo de planes de implementación estatales (SIPs), que pongan en marcha el uso de herramientas de modelación de la calidad del aire.

Para este fin brinda herramientas de modelamiento de emisiones de vehículos como el MOBILE y una gran variedad de modelos de dispersión. El deseo de la EPA es que todos los Estados cuenten con inventarios actualizados de emisiones, tanto para fuentes fijas como móviles, y puedan implementar estrategias efectivas para el control de los niveles de polución.

Para que los inventarios de emisión vehiculares sean representativos de las condiciones reales, la EPA sugiere que cada Estado proporcione datos locales sobre la actividad vehicular y el parque automotor. Aunque la EPA

proporciona promedios nacionales de estas variables, insiste en que cada Estado use datos locales para obtener resultados más acertados.

Se han realizado numerosos estudios en los Estados Unidos dirigidos a validar este modelo. Según un estudio en Clark County (Nevada) basado en el uso de sensores remotos, el MOBILE6 refleja adecuadamente la emisión de contaminantes, excepto de CO el cual puede estar sobrestimado en el modelo.<sup>39</sup>

Estudios realizados en túneles de autopistas de varios Estados, arrojaron resultados similares, observándose una clara sobrestimación en los factores de emisión para vehículos viejos y una subestimación para vehículos nuevos.<sup>40</sup> (Ver Figura 2-4)



*Figura 2-4: Validación del modelo MOBILE6 usando túneles de autopistas*  
*Fuente: ENVIRON. MOBILE6 Validation Studies. San Diego, California. Abril de 2003*

---

<sup>39</sup> KUHNS Hampden y otros. Remote sensing of gaseous and particle emissions from onroad vehicles in Clark County, Nevada. [en línea]. 2002. <http://www.co.clark.nv.us>

<sup>40</sup> ENVIRON International Corporation y Pollack Allison K. MOBILE6 Validation Studies. [en línea] San Diego (USA). 2003. <http://www.epa.gov>

- México<sup>41</sup>

Para poder elaborar el programa de inventarios de emisiones en Ciudad de México, se desarrolló el MOBILE5 – MEXICO, en el que se incorporan los resultados de las pruebas de chasis dinamométrico específicas de este país a los factores de emisión base del modelo original.

El MOBILE5 – MEXICO puede ser usado en cualquier parte de México en el que se presenten las conducciones típicas de manejo, para este fin se dividió al país en cinco regiones con flotas vehiculares diferentes y se elaboraron factores de emisión base (BERs) para cada una de las regiones.

- Colombia

El MOBILE5 ha sido usado en numerosas ocasiones para determinar los factores de emisión vehiculares en varias ciudades colombianas. Ante la ausencia de valores locales para los factores de emisión base, se han usado los valores estadounidenses incorporados en el modelo. En ciudades como Bucaramanga, se ha usado este modelo para el estudio de intersecciones<sup>42</sup>

Para tratar de disminuir las imprecisiones que conlleva el uso de factores de emisión base sin validar en el país, se ha utilizado en ciudades como Bogotá el MOBILE5 – MEXICO para la modelación de emisiones en vías troncales. Se considera que este modelo representa de manera más acertada las condiciones del parque automotor bogotano y sus condiciones de altitud.

---

<sup>41</sup> ERG y RADIAN INTERNATIONAL. MOBILE5-MEXICO Documentation and User's Guide. [en línea]. México. 2000. <http://www.epa.gov>

<sup>42</sup> AMAYA, Manuel y MARTÍN, Andrés. Evaluación de tres modelos de dispersión Gaussiana para la simulación de contaminación por monóxido de carbono en Bucaramanga. Bucaramanga. 1998

### 2.2.2.3 PART 5<sup>43</sup>

Este modelo calcula los factores de emisión para material particulado y óxido de azufre, tanto de vehículos diesel como a gasolina, incluyendo emisiones por operación del vehículo, gasto de los frenos y las llantas y el polvo de las vías.

Este programa es consistente con el modelo MOBILE5, el cual no calcula material particulado ni óxidos de azufre, aunque el uso del PART5 no es recomendado fuera de los Estados Unidos por la imposibilidad de adoptar el modelo a las condiciones locales.<sup>44</sup>

#### a. Datos de entrada para el PART5

Los datos que requiere el modelo son muy similares a los del MOBILE5, incluyendo:

- Fracción del VMT por tipo de vehículo
- Ratas de acumulación de kilometraje por tipo de vehículo
- Distribución del registro vehicular por tipo de vehículo
- Influencia de un programa de I/M
- Composición de los combustibles
- Datos meteorológicos locales

#### b. Aplicaciones y validación

---

<sup>43</sup> OTAQ. Draft user's guide to PART5: a program for calculating particle emissions from motor vehicles. [en línea]. USA: EPA. 1995. <http://www.epa.gov>

<sup>44</sup> RADIAN INTERNACIONAL LLC. Mexico emissions inventory program manuals. [en línea] Mexico: 1997. <http://www.ine.gob.mx>

- Estados Unidos

El modelo PART5 no ha tenido importantes aplicaciones por fuera de los Estados Unidos, debido a la dificultad que tienen los factores base de emisión de material particulado para adaptarse a las condiciones locales.

El modelo ha sido validado en varias zonas de los Estados Unidos, por medio de sensores remotos,<sup>45</sup> y por comparación con estaciones de monitoreo en áreas cercanas a carreteras. Los resultados han sido aceptables (errores cercanos al 50%).

#### 2.2.2.4 IVE (INTERNATIONAL VEHICLE EMISSION MODEL)<sup>46</sup>

Este modelo ha sido desarrollado en Estados Unidos por la Universidad de California de Riverside y su Centro de Investigación Ambiental y Tecnología (CE-CERT), en conjunto con la EPA. Ha sido desarrollado especialmente para ser utilizado en países en vías de desarrollo, en los que existen condiciones de tráfico y tecnología vehicular diferentes a los de los países en desarrollo.

Para poder ser utilizado en países en desarrollo, cuenta con una base de datos muy amplia y flexible de tecnologías vehiculares, que cubre más de 300 categorías de vehículos, distribuidas por edad, tamaño del motor, tecnología de control de emisiones y de alimentación de combustible.

Además, cuenta con unos valores por defecto de factores de emisión básicos provenientes de países que provean esta información (Estados Unidos, la

---

<sup>45</sup> KUHNS Hampden y otros. Op. cit.

<sup>46</sup> GSSR, EPA y CE-CERT. International Vehicle Emission Model. (Brochure). 2003

Unión Europea y Japón), que pueden ser modificados cuando se cuente con esta información a nivel local.

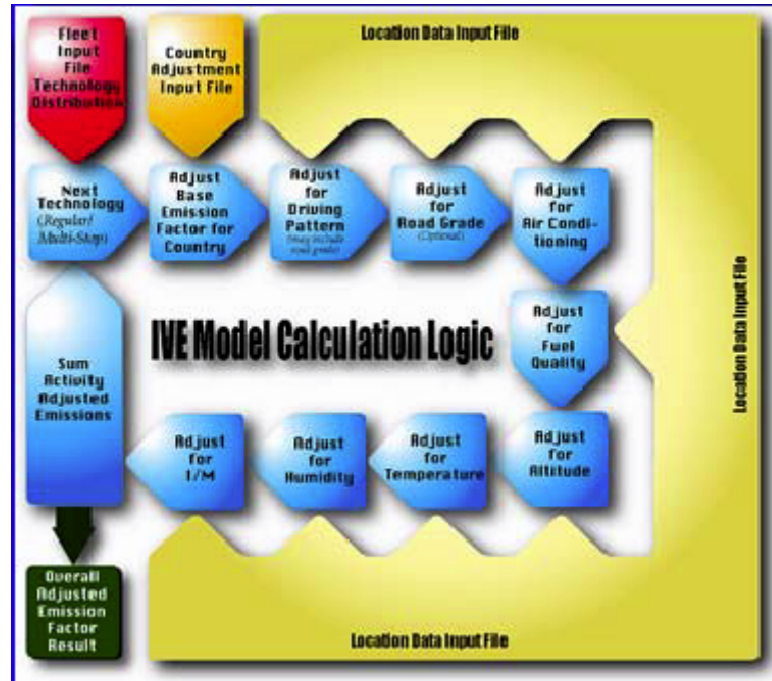


Figura 2-5: Mapa conceptual del funcionamiento del modelo IVE

Fuente: IVE Model. Palm Springs. Mayo de 2003

El modelo permite realizar estimativos de emisiones a nivel de proyecto, y a escala regional y nacional, incluyendo para este último fin un módulo para gases causantes del efecto invernadero. Los contaminantes que permite modelar son los siguientes: CO, VOC, NO<sub>x</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, Benceno, plomo, 1,3 butadieno, y aldehídos.

a. Datos de entrada para el IVE

- Datos de la flota vehicular: (Fleet File)
  - Tasas básicas de emisión locales para los diferentes tipos de contaminantes (si no existen se pueden usar los que trae por defecto)

- Distribución vehicular por año, servicio prestado y tecnología (300 categorías)
- Proporción de vehículos con aire acondicionado.
- Datos de condiciones locales: (Location File)
  - Fecha de la modelación
  - Altitud sobre el nivel del mar
  - Tipo de programa de inspección y mantenimiento (I/M) que se está llevando a cabo
  - Características químicas de los combustibles
  - Porcentaje de humedad y temperatura promedio
  - Número de veces que se enciende el motor en una hora.
  - Velocidad promedio de circulación
  - Matriz de patrones de manejo (demanda de poder de motor por unidad de masa del vehículo)

b. Aplicaciones y validación.

El IVE se encuentra aún en un proceso de validación internacional, aunque ya se han adelantado estudios en Los Angeles, Nairobi (Kenia), Pune (India) y Santiago de Chile, que han arrojado muy buenos resultados.

- Pune (India)<sup>47</sup>

Aunque aún no se han publicado resultados de la validación del modelo en Pune, el modelo ha demostrado ser lo suficientemente flexible como para adaptarse a las condiciones de ésta ciudad india, en la cual se presenta una muy compleja diversidad de vehículos automotores y de configuración vial.

---

<sup>47</sup> UNIVERSITY OF CALIFORNIA AT RIVERSIDE y GSSR. Pune Vehicle Activity Study. [en línea] USA. 2003. <http://www.gssr.net/ive>

La metodología empleada en Pune fue diseñada para las condiciones de las ciudades en desarrollo, por lo que se utilizó al mínimo la información suministrada por la agencias gubernamentales, que usualmente tiene graves deficiencias, y en cambio se realizaron extensas mediciones de campo para determinar las variables del modelo.

Para determinar la distribución de la flota en las diferentes categorías por tecnología, se realizaron conteos vehiculares con cámaras de video y revisiones en los parqueaderos cercanos a la zona de estudio. Los patrones de manejo se determinaron con estudios de GPS en una muestra vehicular y dispositivos eléctricos para determinar el número de veces que es prendido el motor.

Una de las características más importantes del modelo es su capacidad de adaptarse a los más diversos aspectos de la flota vehicular. Por ejemplo en el caso de Pune, el modelo estuvo en capacidad de modelar las emisiones para vehículos de servicio público de tres ruedas, conocidos como moto-taxis o tuktuks (Ver Figura 2-6), los cuales son típicos de los países asiáticos.



*Figura 2-6: Vehículo de tres ruedas que es posible de modelar con el IVE*

*Fuente: Internet*

#### 2.2.2.5. CMEM (COMPREHENSIVE MODAL EMISSIONS MODEL)<sup>48</sup>

Este modelo fue desarrollado por el CE-CERT de la Universidad de California con el objetivo de contar con una herramienta que reflejara acertadamente las emisiones de un vehículo en particular, en función de su modo de operación. El modelo es capaz de calcular segundo a segundo las emisiones de escape y el consumo de gasolina de un vehículo bajo determinado modo de operación, para una gran variedad de tipos y tecnologías de vehículos.

Este modelo se elaboró con el fin de obtener las emisiones detalladas que se presentan para situaciones específicas a microescala, como por ejemplo un cruce semaforizado, una rampa de acceso o un parqueadero. Los valores bases de emisión fueron obtenidos en numerosas pruebas de chasis dinamométrico, con una muestra de vehículos seleccionada según la contribución de cada categoría a las emisiones totales.

##### a. Datos de entrada para el CMEM

- Parámetros específicos de los vehículos: peso, máximo torque, máxima potencia, entre otras.
- Parámetros de operación: inclinación de la vía, velocidad promedio, humedad relativa, entre otras.
- Parámetros de los combustibles, de los sistemas de control de emisiones, de los contaminantes, etc.

Este modelo puede llegar a ser bastante preciso, pues examina más detalladamente las emisiones vehiculares en cada determinado modo de operación del vehículo, pero a la vez requiere de una gran cantidad de

---

<sup>48</sup> CE - CERT. Comprehensive modal emissions model (CMEM) - User's Guide. [en línea]. USA: CE-CERT, 2000. <http://www.cert.ucr.edu>

variables específicas, por lo que este modelo es de utilidad únicamente para situaciones muy precisas y controladas, en el que se puedan determinar todas las variables necesarias. En la Tabla 2-2 se enumeran las diversas variables que intervienen en el modelo.

MODEL EMISSIONS MODEL PARAMETERS AND VARIABLES		
Readily-Available Parameters	Calibrated Parameters	
<p><i>Specific Vehicle Parameters</i></p> <p>M - vehicle mass in lbs.  V - engine displacement in liters  Idle – idle speed of engine  Trlhp - coastdown power in hp  S - eng spd./veh spd. in rpm/mph  Q<sub>m</sub> - max torque in ft.lbs  N<sub>m</sub> - eng spd. in rpm @ Q<sub>m</sub>  P<sub>max</sub> - max power in hp  N<sub>p</sub> - eng spd. in rpm @ P<sub>max</sub>  N<sub>g</sub> - number of gears</p> <p><i>Generic Vehicle Parameters</i></p> <p>η - indicated efficiency  ε<sub>1</sub> - max. drivetrain eff.  R(L) - gear ratio</p> <p><i>Operating Variables</i></p> <p>θ - road grade  P<sub>acc</sub> – accessory power in hp  v - speed trace in mph  T<sub>soak</sub> – soak time (min)  SH – specific humidity (grains H<sub>2</sub>O/lb.)</p>	<p><i>(Insensitive)</i></p> <p><i>Fuel Parameters</i></p> <p>k<sub>0</sub> - eng. fri. factor in kJ/(lit.rev)  ε<sub>1</sub>, ε<sub>3</sub> - drivetrain eff. coefficients</p> <p><i>Engine-out</i></p> <p><i>Emission Parameters</i></p> <p>C<sub>0</sub> - CO enrich. coef.  a<sub>CO</sub> - EO CO index coef.  a<sub>HC</sub> - EO HC index coef.  r<sub>HC</sub> - EO HC residual value  a<sub>1NOx</sub> - NO<sub>x</sub> stoich index  a<sub>2NOx</sub> - NO<sub>x</sub> enrich index  FR<sub>NO1</sub>, FR<sub>NO2</sub> - NO<sub>x</sub>FR threshold</p> <p><i>Enleanment Parameters</i></p> <p>hc<sub>max</sub> - max. HC<sub>lean</sub> rate in g/s  hc<sub>trans</sub> - trans. HC<sub>lean</sub> rate in g/SP  δSP<sub>th</sub> - HC<sub>lean</sub> threshold value  r<sub>h</sub> – HC<sub>lean</sub> release rate in 1/s  r<sub>O2</sub> - ratio of O<sub>2</sub> and EHC  φ<sub>min</sub> – lean fuel/air equ. ratio</p> <p><i>Soak-time Parameters</i></p> <p>C<sub>soak_CO</sub>, C<sub>soak_HC</sub>, C<sub>soak_NO</sub>– soak time engine coef. for CO, HC, NO<sub>x</sub>  α<sub>soak_CO</sub>, α<sub>soak_HC</sub>, α<sub>soak_NO</sub>– soak time Cat. coef. for CO, HC, NO<sub>x</sub></p>	<p><i>(Sensitive)</i></p> <p><i>Cold-Start Parameters</i></p> <p>β<sub>CO</sub>, β<sub>HC</sub>, β<sub>NOx</sub> - cold start catalyst coefficients for CO, HC, and NO<sub>x</sub> respectively  φ<sub>cold</sub> - cold F/A equi. ratio  T<sub>d</sub> - surrogate temp reach stoich  CS<sub>HC</sub> - cold EO HC multiplier  CS<sub>NO</sub> - cold EO NO multiplier</p> <p><i>Hot Catalyst Parameters</i></p> <p>Γ<sub>CO</sub>, Γ<sub>HC</sub>, Γ<sub>NOx</sub> - hot max CO, HC, and NO<sub>x</sub> catalyst efficiencies  b<sub>CO</sub>, b<sub>HC</sub>, b<sub>NO</sub> - hot Cat CO, HC, and NO<sub>x</sub> coefficient  c<sub>CO</sub>, c<sub>HC</sub>, c<sub>NO</sub> - hot cat CO, HC and NO<sub>x</sub> coefficient  id - NO<sub>x</sub> Cat tip-in coefficient</p> <p><i>Enrichment Parameters</i></p> <p>φ<sub>0</sub> - max F/A equi. ratio  P<sub>scale</sub> – SP threshold factor</p>

Tabla 2-2: Lista de variables que intervienen en el CMEM y deben ser proveídas por el usuario.

Fuente: CMEM User's Guide

### 2.3. ESTIMACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE CONTAMINANTES POR FUENTES MÓVILES EN UN ÁREA DETERMINADA

La mejor forma de calcular la concentración de un contaminante en el aire, en un sitio determinado, es medir directamente esta concentración con equipos especializados. La información obtenida de esta manera se puede asumir como cierta, pues los equipos de medición actuales arrojan resultados inmediatos con un mínimo de error. Pero la medición puntual de contaminantes no es suficiente para estimar el grado de contaminación de una zona en particular.

Los datos obtenidos por una estación de medición de contaminantes, varían en el tiempo, pero no en el espacio, por lo que se obtendrán siempre resultados de concentraciones puntuales y poco significativas de las condiciones a varios metros a la redonda. Para poder obtener datos “confiables” en una zona determinada se debe contar con una red lo suficientemente densa de medidores.

Una Red de Monitoreo Ambiental es un sistema de equipos de medidores de contaminantes, distribuidos en una zona determinada, que trabajan en conjunto para evaluar las condiciones de calidad del aire en la zona. Este es el primer paso en el estudio de las condiciones de contaminación de una zona en particular y permite identificar las zonas más críticas y los períodos de mayor carga de polución, pero no pretende predecir la concentración de un determinado contaminante en cualquier punto del dominio.

El elevado costo que tiene el instalar y mantener una estación de medición de contaminantes, no permite contar con la densidad de estaciones que se necesita para representar las muy variables concentraciones de polución en una ciudad. Es por eso que se hace necesario usar modelos que simulen las

diferentes variables del problema y permitan predecir con algún grado de confiabilidad, la contaminación en todo el dominio del estudio.

Un modelo de dispersión del aire, predice el transporte de los contaminantes emitidos a través del tiempo y el espacio. Según la escala de la zona de estudio, el modelo puede basarse en distribuciones estadísticas (para estudios a microescala) o representar las reacciones químicas que ocurren en la atmósfera (estudios a mesoescala).

Un estudio a mesoescala comprende zonas de varios cientos de kilómetros, en el que debe utilizarse un modelo fotoquímico para el cálculo de las concentraciones, pues en el dominio ocurren reacciones de los contaminantes con el ambiente, como es la formación y destrucción de ozono y peroxiacetilnitrato (PAN). Este tipo de modelos deben utilizarse en estudios regionales o de ciudades. En la Figura 2-7 se puede apreciar la zona de estudio a mesoescala de la Sabana de Bogotá. El dominio del estudio es de 45.000 Km<sup>2</sup>, por lo que la ciudad de Bogotá comprende solo una pequeña fracción.

Para el estudio de la dispersión a escalas menores, se pueden utilizar modelos menos complejos que asuman que no ha existido el suficiente tiempo de interacción entre los contaminantes, la atmósfera y la luz solar, como para que ocurra la formación de contaminantes secundarios.

Los modelos más utilizados para este tipo de situaciones, están basados en la distribución de Gauss, por lo que son denominados modelos gaussianos. Se considera que los modelos gaussianos son exactos a distancias menores de 50 Km. de la fuente.<sup>49</sup>

---

<sup>49</sup>CEPIS/OPS. Conceptos básicos sobre meteorología de la contaminación del aire. [en línea] <http://www.cepis.ops-oms.org>. Lección 6.

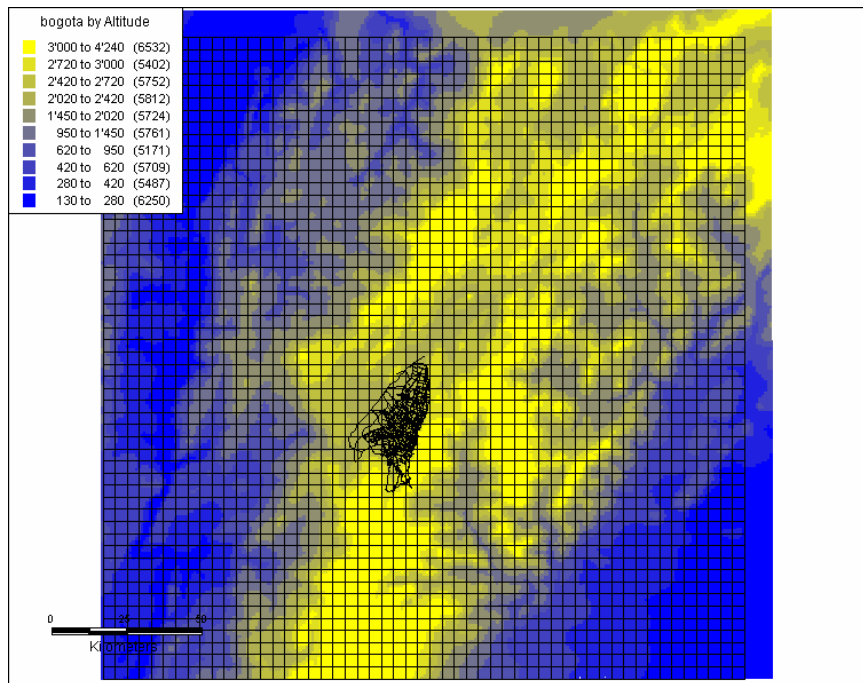


Figura 2-7: Estudio a mesoescala de la contaminación en Bogotá y sus alrededores.  
 Fuente: UNIANDES-SPFL. Modelación de la calidad del aire para Bogotá. Agosto de 2003

### 2.3.1. Modelos de dispersión Gaussiana para fuentes móviles

#### 2.3.1.1. CALINE<sup>50</sup> / CAL3QHC<sup>51</sup>

La EPA y el Departamento de Transporte de California (CALTRANS) han desarrollado una gran variedad de modelos gaussianos de dispersión de contaminantes, según el tipo de fuente de emisión, las condiciones del terreno, la escala y el período de modelación. Para fuentes móviles, han desarrollado una familia de modelos de dispersión en constante evolución,

<sup>50</sup> CALTRANS Y UC DAVIS. User's Guide for CL4. [en línea] USA: CALTRANS y UC DAVIS, 1998. <http://aqp.engr.ucdavis.edu>

<sup>51</sup>OTAQ. User's Guide to CAL3QHC Version 2.0. [en línea]. USA: EPA. 1995. <http://www.epa.gov>

cuyas últimas versiones son el CALINE4 y CAL3QHC, este último modelo especializado en intersecciones vehiculares.

Estos modelos permiten predecir el comportamiento de contaminantes primarios no reactivos, como el monóxido de carbono y el material particulado. El CAL3QHC fue desarrollado a partir del modelo CALINE3, el cual no permitía modelar intersecciones vehiculares. El CALINE4 fue desarrollado posteriormente y se le añadió una opción para modelar intersecciones, pero este último modelo no reemplazó al CAL3QHC.

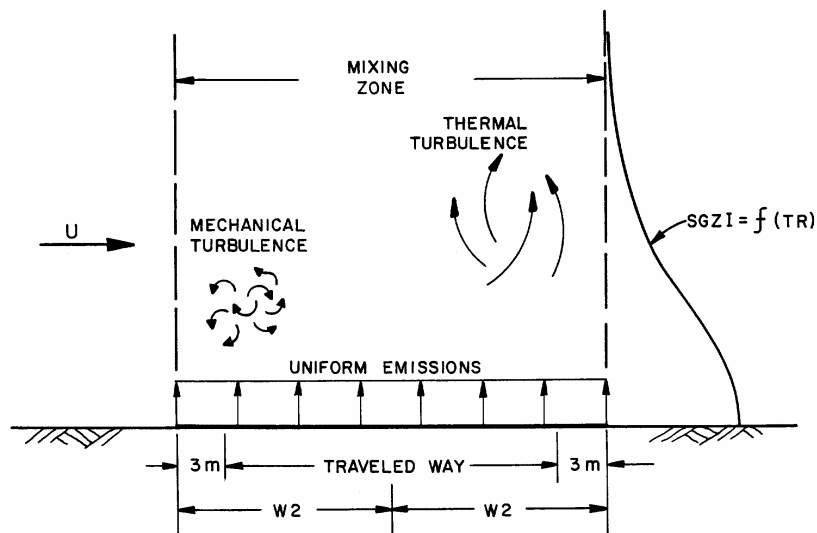


Figura 2-8: Representación gráfica de la dispersión en la zona de mezcla del modelo CALINE4

Fuente: CALINE4 User's Guide.

a. Datos de entrada para el CALINE4 y CAL3QHC:

- Datos generales:
  - Tiempo promedio a modelar
  - Coeficiente de rugosidad superficial
  - Velocidad de asentamiento y de deposición.

- Datos de los receptores:
  - Coordenadas y altura relativa.
- Datos de los tramos a flujo libre:
  - Tipo de vía
  - Geometría del tramo
  - Ancho de la zona de mezcla
  - Volumen en vehículos equivalentes
  - Factor de emisión por tramo.
- Datos de los tramos con cola vehicular:
  - Número de carriles
  - Ciclo del semáforo
  - Volumen en vehículos equivalentes
  - Factor de emisión en reposo y en movimiento
  - Rata de flujo de saturación
  - Tipo de semáforo
- Datos meteorológicos
  - Dirección y velocidad del viento
  - Estabilidad atmosférica
  - Altura de la zona de mezcla
  - Concentración de fondo de los contaminantes

#### b. Aplicaciones y validación

- Estados Unidos

El CAL3QHC Y CALINE4 son los modelos recomendados por la EPA para el cálculo de la dispersión de contaminantes en las zonas cercanas a autopistas y arterias en los Estados Unidos. La relativa simplicidad de los modelos y sus aceptables resultados lo convierten en una herramienta útil y confiable.

En los Estados Unidos se han llevado a cabo diversos estudios dirigidos a validar estos modelos de dispersión, así como a analizar su sensibilidad. Los principales experimentos para calibrar el CALINE3, se realizaron en la “Highway 99”, desde diciembre de 1981 hasta Marzo de 1982, en California. Los resultados fueron satisfactorios, con una tendencia del modelo a subestimar las altas concentraciones y a sobrestimar las bajas.<sup>52</sup>

En 1992 se realizó en Nueva York una evaluación para ocho intersecciones semaforizadas, utilizando tanto el CALINE4 como el CAL3QHC. Los factores de emisión fueron calculados usando el MOBILE5. Los resultados fueron muy similares para ambos modelos gaussianos, arrojando resultados conservadores de concentración para CO y NOx.<sup>53</sup> Según indican algunos estudios el modelo no puede estimar totalmente la dispersión vertical de la pluma para condiciones de vientos calmos o nulos, por lo que tiende a sobrestimar la concentración de CO en las zonas cercanas a vías de alto tráfico.<sup>54</sup>

- Inglaterra

En Inglaterra se han adelantado estudios comparativos sobre la validez del CALINE4 en este país. En un estudio adelantado por la CERC (Cambridge Environmental Research Consultants Ltd.) se compararon los resultados del CALINE4 con los del modelo desarrollado por esta empresa consultora, el ADMS-Roads, usando los datos recopilados en el experimento de la ‘Highway 99’ en California. El modelo ADMS mostró una ligera mejor correlación.<sup>55</sup>

---

<sup>52</sup> CERC. Comparison of ADMS-Roads, CALINE4 and UK DMRB Model Predictions for Roads. [en línea]. Italia. 2001. <http://www.cerc.co.uk>

<sup>53</sup> PATEL Irfan. Sensitivity Analysis, Evaluation and Design of Graphical User Interface of CAL3QHC Road Intersection Model. [en línea]. USA. 2001. <http://www.utoledo.edu/~aprg/theses/theses.html>

<sup>54</sup> YU MENG. A New Statistical Framework for Estimating Carbon Monoxide Impacts at Intersections. [en línea]. USA: University of California Davis, 1998. <http://aqp.engr.ucdavis.edu>

<sup>55</sup> CERC. Op. cit

- Colombia

En Colombia los modelos de dispersión de la EPA han sido muy utilizados, incluyendo las diferentes versiones de la familia CALINE en la evaluación de la contaminación para vías importantes e intersecciones, pero usualmente no se validan los datos calculados por los modelos.

En Bucaramanga se estudió la validez de tres modelos de dispersión, entre ellos el CALINE4, este último demostró arrojar resultados acertados y ser de fácil utilización, en comparación a los otros dos (HIWAY y PAL). Este estudio se realizó para una intercambiador vial de tres niveles, comparando los datos con varias estaciones cercanas.<sup>56</sup>

#### 2.3.1.2. ADMS Urban / ADMS Roads<sup>57</sup>

La familia de modelos ADMS ha sido desarrollada en Inglaterra por la CERC, como una alternativa británica a los modelos estadounidenses utilizados en el país. Los modelos ADMS – Urban y ADMS – Roads cuentan con numerosas herramientas de visualización y una opciones de integración con sistemas SIG.

La principal desventaja del modelo es que no es gratuito, ni es posible tener acceso a su código fuente. El costo de la licencia por año es de 1850 libras esterlinas. Este modelo ha sido utilizado no solo en Inglaterra, sino también en países como China e India con buenos resultados.

---

<sup>56</sup> AMAYA Manuel y MARTÍN Andrés. Op. cit.

<sup>57</sup> CERC Web Site. <http://www.cerc.co.uk>. Septiembre de 2003

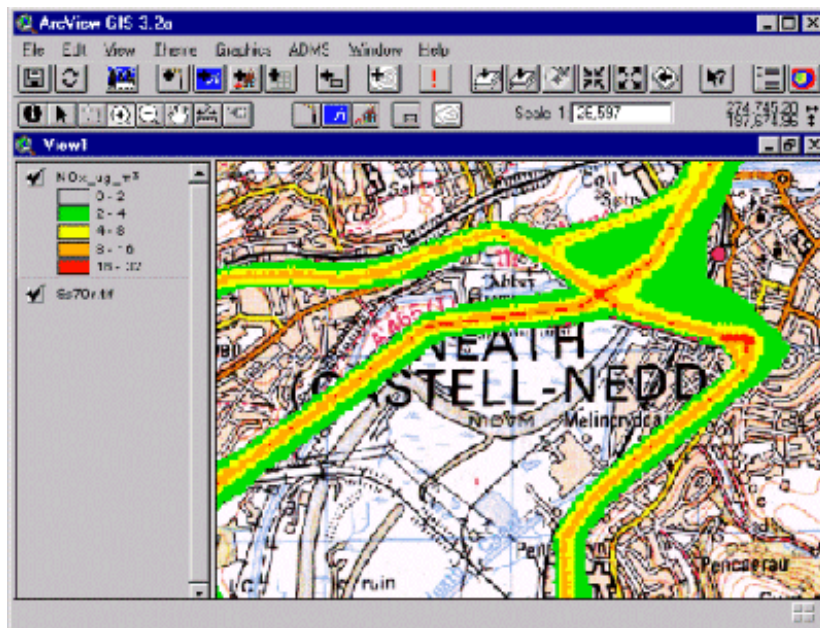


Figura 2-9: Integración del modelo ADMS – Roads con un SIG

Fuente: CERC Web Site (<http://www.cerc.co.uk>)

### 2.3.1.3. Otros modelos Gaussianos

#### a. Modelos Europeos

Varios países de la Comunidad Europea, auspiciados por la EEA, han desarrollado modelos de dispersión gaussiana para modelar las emisiones de los vehículos automotores en sus regiones. La información sobre estos modelos no es muy amplia, pero parecen haber arrojado buenos resultados en los países en que fueron desarrollados. En la Tabla 2-3 se describen algunas características de cuatro de éstos modelos.

Nombre	CARSMOG	CAR-FMI	ROADAIR	CONTILINK
Institución que lo desarrolló	RIVM, TNO (Holanda)	FMI (Finlandia)	NILU (Noruega)	NILU (Noruega)
Aplicación del modelo	Fuentes móviles	Fuentes móviles	Fuentes móviles	Fuentes móviles
Tipo de modelo	Relaciones semi-empíricas con base a túneles de viento y mediciones de campo	Fuente de líneas finitas, parcialmente gaussiano	Fuente de líneas finitas, gaussiano	Fuente de líneas finitas, gaussiano
Dominio	Local	Local	Local	Local
Periodo simulación	Horario promedio	Horario	Horario	Horario
Meteorología	Valores horarios	Valores horarios	Peor escenario en 1 hora	Viento y estabilidad

*Tabla 2-3: Comparación básica de modelos gaussianos europeos para fuentes móviles*  
Fuente: EEA. *Ambient air quality, pollutant dispersion and transport models. Appendix A5*

#### b. HIWAY2 Y PAL2.1<sup>58</sup>

Estos dos modelos gaussianos fueron evaluados en Bucaramanga, en conjunto con el CALINE4, para comparar cual de ellos era más aplicable a las condiciones locales. Ambos modelos son avalados por la División de Modelación Atmosférica de la EPA para modelar la dispersión por fuentes móviles. Otro modelo también reconocido por la EPA es el ROADWAY, aunque no existe mucha información sobre este último.

El HIWAY2 fue diseñado para estimar concentraciones en distancias menores a 100 metros en grandes avenidas. Se aplica para estaciones receptoras en dirección del viento en carreteras a nivel, en terrenos no muy complejos y sin grandes obstrucciones, como edificios o árboles altos.

<sup>58</sup> AMAYA Manuel y Andrés Forero. Op. cit.

El PAL 2.1 es un algoritmo multifuente para dispersión atmosférica, que permite modelar fuentes lineales, puntuales, curvas o de área. Se utiliza para calcular el impacto en la calidad del aire de obras como complejos industriales, parqueaderos, aeropuertos, estadios, etc.

### c. Otros modelos americanos

Paralelamente a los modelos desarrollados por la EPA, y especialmente a la familia CALINE, en otros estados de los Estados Unidos se han desarrollado otros modelos que reflejen de mejor manera las condiciones locales. La mayoría de estos modelos fueron desarrollados en los años ochentas y han tenido muy poco uso por fuera de los estados que los elaboraron.

Además, un estudio de la EPA, basado en bases de datos de Nueva York, determinó que el CALINE requiere menos variables de entrada y arroja resultados más acertados.<sup>59</sup> Se enumeran algunos de los principales modelos:

- IMM: Intersection Middle-block Model (California)
- GIM: Georgia Intersection Model (Georgia)
- TEXIN2: Texas Intersection Version 2 (Texas)

### 2.3.2. Modelos para cañones urbanos (Street Canyons)

La modelación de Cañones de Vía se presenta como una alternativa que ha cobrado fuerza en la realización de estudios de contaminación del aire, el cual involucra los efectos topográficos, geométricos y de microclima que

---

<sup>59</sup>YU MENG. Op. cit.

sumados a las altas densidades vehiculares, favorecen al incremento de las concentraciones de los diferentes contaminantes.

Un Cañón urbano, es una vía que posee una configuración geométrica similar a la de un cañón natural, es decir presenta unas paredes altas a los dos lados, que para nuestro caso estarían conformadas por los edificios, situación que genera condiciones pobres de dispersión, características de las zonas céntricas de las ciudades.



*Figura 2-10: Ejemplo de un cañón urbano en Bogotá (Colombia)*

*Fuente: CIIA UNIANDES. Aplicación inversa de un modelo de dispersión – Bogotá. 2003*

#### 2.3.2.1. Geometría de los Cañones de vía

Las principales características de los cañones son altura (H), longitud (L) y ancho (W) de las cuales se derivan las siguientes relaciones y sus correspondientes clasificaciones. En la Tabla 2-4 se describe la clasificación del cañón en función de su geometría:

Relación	Condición	Clasificación
H / W	= 1	Regular
H / W	< 0.5	Avenida
H / W	= 2	Profundo
L / H	= 3	Corto
L / H	= 5	Medio
L / H	= 7	Largo

Tabla 2-4: Clasificación Geométrica de los Cañones de Vía

Fuente: VARDOULAKIS Sotiris, 2002. *Modeling Air Quality in Street Canyons: a review*

Los cañones también se pueden clasificar en función de la distribución de los edificios a los costados de la vía, en simétricos o asimétricos. Para estos últimos existe una clasificación adicional con base en la dirección del viento (cañones paso arriba o paso abajo según el caso) Estas situaciones se pueden observar en la Figura 2-11.

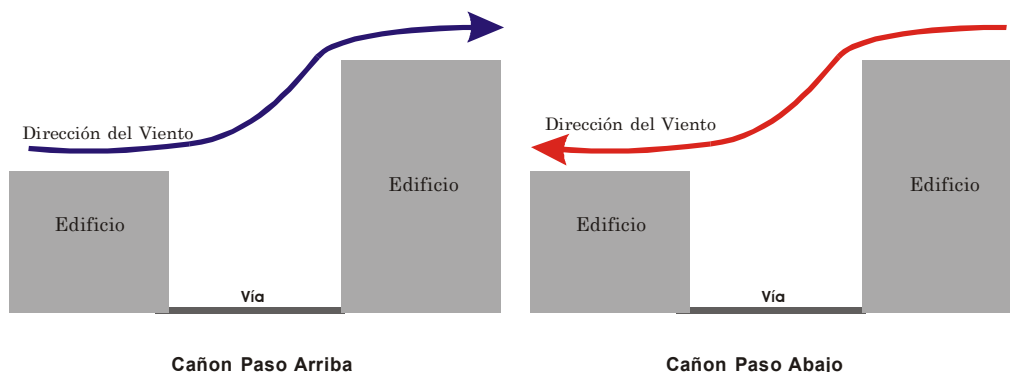


Figura 2-11: Clasificación Geométrica de un Street Canyon

Fuente: Autores

### 2.3.2.2. El Viento

Uno de los factores que intervienen en la circulación de los contaminantes es el viento, el cual está controlado por los efectos micro meteorológicos en lugar que por las fuerzas que se presentan a mesoescala, las cuales

controlan los cambios en la capa límite<sup>60</sup>. Este flujo se puede clasificar en paralelo, perpendicular o suave dependiendo de su velocidad y dirección.

La mayor parte de las investigaciones realizadas a la fecha han sido orientadas a conocer los efectos que generan los flujos de viento perpendiculares a los ejes de las vías, ya que para estos flujos se crean unos vórtices dentro del cañón, que son los responsables en gran parte de la circulación interna y de cuya fuerza depende la velocidad del flujo, la turbulencia mecánica (árboles, balcones, vehículos en movimiento etc.), las condiciones de estabilidad atmosférica y el calentamiento diferencial de las superficies<sup>61</sup>.

#### 2.3.2.3 Dispersión de Contaminantes

La dispersión de contaminantes gaseosos depende fundamentalmente de la tasa a la cual se intercambia aire vertical y horizontalmente con los límites del cañón<sup>62</sup>. En este proceso juegan un papel muy importante el régimen del viento y las condiciones de ventilación ya que por ejemplo para un flujo perpendicular al eje de la vía, con velocidad alta ( $V > 1.5$ ) la remoción de contaminantes es inefectiva.

Los vórtices inducidos por el flujo de viento dentro del cañón influyen en gran parte en el proceso de dispersión, ya que como se mencionó anteriormente son los responsables junto a la turbulencia mecánica y al calentamiento

---

<sup>60</sup> HUNTER, L.J., JONSON, G.T. y WATSON, I.D. A Investigation of three dimensional characteristics of flow regimes within the urban canyon. (1992).

<sup>61</sup> KIM, J. y BAIK, J. Urban street canyons flow with bottom heating. (2001).

<sup>62</sup> RAIN, C.M.N., FISHER, B., MARTIN, C.J. y LITTLER, J. Flow field and pollutand dispersion in a central London street. (1998).

diferencial, de la circulación interna. Su fuerza, varía constantemente y como resultado de esto se produce un vaciado periódico de los contaminantes.<sup>63</sup>

Muchos experimentos se han desarrollado para conocer el comportamiento de los contaminantes en los cañones bajo diferentes configuraciones. Por ejemplo en cañones largos se llegó a la conclusión de que las concentraciones máximas se alcanzan para flujos paralelos, ya que en este caso son más importantes el número de fuentes que la ventilación producida (vórtice)<sup>64</sup>.

#### 2.3.2.4. Modelos para Cañones urbanos

La modelación se presenta como una alternativa muy valiosa, que día a día adquiere mayor fuerza en el medio para la realización de estudios de dispersión en cañones urbanos, ya que permite incluir suficientes parámetros para conocer su incidencia y de esta forma realizar una mejor comprensión del problema.

Los modelos comúnmente usados se clasifican según sus principios físicos y matemáticos en: Gaussianos, Box, CFD, y de escala reducida, y de acuerdo al nivel de complejidad en: numéricos, semi-empíricos y de monitoreo.

##### a. Modelos Gaussianos

(Caline4, AirViro, ADMS-Urban, CAR, Hiway-2 etc.)

---

<sup>63</sup> SINI, J., ANQUETIN, S. y MESTAYER, P.G. Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons. (1996).

<sup>64</sup> VARDOULAKIS, S., GONZÁLEZ-FLESCA, N. y FISHER, B.E.A. Assessment of traffic-related air pollution in two Street canyons in Paris: implication for exposure studies. (2002)

Este tipo de modelos son un conjunto de ecuaciones que describen la concentración de contaminantes en un punto dado, para esto asumen que las concentraciones son proporcionales a las ratas de emisión e inversamente proporcionales a la velocidad del viento.

También asumen que las partículas no reaccionan químicamente situación valida para los cañones ya que debido a las distancias cortas entre las fuentes y los receptores el tiempo disponible para que sucedan estas reacciones es muy corto, por lo que muchas de las especies emitidas se pueden considerar químicamente estables.

Este tipo de modelo es orientado hacia las fuentes ya que se fundamenta en una mejor estimación de las emisiones y de los parámetros meteorológicos para realizar las predicciones de las concentraciones.

#### b. Computational Fluid Dynamics CFD (Phoenics, Miskam Fluent)

Este tipo de modelos se caracterizan por ser capaces de modelar situaciones complejas en las que se involucren fenómenos como la transferencia de calor, mediante la implementación de métodos numéricos en la solución de las ecuaciones que gobiernan el flujo, las cuales se derivan de los principios básicos del transporte y la conservación (conservación de masa, conservación de momentum y la ecuación de transporte de los contaminantes)

### c. Modelos a Escala Reducida (Modelos Físicos)

Estos modelos se fundamentan en el principio de la similitud, el cual se refiere a que se pueden modelar condiciones reales reduciendo su escala geométrica y ajustando los parámetros de referencia como la velocidad. Para la implementación de esta técnica es necesario contar con túneles de viento o tanques de agua, limitando su uso a la disponibilidad económica. Por lo general esta técnica es muy usada en la validación de otros tipos de modelo.

## 2.4. SELECCIÓN DE LOS MODELOS

Los modelos que se van a seleccionar, deben permitir determinar las concentraciones de contaminantes bajo las condiciones actuales y permitir proyectar la situación a futuro, para diferentes condiciones atmosféricas, flujos de tráfico y emisión.

Por el alcance a pequeña escala del estudio se piensa utilizar un modelo gaussiano para determinar concentraciones de contaminantes no reactivos, tales como el monóxido de carbono (CO) y el material particulado (PM<sub>10</sub>)

La determinación de la emisión de los vehículos circulantes es una variable compleja que requiere del uso de un modelo propio, que debe ser compatible con los criterios del modelo de dispersión. Es por eso importante que ambos modelos provengan de una misma fuente o al menos hayan sido desarrollados bajo una misma escuela de estudio del aire.

Otras variables que se tienen en cuenta para seleccionar los modelos, son la accesibilidad que se tiene al software y la documentación de apoyo, la

adaptabilidad a las condiciones locales, la posibilidad de obtener los datos de entrada en el ámbito local y la facilidad de uso, sin que esto implique la aplicación de un modelo de muy baja aproximación.

Se revisó el estado del arte en modelación del aire en Colombia y el mundo, encontrándose que los modelos europeos y estadounidenses son los más utilizados y de más fácil acceso.<sup>65</sup> Con esto se determinaron tres grupos de modelos a evaluar.

#### 2.4.1. COPERT III + Modelo europeo de dispersión

El desarrollo del estudio de la calidad del aire en europea ha seguido un plan de investigación muy uniforme y coherente. Todos los estudios de contaminación atmosférica en el viejo continente se basan en la metodología CORINAIR, la cual establece unos parámetros de clasificación vehicular y de contaminantes.

Un uso adecuado del COPERT III en la obtención de los factores de emisión debe estar ligado a ésta metodología y supone el uso casi obligado de un modelo gaussiano desarrollado en Europa o bajo los estándares europeos. A diferencia de los Estados Unidos, la comunidad europea no ha desarrollado un modelo de dispersión general, sino que cada país desarrolla modelos de calidad del aire adaptados a sus condiciones locales.

El problema de estos modelos de calidad del aire europeos es el poco acceso que se tiene a su documentación y la poca flexibilidad bajo condiciones diferentes a las de su país de origen. Una excepción es el

---

<sup>65</sup> Se conoce de modelos japoneses y asiáticos utilizados con buenos resultados en el lejano oriente, pero no fue posible tener acceso a la información por los medios de consulta usuales.

modelo ADMS en sus versiones Urban y Roads, con el problema de no ser un programa gratuito y de poca utilización en países en vías de desarrollo.

#### 2.4.2. MOBILE + Modelo de la EPA

La Environment Protection Agency (EPA) en los Estados Unidos mantiene un control sobre la calidad del aire de los diferentes Estados de la unión, con la notable excepción de California. La agencia ha desarrollado sus propios modelos de emisión y dispersión, recomendando el uso de éstos modelos.

El modelo de emisión bandera de la EPA ha sido desde los años 80 el MOBILE en sus diferentes versiones. Es un modelo de fácil uso, adaptado a la clasificación vehicular de los Estados Unidos, a sus vías y a la información del tráfico existente en las oficinas locales de tránsito. El hecho de ser un modelo gratuito, ampliamente documentado y de fácil uso, ha hecho de éste modelo uno de los más usados en el mundo y sobre todo en Latinoamérica.

Para calcular la dispersión, la EPA ha desarrollado en conjunto con universidades y grupos de investigación independientes, un gran número de modelos de calidad del aire, cada uno de ellos para condiciones diferentes de circulación, uso del suelo, etc. Los modelos que recomienda la EPA para usar en los estudios de diagnóstico atmosférico en vías e intersecciones son todos aquellos pertenecientes a la familia CALINE.

El uso del CALINE también está muy difundido en el mundo y ha demostrado adaptarse a las condiciones locales en Bucaramanga mejor que otros modelos de la EPA. Este modelo es de muy fácil uso y requiere pocas variables de entrada, además ha sido ampliamente validado y documentado. La versión CAL3QHC permite modelar intersecciones semaforizadas.

### 2.4.3. IVE + Modelo de la EPA

El IVE (Modelo de emisiones internacional) ha sido creado por la EPA en conjunto con el CE-CERT con el fin de ser usado en países en vías de desarrollo. Incorpora varias opciones que lo hacen más flexible a las tecnologías de otros países y sus factores de emisión base provienen de pruebas en los Estados Unidos, Europa y Asia.

La EPA recomienda el uso de éste modelo en países en vías de desarrollo, en reemplazo del MOBILE, pues este último va dirigido especialmente a la modelación de las emisiones dentro de las fronteras de los Estados Unidos. El IVE puede ser empleado fácilmente para alimentar cualquier modelo de dispersión de la EPA que se adapte a las condiciones locales.

### 2.4.4. Selección

De acuerdo a lo expuesto en las secciones anteriores, para el desarrollo de este proyecto se decide utilizar la combinación:

#### **I.V.E. + CAL3QHC**

Estos modelos ofrecen las mejores condiciones de adaptabilidad a las condiciones locales y cumplen de mejor manera los requerimientos de accesibilidad, adaptabilidad y facilidad de uso.

### 3. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

#### 3.1. ALCANCES DEL PROYECTO

El objetivo de este proyecto es realizar un análisis comparativo de la calidad del aire en la ciudad de Bucaramanga, entre las condiciones actuales y las que resulten de la implementación del S.I.T.M. (Sistema Integral de Transporte Masivo) denominado METROLÍNEA, en un tramo seleccionado de la Carrera 15.

Para poder realizar éste proyecto se adelantó una revisión completa del estado del arte local y mundial, para la determinación de la calidad del aire, y la simulación de condiciones de contaminación futuras. Para realizar estas determinaciones se hace necesario el uso de modelos de calidad del aire.

Se plantearon los siguientes lineamientos iniciales de investigación:

- Analizar el tramo de la Carrera 15 entre el Bulevar Santander y el Intercambiador la Puerta del Sol. Este corredor albergará parte de la primera troncal del sistema METROLÍNEA.
- Analizar la concentración de monóxido de carbono (CO) y material particulado menor a 10 micras (PM10) en el aire. Estos contaminantes tienen la propiedad de no reaccionar en la atmósfera para formar nuevos contaminantes, por lo que se denominan no reactivos. Además, provienen de procesos de combustión diferentes, pues el CO es característico de los

vehículos con motor a gasolina, mientras que el PM10 se produce principalmente en los motores diesel.

- Utilizar un modelo gaussiano de dispersión, pues la escala del proyecto (una vía arterial) permite el uso de modelos de este tipo con aceptable precisión.
- Alimentar el modelo de dispersión con factores de emisión obtenidos con la aplicación de un modelo de emisión, que permita considerar variables locales.
- Comparar los resultados del modelo con las mediciones de la estación de monitoreo de la CDMB, con el fin de poder caracterizar los resultados arrojados por la modelación
- Simular el funcionamiento del SITM bajo los parámetros geométricos y de señalización actuales y modificar los volúmenes de circulación para el funcionamiento del sistema, a partir de las condiciones actuales.
- Considerar las diferentes alternativas de combustible planteadas para el sistema METROLÍNEA en la simulación de emisiones y dispersión
- Caracterizar tecnológicamente la flota vehicular que circula por la zona, desde el punto de vista de las emisiones por gases de escape.
- Plantear una metodología para el estudio de contaminación en vías urbanas y a escalas similares, usando modelos de dispersión gaussiana, con una descripción de las variables necesarias y su forma de obtención.

- Poder valorar desde el punto de vista de la contaminación del aire las implicaciones que traería el funcionamiento de un SITM en la ciudad, bajo las condiciones actuales.
- Exponer en esta monografía los fundamentos de la modelación de la calidad del aire, de manera que pueda ser usada como referencia en futuros estudios de contaminación atmosférica por fuentes móviles.

### 3.2. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

#### 3.2.1. Delimitación

El tramo seleccionado de la Carrera 15<sup>66</sup> comprende una longitud aproximada de 2.7 Km y limita al Norte con el Bulevar Santander y al Sur con la Calle 60. Las coordenadas de los puntos extremos están en la Tabla 3-1.

Punto	Este	Norte
Cra 15 / Bulevar Santander	1104799.21	1279650.69
Dig 15 / Calle 60	1106404.19	1277708.30

*Tabla 3-1: Coordenadas de los puntos extremos de la zona de estudio.*

*Fuente: Autores*

Además del corredor de la Carrera 15, se tuvieron en cuenta cinco de las principales intersecciones que cruzan esta vía. Estas intersecciones se caracterizan por encontrarse separadas a distancias similares y albergar altos volúmenes vehiculares que cruzan la vía de estudio.

---

<sup>66</sup> Siempre que se mencione a la Carrera 15, se hace referencia también a la Diagonal 15, a menos que se especifique algo diferente

Para cada una de estas intersecciones, se consideró en la modelación un tramo de aproximadamente 300 metros de las vías que cruzan la Carrera 15, pues se considera que hasta esa distancia los aportes de contaminantes de éstas vías pueden ser significativos en las zonas aledañas de la vía principal.<sup>67</sup>

Para poder caracterizar la concentración de contaminantes en las zonas más cercanas a las vías modeladas, se ubicaron receptores a distancias entre 5 y 100 metros de la Carrera 15 y de las calles que la cruzan en las intersecciones consideradas. El área total de estudio es de aproximadamente 0.9 Km<sup>2</sup>.

### 3.2.2. Descripción del corredor vial de la Carrera 15<sup>68</sup>

El corredor que se va a estudiar, es “una vía bidireccional perteneciente al sistema arterial longitudinal de doble calzada con separador central y calzada exclusiva para transporte público en el tramo comprendido entre la Avenida Quebrada Seca y la Calle 36”. La vía se caracteriza por permitir la movilización de un gran número de personas.

Entre la Avenida Quebrada Seca y la Calle 36, “se tienen tres carriles de circulación por sentido, con un ancho promedio en su extensión de 10.0 metros en una extensión de 579 metros. En este tramo los carriles presentan diferente tipo de funcionamiento, el carril derecho es utilizado como paradero de buses, el carril central es usado para maniobras de adelantamiento y el carril izquierdo para circulación en general.” Se debe recordar que en éste tramo solo circulan buses y busetas de servicio público.

---

<sup>67</sup> OTAQ. User's Guide to CAL3QHC Version 2.0. [en línea]. USA: EPA. 1995. <http://www.epa.gov>

<sup>68</sup> SIEMENS. Actualización, implementación y puesta en funcionamiento del planeamiento de tráfico en función del tiempo y del tráfico para la ciudad de Bucaramanga. Bucaramanga. 2002. Código: INFBU0301.301

Finalmente, “para el tramo comprendido entre la calle 36 y la calle 56 los tres carriles que existen son de uso mixto, con ancho promedio de 10.50 metros y buenas condiciones geométricas.”

Según estudios hechos por la Dirección de Tránsito de Bucaramanga, “las intersecciones alimentadoras en su gran mayoría reducen en forma considerable la capacidad de movilización del corredor en general, entre ellas se tiene el Bulevar Santander, la avenida Quebrada Seca, la calle 36, la calle 45, la avenida la Rosita, la calle 50 y la calle 56.”<sup>69</sup>

Otra característica del corredor, son las restricciones al flujo ocasionadas por los comportamientos inadecuados de conductores y peatones. “Desde el punto de vista operativo, el corredor presenta reducciones considerables en la movilidad debido a las maniobras de parada, ascenso y descenso de pasajeros, estacionamiento en los costados de la vía, y el cruce de peatones en cualquier lugar de la vía, siendo importante resaltar que existe infraestructura para cruzar la vía en forma segura.”



*Figura 3-1: Secuencia S-N Intersecciones Modeladas*

*Fuente: Autores*

---

<sup>69</sup> Para la modelación no se consideró la Avenida La Rosita por su cercanía con la Calle 50, donde se presenta un flujo más complejo. Además, los vehículos que ingresan a la Diagonal 15 por la Avenida La Rosita son considerados en la intersección de la Calle 50 pues no existen salidas del tráfico entre las dos intersecciones.

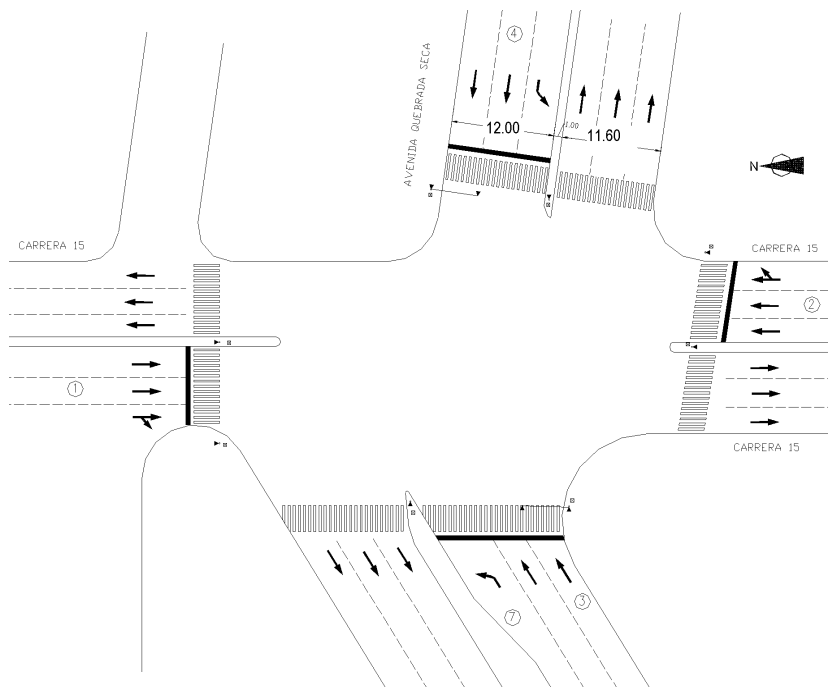
### 3.2.3. Intersecciones consideradas en la modelación

Los criterios para elegir las intersecciones viales que se iban a modelar fueron los siguientes, en orden de importancia:

1. Volumen de vehículos circulante en todos los sentidos.
2. Representación de las distintas flotas vehiculares y condiciones de circulación
3. Disponibilidad de información de volúmenes vehiculares horarios para autos, buses y camiones.

Cada una de estas intersecciones representa condiciones de circulación particulares y composiciones de tráfico distintas.

#### 3.2.3.1. Intersección Carrera 15 con Avenida Quebrada Seca



*Figura 3-2: Intersección de la Carrera 15 con la Avenida Quebrada Seca*

*Fuente: I&S/SBT. 2002*

La Avenida Quebrada Seca es “una vía bidireccional perteneciente a la red vial principal de doble calzada de circulación y separador central. Esta vía atraviesa el norte de la ciudad y une el oriente con el occidente y viceversa. Se caracteriza por las buenas especificaciones geométricas que presenta aunque el entorno urbano se encuentre en estado de deterioro.”

Esta intersección se caracteriza por un gran deterioro urbano, lo que origina que a pesar de la gran capacidad de movilización que tiene la Avenida Quebrada Seca la concentración en los deseos de viaje se vea desviada hacia otras vías.

### 3.2.3.2. Intersección Carrera 15 con Calle 36

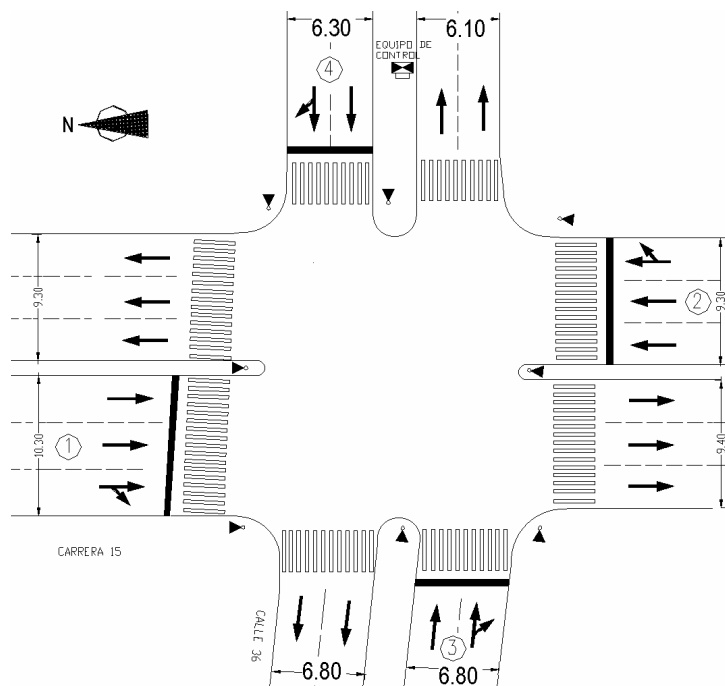


Figura 3-3: Intersección de la Carrera 15 con la Calle 36

Fuente: I&S/SBT. 2002

La Calle 36 (Ver Figura 3-3) se caracteriza por ser un “corredor bidireccional perteneciente a la red vial local de doble calzada de circulación y separador central. Esta vía atraviesa el centro de la ciudad y une el oriente con el occidente de la ciudad y viceversa.”

A continuación se presenta una descripción de las condiciones de circulación en el sector: “El corredor presenta reducciones considerables en la movilidad debido a la falta de infraestructura para estacionamientos, por tal motivo el parqueo en los costados de la vía, la invasión de carriles por parte del comercio informal y la reducción de la vía con pérdida de carriles ocasionada por los taxis que se estaciona en la carrera 15 sentido occidente-oriente y oriente-occidente.”

“Por otro lado la calle 36 presenta pérdida de tiempos de verde y se observan ciclos malogrados cuando los vehículos de transporte público tipo bus se atraviesan en la zona de conflicto, obstruyendo el flujo de tráfico. Por último, el corredor debe sacrificar el normal funcionamiento a la altura de la carrera 13 debido a que esta carrera soporta el desvío del transporte particular al no poder circular por la carrera 15.”

### 3.2.3.3. Intersección Carrera 15 con Calle 45

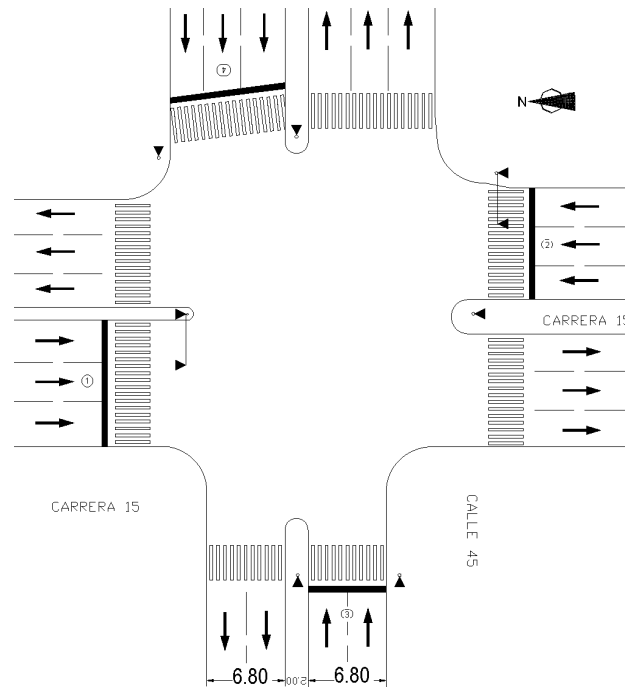


Figura 3-4: Intersección de la Carrera 15 con la Calle 45

Fuente: I&S/SBT. 2002

La Calle 45 (Ver Figura 3-4) es una vía que se caracteriza por tener un uso del suelo residencial y comercial. El tipo de cobertura es local y el carácter de uso es complementario.

“Desde el punto de vista operativo, el corredor presenta reducciones debido al estacionamiento en los costados de la vía, la presencia de comercio local, el sector informal y la indigencia.”

### 3.2.3.4. Intersección Carrera 15 con Calle 50 y Carrera 17

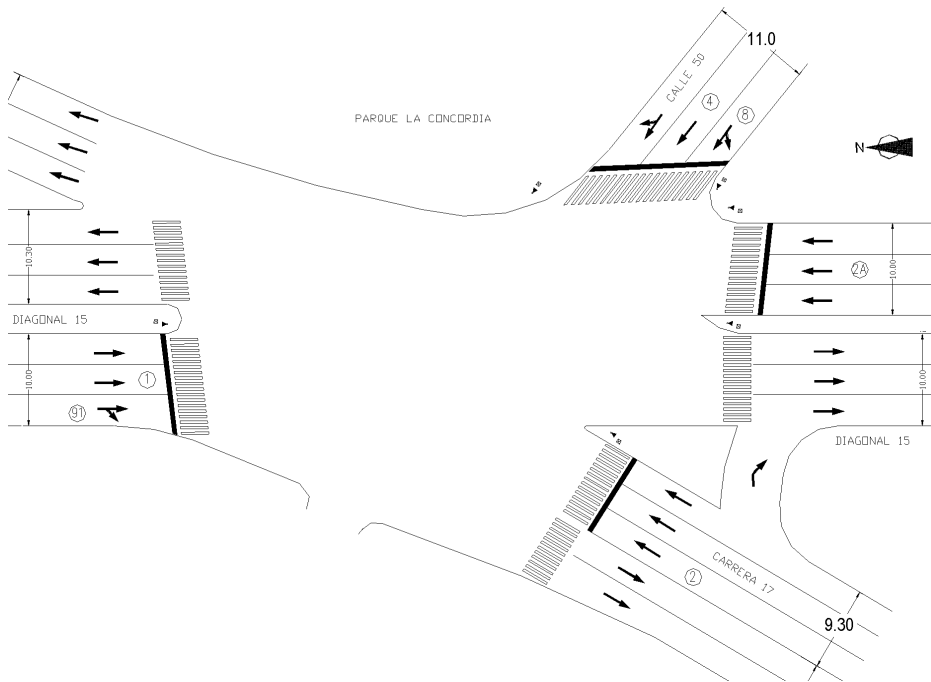


Figura 3-5: Intersección de la Carrera 15 con la Calle 50 y la Carrera 17

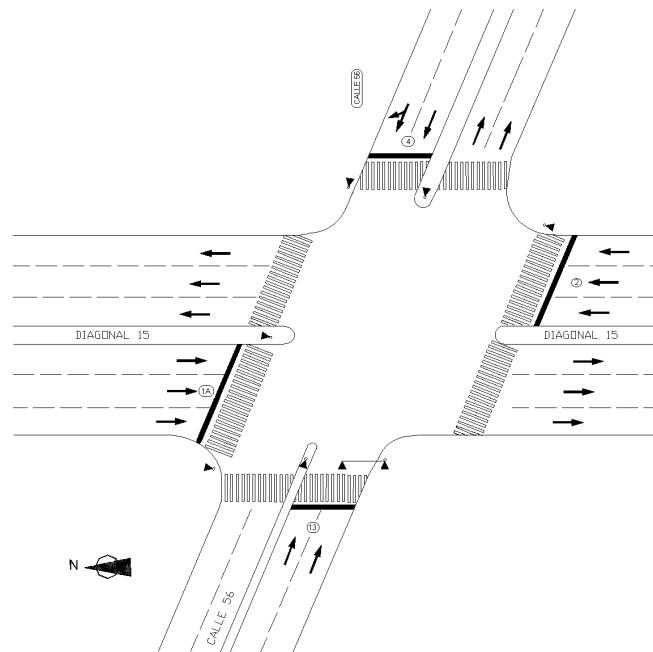
Fuente: I&S/SBT. 2002

La Carrera 17 (Ver Figura 3-5) “es una vía bidireccional perteneciente a la red vial local, con doble calzada de circulación sin separador central, esta caracterizada por ser la única vía de penetración para los habitantes del sector de la Ciudadela y el centro de la ciudad”

Los principales problemas que influyen en el tráfico de la esta intersección son “las maniobras de parada, ascenso y descenso de pasajeros, estacionamiento en los costados de la vía y el cruce de peatones en cualquier lugar de la vía”

“Por último, el corredor ve subordinada su capacidad de movilidad debido a la prelación que se le asigna a la carrera 15, razón por la cual en las horas de mayor confluencia vehicular presenta tendencia a la congestión.”

### 3.2.3.5. Intersección Carrera 15 con Calle 56



*Figura 3-6: Intersección de la Carrera 15 con la Calle 56*

*Fuente: I&S/SBT. 2002*

La intersección con la Calle 56 (Ver Figura 3-6) se caracteriza por ser una zona muy comercial, en la que se presentan continuas obstrucciones al tráfico por el parqueo indebido de automóviles particulares y taxis, el sector informal y la indigencia.

La Calle 56 es “una vía bidireccional perteneciente a la red vial local de doble calzada de circulación y separador central. Esta vía atraviesa el sur de la ciudad y une el oriente con el occidente de la ciudad y viceversa. Se caracteriza por ser el corredor transversal más importante de la ciudad.”

### 3.3. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

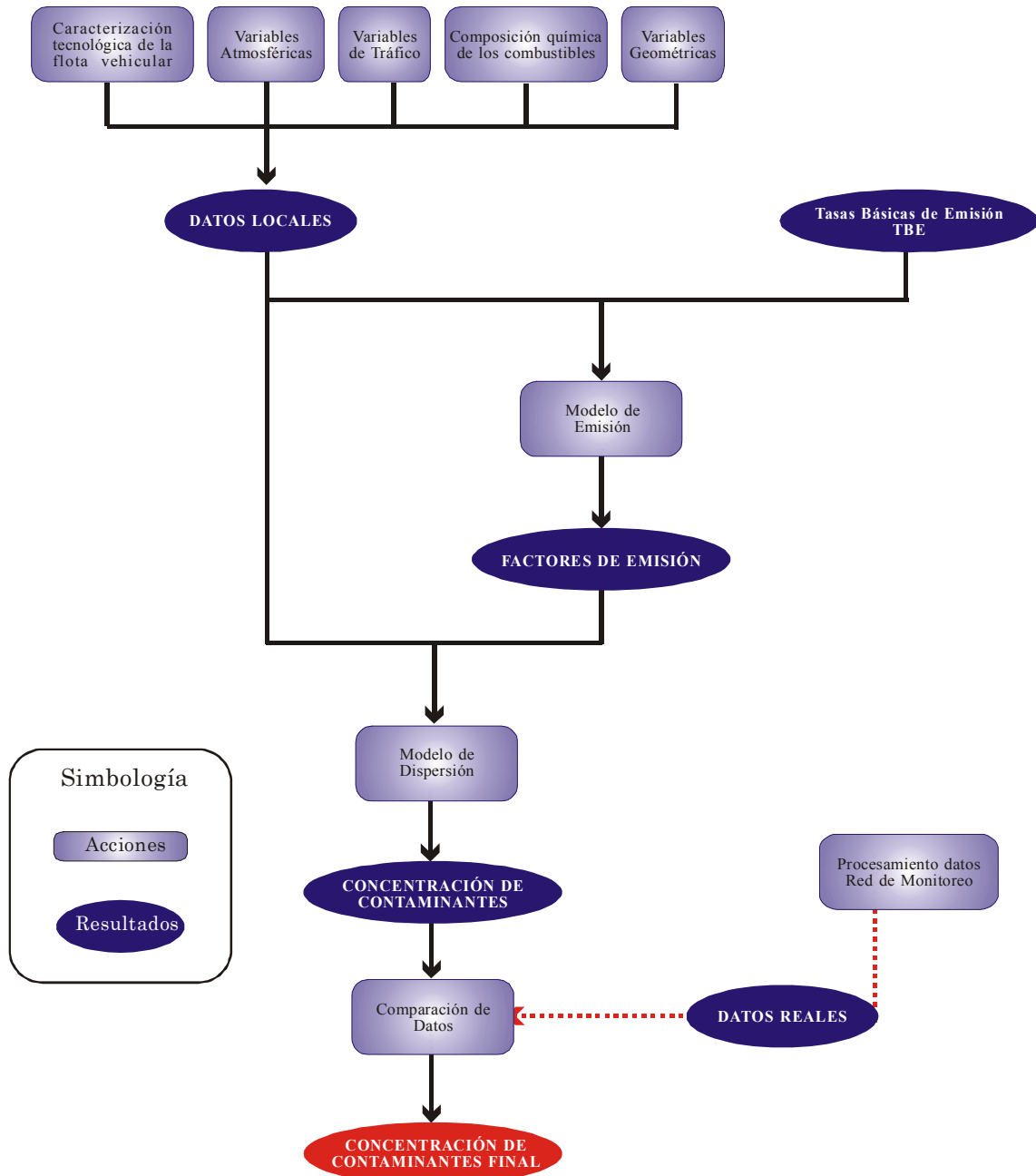


Figura 3-7: Diagrama de flujo descriptivo de la metodología utilizada en el proyecto

Fuente: Autores

La metodología planteada (Ver Figura 3-7) fue elaborada por los autores del proyecto, con base en estudios de calidad del aire realizados en todo el mundo, y adaptada a la disponibilidad de información existente en Bucaramanga y su zona Metropolitana.

Esta metodología es aplicable a cualquier estudio de calidad del aire a pequeña escala en ciudades similares a Bucaramanga, en las que se cuente con la información mínima referente al tráfico circulante (volúmenes, velocidades, composición, etc.), las condiciones atmosféricas, entre otros datos básicos. Para una información detallada sobre las variables de entrada a los modelos, se puede referir a los capítulos 4 y 5 de ésta misma monografía.

Para poder administrar el proceso de obtención de las diversas variables que requiere un estudio de éste tipo, se recomienda clasificar los datos de entrada, según su influencia en la precisión en los datos de salida.

En algunos casos los datos son absolutamente indispensables y deben obtenerse para generar incluso las estimaciones más preliminares. En otros casos, son útiles para refinar el modelado, a menudo reemplazando la información existente por omisión en la estructura del modelo con la información local.<sup>70</sup>

La importancia de la información necesaria para el desarrollo de un estudio ambiental, puede ser definida al agruparla en dos categorías: datos primarios y secundarios. Un estudio preliminar puede generarse solo con los datos primarios, sin embargo la adición de datos secundarios mejora sustancialmente el nivel de confianza de las estimaciones realizadas.

---

<sup>70</sup> RADIANT INTERNACIONAL LLC. Mexico emissions inventory program manuals. [en línea] Mexico: 1997. <http://www.ine.gob.mx>

### 3.3.1. Datos primarios

- Emisión

- Volúmenes Vehiculares horarios.
- Velocidad de marcha promedio horaria de la flota
- Distancia de las vías analizadas.
- Distribución tecnológica del parque vehicular.
- Condiciones locales de temperatura, humedad y altitud
- Tipo y composición de los combustibles empleados

- Dispersión

- Factores de emisión para los vehículos en circulación y en detención, suministrados por un modelo de emisión.
- Volúmenes vehiculares horarios.
- Rata de flujo de saturación y tipo de arribo en cada una de las intersecciones modeladas.
- Tipo de semáforo y el ciclo que realiza para cada hora.
- Altura de la fuente de emisión
- Características geométricas de cada una de las vías
- Coeficiente de rugosidad superficial obtenido según tablas.
- Concentración de fondo de la zona de estudio
- Datos meteorológicos horarios de velocidad y dirección del viento, y radiación solar recibida.
- Velocidad de asentamiento y deposición promedio obtenida según tablas.

### 3.3.2. Datos Secundarios

- Emisión
  - Patrones de Actividad vehicular, ver sección 4.2.4.2.1
  - Distribución de los tiempos entre encendidos del motor (soak time)
  - Número de arrancadas del motor
  - Información sobre los programas de inspección y mantenimiento de la ciudad
  - Calibración de las TBE, mediante datos provenientes de pruebas dinamométricas para los vehículos bajo las condiciones de conducción locales.
  - Determinación del porcentaje de la flota para cada tecnología vehicular, que posee aire acondicionado.
  
- Dispersión
  - Factores de emisión locales calibrados para la zona de estudio
  - Medición directa de la longitud de colas vehiculares para introducirlas directamente al módulo CALINE3.
  - Coeficiente de rugosidad superficial validado para las condiciones de la zona de estudio.
  - Tipo de atmósfera horaria determinada directamente o mediante parámetros ambientales más precisos.
  - Altura de la capa de mezcla para cada hora, determinada por medios directos, utilizando un globo cautivo o sensores remotos.
  - Diámetro promedio de las partículas emitidas por los vehículos circulantes por la ciudad, para las condiciones locales.

### 3.4. PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DEL SITM METROLÍNEA<sup>71</sup>

El camino para la puesta en funcionamiento de un Sistema Integral de Transporte Masivo (SITM) en la ciudad de Bucaramanga, inicia formalmente en el año 2001, cuando el proyecto fue incluido en el Plan de Desarrollo Municipal. Este proyecto es parte prioritaria de la infraestructura urbana, rural y de servicios, como lo certifica la Oficina de Planeación Municipal de la Alcaldía de Bucaramanga.

En diciembre de 2002, el Concejo de la ciudad autorizó al alcalde para participar en la constitución de la empresa de transporte METROLÍNEA S.A., conjuntamente con otras entidades públicas, exclusivamente. El objetivo de METROLÍNEA es “gestionar organizar, planear y controlar el servicio de transporte masivo urbano de pasajeros en Bucaramanga y su Área Metropolitana.”

Finalmente, en el 2003 “el Gobierno Nacional incluyó [a METROLÍNEA] dentro del Plan Nacional de Desarrollo el Sistema de Transporte Masivo de pasajeros para Bucaramanga y su Área Metropolitana, con lo cual se logra un aval fundamental para la puesta en marcha del proyecto.”

El SITM propuesto para la ciudad de Bucaramanga presenta las siguientes características:

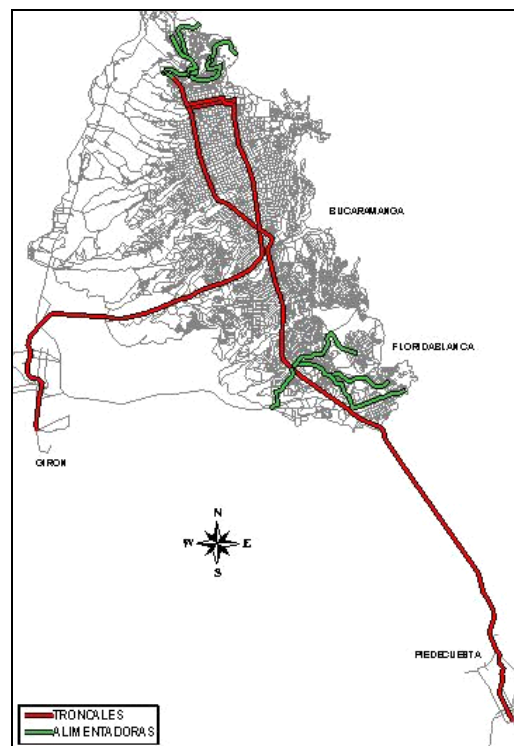
- Operación del sistema con buses de alta capacidad en un conjunto de rutas troncales, que circulan en corredores de carriles exclusivos o en carriles de uso mixto. Ambos tipos de corredores cuentan con paraderos exclusivos localizados en el centro de la vía.

---

<sup>71</sup> SAIP Ltda. / Area Metropolitana de Bucaramanga. Estudio de complementación y actualización del diseño operacional del sistema integrado de transporte masivo de Bucaramanga. 2004

- El sistema es centralizado y está integrado por las siguientes empresas:
  1. METROLÍNEA: Empresa encargada de la planeación, regulación y control de la operación
  2. Las empresas que suministran y operan los equipos de transporte y reciben un pago por vehículo – kilómetro servido
  3. Una empresa encargada del manejo del recaudo
  4. Una empresa fiduciaria que administra y maneja los recursos del sistema
  
- Se plantean los siguientes corredores troncales que componen el sistema (ver Figura 3-8):
  - Cañaveral – Autopista – Puerta del Sol – Diag. 15 – Cra. 15 – La Virgen
  - Longitud de 9,5 Km. con carriles exclusivos.
  - Puerta del Sol – Carrera 27 – Calle 9 – Carrera 15
  - Longitud de 5 Km. con carriles exclusivos
  - Piedecuesta – Autopista – Cañaveral
  - Longitud de 12 Km. con carriles mixtos.
  - Girón – Puerta del Sol
  - Longitud de 10 Km. con carriles mixtos.
  
- En el marco de la conservación del medio ambiente y la relación beneficio / costo del proyecto, se plantea que los buses del sistema sean propulsados por combustibles DIESEL o Gas Natural Comprimido (GNC)
  
- Los requerimientos técnicos para los buses del sistema que circularán por las troncales son los siguientes:

- Bus tipo Padrón de piso alto (no articulado)
  - Tecnología EURO II
  - Potencia mínima de 250 CV
  - Capacidad de 15 toneladas o 100 pasajeros, 30% sentados
  - Cumplir con las especificaciones exigidas por el Ministerio de Transporte para el transporte público colectivo.
- La velocidad media de operación del transporte se incrementará de 15 km/hora, hasta cerca de 25 Km/ hora.



*Figura 3-8: Descripción de las rutas troncales y alimentadoras*

*Fuente: SAIP Ltda. 2004*

A principios del 2004, el proyecto todavía no ha sido totalmente diseñado y aún falta definir variables tan importantes para el sistema como el sistema de combustible de los buses y la frecuencia de despachos.

Para poder simular de la mejor manera posible las condiciones de comportamiento que tendrá en el futuro el sistema, se han tomado en cuenta todos los criterios planteados en esta sección y se han tratado de estimar los datos faltantes.

En la modelación del sistema METROLÍNEA se suplieron estas falencias con estimaciones de los autores para el volumen de vehículos circulantes (ver Capítulo Emisión) y planteando la alternativa del uso de cualquiera de los dos combustibles tentativos (Gas o DIESEL).

Los resultados obtenidos en este proyecto permitirán estimar la variación de la contaminación en las zonas adyacentes a la Carrera 15 por la operación del SITM, y se espera que se conviertan en otro elemento de decisión en el momento de evaluar la factibilidad del proyecto.

Por último, cabe resaltar que uno de los fines de este proyecto es que la cuantificación de la calidad del aire, permita una evaluación más completa de los beneficios o inconvenientes que conllevan los proyectos viales y de tráfico, así como la adopción de medidas legislativas de control del tránsito en las ciudades.

## **4. EMISIONES VEHICULARES**

Las emisiones vehiculares son las responsables en gran parte de la contaminación del aire en ambientes urbanos, razón por la cual en el ámbito mundial son muchos los esfuerzos encaminados a su mejor conocimiento y por ende a su más precisa estimación.

Para objeto de la presente investigación se pretende estimar las emisiones actuales de monóxido de carbono CO y material particulado PM presentes en los gases de escape de los vehículos automotores que circulan sobre el tramo comprendido entre la Avenida Quebrada Seca y la Calle 56 del municipio de Bucaramanga y estimar cuál sería el comportamiento de la carga de contaminantes con la implementación del Sistema Integrado de Transporte Masivo SITM METROLÍNEA, razón por la que es conveniente conocer de dónde provienen y como se producen las emisiones, como también las ventajas de la modelación como herramienta en la estimación de las mismas.

### **4.1 PROCESO DE EMISIÓN EN LOS VEHÍCULOS**

Las emisiones vehiculares están integradas por un gran número de contaminantes provenientes de diferentes procesos, como lo son las emisiones de escape y las emisiones evaporativas, siendo las primeras las mas usualmente consideradas con una participación del 60% de la

contaminación total emitida por el motor con respecto al 40% correspondiente a las emisiones evaporativas<sup>72</sup>.



*Figura 4-1 Puntos de Emisión de Gases*

*Fuente: Autores*

Las emisiones de escape son las que se producen por la combustión incompleta del combustible, estas son liberadas al ambiente por medio del exhosto y sus principales componentes son el monóxido de carbono CO, bióxido de carbono CO<sub>2</sub>, hidrocarburos HC, óxidos de nitrógeno NO<sub>x</sub>, óxidos de azufre SO<sub>x</sub>, vapor de agua y gases generados por el consumo de aceite.

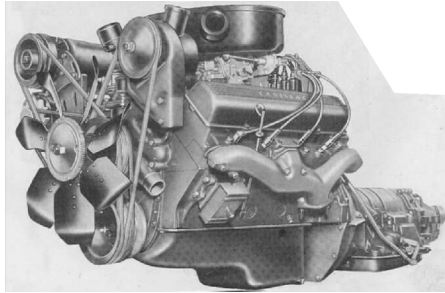
Las emisiones evaporativas son aquellas que se presentan debido a la volatilización del combustible, estas pueden provenir del motor aun cuando éste está apagado debido a las temperaturas externas como también del tanque de la gasolina, sus principales componentes son una gran variedad de HC y gases productos de la combustión, los cuales al ser liberados a la atmósfera reaccionan con el aire y la luz contribuyendo a la formación de SMOG<sup>73</sup>.

---

<sup>72</sup> DAMA, Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente. Cartilla Control de Emisión de Gases. p. 56.

<sup>73</sup> Ibid. p. 57.

#### 4.1.1 El motor de combustión interna



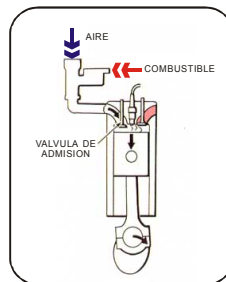
*Figura 4-2: Motor de Combustión Interna*

*Fuente: Internet*

El motor de combustión interna es el dispositivo usado por la mayoría de vehículos en el mundo y es el lugar donde la energía química del combustible se convierte en energía mecánica, haciendo posible el movimiento de los vehículos y generando los gases de escape.

Este motor esta basado en el ciclo de cuatro tiempos, el cual se resume a continuación:

##### 4.1.1.1. Primer tiempo: ADMISIÓN

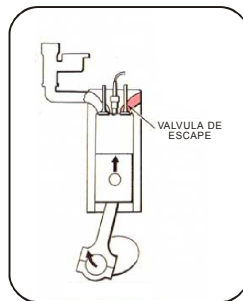


*Figura 4-3 Primer tiempo: Admisión*

*Fuente: Internet*

En este tiempo la mezcla aire / combustible que ha sido preparada en el carburador o en el múltiple de admisión se introduce dentro del cilindro debido al vacío creado por el movimiento descendente del pistón, las válvulas de admisión están abiertas y las de escape se encuentran cerradas. Los anillos mantienen la hermeticidad del cilindro para evitar fugas hacia el cárter, las cuales posteriormente se pueden convertir en emisiones evaporativas.

#### 4.1.1.2. Segundo tiempo: COMPRESIÓN

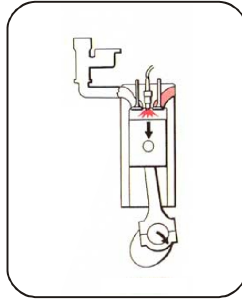


*Figura 4-4 Segundo Tiempo: Compresión*

*Fuente: Internet*

En este tiempo se comprime la mezcla y aumenta su temperatura debido al movimiento ascendente del pistón, es el tiempo donde inicia el proceso de combustión ya que al estar la mezcla comprimida la bujía proporciona una chispa entre sus electrodos que enciende la mezcla, esta energía proporcionada por la chispa se conoce como energía de activación.

#### 4.1.1.3. Tercer Tiempo: EXPANSIÓN

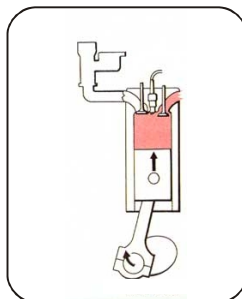


*Figura 4-5: Tercer Tiempo: Expansión (Explosión)*

*Fuente: Internet*

Como resultado de la explosión de la mezcla, la energía química del combustible se convierte en energía calórica, la cual aumenta la temperatura y por consiguiente la presión dentro de la cámara haciendo que el pistón inicie un recorrido descendente, convirtiendo su movimiento lineal dentro del cilindro en movimiento circular al estar conectado al cigüeñal. En este tiempo finaliza la combustión.

#### 4.1.1.4. Cuarto tiempo: ESCAPE



*Figura 4-6: Cuarto Tiempo: Escape*

*Fuente: Internet*

Es el tiempo en el cual se da salida a los gases formados como resultado del proceso de combustión, estos son expulsados hacia fuera de la cámara a través de las válvulas de escape debido al movimiento ascendente del pistón.

#### 4.1.2 Proceso de combustión

Es el proceso donde el oxígeno presente en el aire reacciona con el combustible liberando calor, el cual aumenta la presión dentro de la cámara o cilindro permitiendo el movimiento del vehículo.

##### 4.1.2.1 Proceso Químico

El proceso de la combustión se puede representar sencillamente mediante la siguiente ecuación:



El combustible usualmente es la gasolina o el ACPM. La gasolina es un producto de la refinación del petróleo compuesto por moléculas llamadas hidrocarburos HC, que a su vez están compuestas por átomos de hidrógeno y carbono, siendo estos últimos los que determinan su tamaño, por ejemplo un HC con 7 Carbonos se conoce como Heptano ( $C_7H_{16}$ ).

El tamaño de las moléculas de HC influye en que su rompimiento es más difícil, por lo que se necesita de una energía extra que ayude en esta labor, esta energía se conoce como energía de activación y en los motores corresponde a la chispa que produce la bujía al final del ciclo de compresión. Otro efecto del tamaño de los HC es que a medida que este aumenta,

también aumenta la cantidad de oxígeno necesario para su completa combustión.

El aire es un elemento fundamental en la combustión, está compuesto por 21% de Oxígeno y 78% Nitrógeno<sup>74</sup>, razón por la que son necesarios grandes volúmenes de este para poder quemar completamente el combustible.

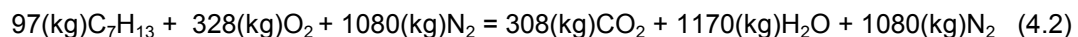
Los factores que influyen en la cantidad de oxígeno presente en el aire en volumen, son la altura sobre el nivel del mar y la temperatura. La primera debido a que a medida que aumenta la altura, el aire se hace menos denso y por ende se reduce la cantidad de oxígeno, y la segunda ya que a medida que aumenta la temperatura, también se reduce la densidad del aire, disminuyéndose la cantidad de oxígeno presente.

La combustión ideal es aquella en la que el combustible es quemado totalmente por el oxígeno presente en el aire y no se originan sub-productos de esta, como lo son los óxidos de nitrógeno, el monóxido de carbono y los compuestos orgánicos volátiles entre otros.

La cantidad teórica de aire para este proceso se puede estimar conociendo la ecuación de la reacción química, la cual para una base molar es,<sup>75</sup>



O en base de masa es,



---

<sup>74</sup> Ibid, p. 21

<sup>75</sup> WARK, Kenneth y WARNER, Cecil. Contaminación del aire origen y control. México: Limusa, 2002.

En las ecuaciones (4.1) y (4.2) se observa que los productos finales de una combustión completa son el  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , y que en teoría se necesitan 1408 Kg. de aire para quemar 97 Kg. de combustible.

A partir de esto se puede definir la relación aire / combustible como la masa de aire requerida por masa unitaria de combustible para que este último sea consumido en su totalidad. Para el caso mostrado en las ecuaciones 4.1 y 4.2, esta relación sería igual a 14.5 (1408/97) y determina bajo que condiciones se están operando los motores, es decir con exceso de aire (mezcla pobre) o con carencia de aire (mezcla rica), situaciones que afectan las emisiones como se muestra en la Figura 4-7

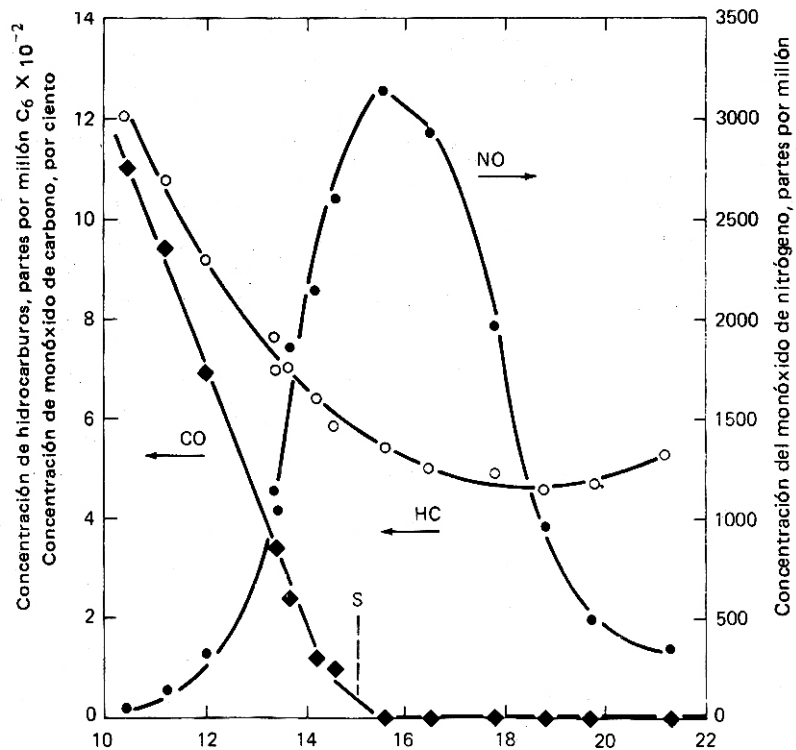


Figura 4-7: Efectos de la Relación Aire – Combustible sobre la emisiones vehiculares

Fuente: WARK & WARNER, Contaminación del Aire

Otra causa de las emisiones vehiculares son las variaciones de la presión y la temperatura dentro de la cámara de combustión. Por lo general las paredes de esta se encuentran a una temperatura menor que la del conjunto, por la acción de los sistemas de enfriamiento, condición que hace que la mezcla de aire y combustible cercana a las paredes se enfríe, a un grado tal, que la flama se apaga antes de que se halla consumido todo el combustible presente. Esto genera una combustión incompleta y unos productos intermedios, que contaminan el medio ambiente.

#### 4.1.2.2 Proceso Físico<sup>76</sup>

La combustión es un proceso gradual en el que se distinguen las fases ilustradas en la Figura 4-8.

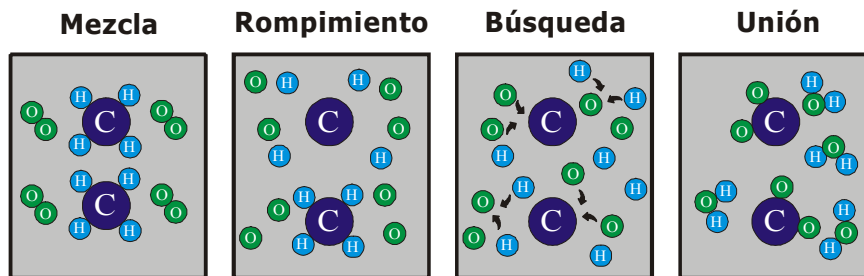


Figura 4-8: Etapas en el Proceso Físico de la Combustión

Fuente: Autores

- Mezcla y turbulencia

En esta etapa las moléculas de HC deben estar rodeadas por las de Oxígeno, lo ideal es que la proporción de la mezcla sea 1:1.

<sup>76</sup> DAMA, Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente. Cartilla Control de Emisión de Gases.

- Rompimiento

Es este momento la energía de activación tiene sus efectos, haciendo que las moléculas se aceleren, choquen y se rompan, provocando que se libere el carbono y el oxígeno.

- Búsqueda

Los átomos de carbono e hidrógeno, debido a su misma aceleración, se unen a las moléculas de oxígeno.

- Unión

Al unirse el carbono con las moléculas de oxígeno se genera calor, el cual aumenta la temperatura en el cilindro, permitiendo que el pistón se desplace hacia abajo y este transmita su movimiento al cigüeñal. Esto es lo que origina, el movimiento del vehículo.

## 4.2 MODELO INTERNACIONAL DE EMISIONES VEHICULARES IVE

Es un modelo computacional desarrollado por la Universidad de California en Riverside, el centro de Investigaciones ambientales CE-CERT<sup>77</sup>, y dos empresas privadas: GSSR<sup>78</sup> y ISSRC<sup>79</sup>, con los fundamentos dados por la US EPA.<sup>80</sup> Fue creado para ser usado en la estimación de las emisiones vehiculares, en países en vía de desarrollo.

Dentro de sus principales alcances están ayudar a las regiones a:

- Evaluar el estado de polución del aire urbano
- Determinar la implementación de programas locales de control de contaminación y desarrollo de normatividad.
- Predecir la afectación del recurso aire ante la implantación de diferentes estrategias.
- Medir el progreso en la reducción de las emisiones en el tiempo.

---

<sup>77</sup> Center for Environmental Research and Technology

<sup>78</sup> Global Sustainable Systems Research

<sup>79</sup> International Sustainable Systems Research Center

<sup>80</sup> U.S. Environmental Protection Agency

## 4.2.1 Aspectos básicos del modelo

### 4.2.1.1 Requerimientos técnicos

Este software está escrito en lenguaje Java, por lo que para su funcionamiento requiere de la aplicación Java Virtual Machine. El tamaño de su interfase es de 830 x 722 píxeles, de manera que para su visualización se requiere un monitor con una resolución superior a esta.

### 4.2.1.2. Descripción del Modelo

El proceso de estimación de las emisiones mediante la implementación del modelo, se resume en la Figura 4-9.

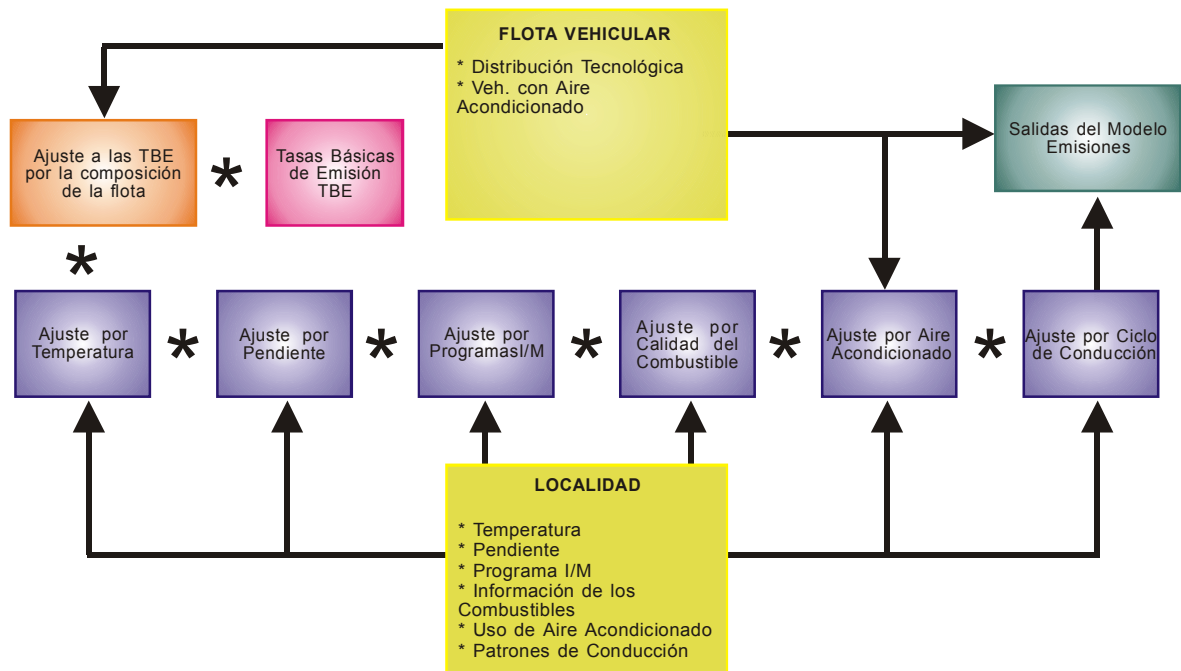


Figura 4-9: Estructura Interna del Modelo

Fuente: IVE User's Manual & Autores

En este diagrama se pueden identificar los tres componentes básicos del modelo y de los cuales depende la precisión de las estimaciones hechas, estos son:

- Tasas Básicas de Emisión TBE

Estas se refieren a los valores obtenidos de pruebas de laboratorio hechas a diferentes tipos de vehículos, bajo diferentes condiciones ambientales y de operación, con el fin de obtener las emisiones de estos y su variación de acuerdo a diferentes parámetros, como por ejemplo la velocidad o la temperatura entre otros.

Hay dos tipos de TBE, una para los vehículos en movimiento (Running) y otra para los vehículos en reposo (Idle).

- Actividad Vehicular (Location File)

Se refiere a la caracterización del tipo y cantidad de conducción presente en la zona de estudio, dentro de este campo se encuentra la determinación de la velocidad, la distancia recorrida y otros parámetros a los que se hace referencia mas adelante.

- Distribución de la Flota Vehicular (Fleet File)

Se refiere a la composición de la flota, es decir identificar los tipos de vehículos presentes en la zona de estudio y su participación en la actividad vehicular.

#### 4.2.1.3. Proceso de Cálculo

El proceso de estimación de las emisiones consiste en multiplicar para cada clase o tecnología vehicular su tasa básica de emisión TBE por los factores

de corrección y por su actividad (Km.), para así obtener un total de las emisiones producidas.

El modelo internamente realiza este proceso determinando primero una tasa de emisión ajustada Q, como se muestra en la ecuación 4.3

$$Q[t] = TBE[t] * K_1[t] * K_2[t] * \dots * K_x[t] \quad (4.3)$$

En este caso se multiplica la tasa básica de emisión TBE, por una serie de factores de corrección (**K**) para obtener la Tasa de Emisión Ajustada (**Q**) para cada clase vehicular.

Los factores de corrección que se emplean, están resumidos en la Tabla 4-1 y dependen directamente de los valores suministrados como entradas al modelo en el Location File.

<b>Variabes Locales</b>	<b>Calidad del Combustible</b>	<b>Variabes de Conducción</b>
Temperatura ambiente	Gasolina General	VSP Vehicle Specific Power
Humedad Ambiente	Azufre en la Gasolina	Pendiente
Altitud	Plomo en la Gasolina	Uso del Aire Acondicionado
Programa I / M Inspección /Mantenimiento	Benceno en la Gasolina	Distribución de las arrancadas
	Oxigeno en la Gasolina	
	Diesel General	
	Azufre en el Diesel	

*Tabla 4-1: Factores de ajuste empleados por el modelo*

*Fuente: IVE User's Manual*

Los ajustes por conducción se llevan a cabo en la ecuación 4.4, donde se pondera la tasa de emisión ajustada con la porción de viaje y el tipo de

conducción para cada tecnología (Ver Tabla 4-2). La porción de viaje se obtiene directamente del Fleet File. El paso final en esta ecuación es multiplicar estos resultados por la relación entre la velocidad promedio del ciclo LA4<sup>81</sup>, con la del ciclo modelado y por la distancia recorrida (Emisiones vehículo en movimiento)

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{running}} &= \bar{U}_{\text{FTP}} * D / \bar{U}_C * \sum_t \{f_{[t]} * Q_{[t]} * \sum_d [f_{[dt]} * K_{[dt]}\} \\
 Q_{\text{start}} &= \sum_t \{f_{[t]} * Q_{[t]} * \sum_d [f_{[dt]} * K_{[dt]}\}
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

Donde,

Variable	Descripción
TBE <sub>(t)</sub>	Tasa básica de emisión para cada tecnología (start (g), running (gr/km))
Q <sub>(t)</sub>	Tasa de emisión ajustada para cada tecnología (start (g), running (g))
Q	Tasa promedio de emisión para toda la flota (start (g), running (g))
F <sub>(t)</sub>	Fracción de viaje por tecnología
F <sub>(dt)</sub>	Fracción de tipo de conducción o reposo por tecnología
U <sub>(FTP)</sub>	Velocidad promedio del ciclo de conducción LA4 (g/km)
D	Distancia recorrida (input)
U <sub>C</sub>	Velocidad promedio para el ciclo de conducción específico (input)

*Tabla 4-2 Variables de los ajustes por conducción*

*Fuente: IVE User's Manual*

<sup>81</sup> Este ciclo se aplica a los vehículos en chasises dinámicos con el fin de obtener las TBE, para cada tipo de vehículo.

La organización interna del modelo permite identificar cuatro módulos básicos dos de los cuales corresponden a la entradas de las variables locales, otro a la entrada de ajustes en la TBE y otro donde los anteriores tres módulos convergen para realizarse los cálculos correspondientes. A continuación se presenta una descripción de estos módulos, haciendo énfasis en los que se refieren a las entradas del modelo, siendo estas los factores más importantes para el buen funcionamiento del mismo.

#### 4.2.2. Módulo de Cálculo

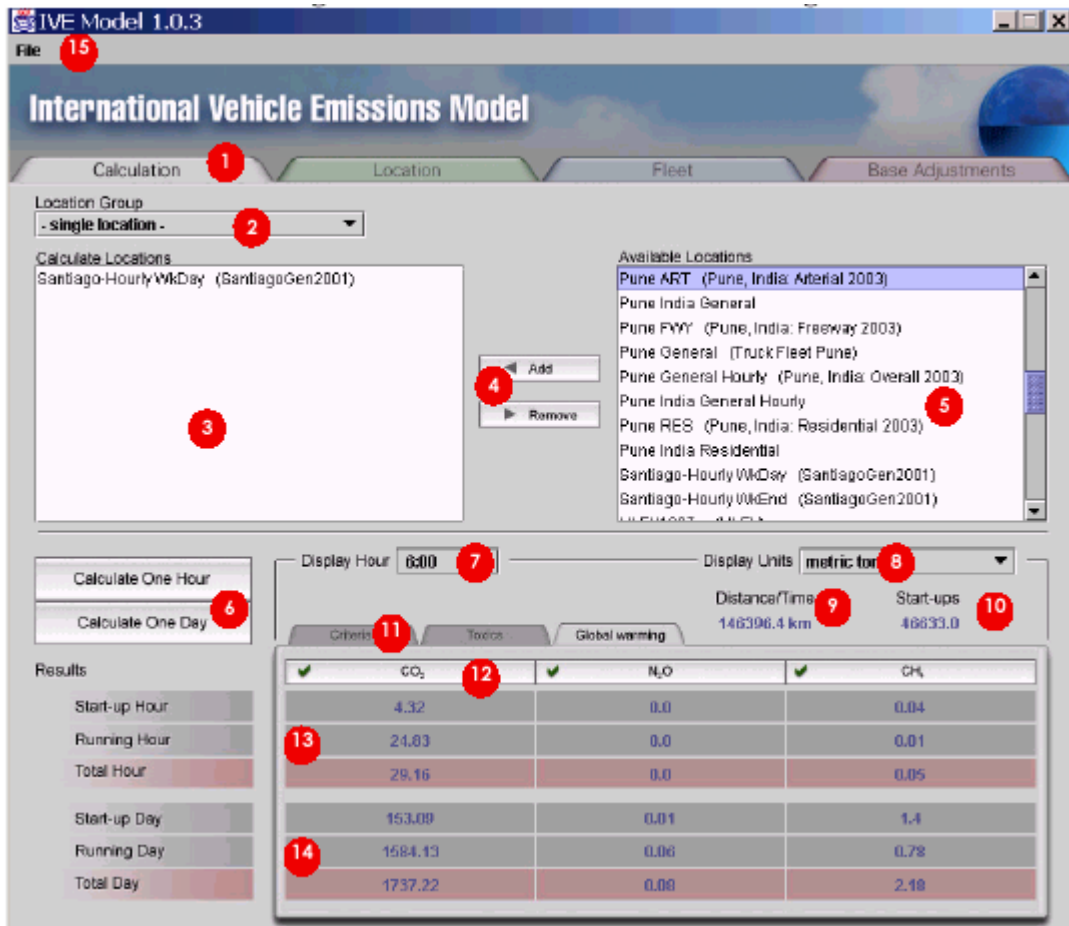


Figura 4-10: Ventana del Módulo de Cálculo

Fuente: IVE User's Manual

El módulo de Cálculo se ve cuando se inicia el modelo, en el se pueden seleccionar diferentes localidades con sus correspondientes flotas para estimar sus respectivas emisiones. Su interfase gráfica se puede observar en la Figura 4-10

El proceso de cálculo que se debe seguir para estimar las emisiones en este módulo es el siguiente:

- Seleccionar una Localidad<sup>82</sup> de la lista de localidades disponibles, la cual corresponde al área marcada con el número 5 (Figura 4-10). El primer nombre es el de la localidad y el nombre en paréntesis es el de la flota asociada a esta. Es indispensable para estimar las emisiones que cada localidad tenga una flota asociada.
- Añadir la ubicación seleccionada mediante el botón 4 (Add - Remove) al área 3 que es la zona donde se muestran las localidades que van a ser analizadas en el modelo para estimar sus correspondientes emisiones.
- Seleccionar las opciones de salida como el periodo para el que se quieren obtener las emisiones, que puede ser para una hora determinada o un día completo (7), las unidades para las emisiones (8) que pueden ser miligramos, gramos, kilogramos, toneladas métricas, libras y toneladas inglesas y finalmente los contaminantes a estimar (11- 12) que pueden ser:
  - Contaminantes criterio: Monóxido de Carbono (CO), Material Particulado menor a 10 micras (PM10), Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC), Óxidos de Azufre (SOx) y Óxidos de Nitrógeno (NOx)

---

<sup>82</sup> Este es el nombre que se le da al archivo de entrada que contiene las características de la zona.

- Contaminantes tóxicos: Plomo, Formaldehído, Acetaldehído, Amonio, Butadieno, y Benceno
  - Contaminantes responsables del calentamiento global: Dióxido de carbono (CO2), oxido nitroso (N2O) y metano (CH4)
- Presionar los botones de calculo (6), los cuales se efectúan sobre las localidades seleccionadas y los resultados aparecen en la zona marcada con los números 13 y 14 dependiendo si el cálculo es horario o diario.
  - Finalmente en la etiqueta File (15) estos resultados se pueden exportar a un archivo de texto para facilitar su manipulación en una hoja de cálculo como Excel.

Calculation Results:						
Group: - single location -		Units: metric tons				
Containing Locations:		Fleets:				
Santiago-Hourly WkDay		SantiagoGen2001				
Hour: 0:00						
index	Technology	CO	CO	CO	CO	VOC
		standard start-up	multi-stop start-up	standard running	multi-stop running	standard start-up
0 0	Pt: Auto/SmTk : Lt: Carb : None : PCV : <79K km	0.004250815	0	0.001791611	0	2.32E-04
1 1	Pt: Auto/SmTk : Lt: Carb : None : PCV : 80-161K km	0.11643355	0	0.049159727	0	0.006526931
2 2	Pt: Auto/SmTk : Lt: Carb : None : PCV : >161K km	0.276211286	0	0.11598506	0	0.015876398
3 3	Pt: Auto/SmTk : Med : Carb : None : PCV : <79K km	0.012327364	0	0.005233926	0	6.73E-04
4 4	Pt: Auto/SmTk : Med : Carb : None : PCV : 80-161K km	0.126783191	0	0.053529477	0	0.007107103
5 5	Pt: Auto/SmTk : Med : Carb : None : PCV : >161K km	0.230941495	0.02952377	0.096975629	0.0140315	0.013274327
6 6	Pt: Auto/SmTk : Hv : Carb : None : PCV : <79K km	0.008671116	0	0.002005584	0	5.80E-04
	<i>other technologies here</i>					
	HOURLY TOTALS:	1.024661548	0.085685902	0.421471527	0.138162417	0.054444898
Hour: 2:00						
index	Technology	CO	CO	CO	CO	VOC
		standard start-up	multi-stop start-up	standard running	multi-stop running	standard start-up
0 0	Pt: Auto/SmTk : Lt: Carb : None : PCV : <79K km	0.002609217	0	0.001067519	0	1.42E-04
1 1	Pt: Auto/SmTk : Lt: Carb : None : PCV : 80-161K km	0.071468728	0	0.029291474	0	0.004006332
2 2	Pt: Auto/SmTk : Lt: Carb : None : PCV : >161K km	0.169542794	0	0.069108875	0	0.00974518
3 3	Pt: Auto/SmTk : Med : Carb : None : PCV : <79K km	0.007566728	0	0.003118598	0	4.13E-04
4 4	Pt: Auto/SmTk : Med : Carb : None : PCV : 80-161K km	0.077821499	0	0.031895159	0	0.00436245
5 5	Pt: Auto/SmTk : Med : Carb : None : PCV : >161K km	0.14175549	0.01812215	0.05778224	0.00836057	0.008147989
	<i>Other hours here</i>					
	DAILY TOTALS:					
		CO	CO	CO	CO	VOC
		standard start-up	multi-stop start-up	standard running	multi-stop running	standard start-up
		109.046055	7.354085822	45.01733534	8.963058927	6.581660524

Figura 4-11: Archivo de Salida, de Santiago de Chile en formato TXT

Fuente: IVE User's Manual

#### 4.2.3. Módulo de Localidad (Location File)

Para poder estimar las emisiones en una zona es necesario conocer los comportamientos de manejo y las diferentes características propias del área como la temperatura y la humedad entre otras.

En este módulo se introduce la siguiente información debido a su notable influencia sobre las emisiones:

- Comportamientos de manejo

Se introduce la cantidad de manejo o conducción, como también los parámetros que la caracterizan (velocidad, aceleración etc.)

- Patrones de encendidos o arranques

Se refieren al número de arranques y la distribución de los tiempos que los vehículos duran apagados en la zona de estudio para el intervalo analizado.

- Variables ambientales

Se refiere a la altitud, temperatura y humedad de la zona y la pendiente de la vía.

- Características del combustible

Esta información incluye la calidad general del combustible como también su composición, este parámetro es indispensable en la determinación de las emisiones ya que estas dependen directamente del tipo de combustible usado.

Para objeto del presente estudio se elaboró un archivo con las características locales (Location file) para cada sentido de circulación de las 5 intersecciones

seleccionadas con las condiciones actuales y con la implementación del Sistema Integrado de Transporte Masivo METROLÍNEA.

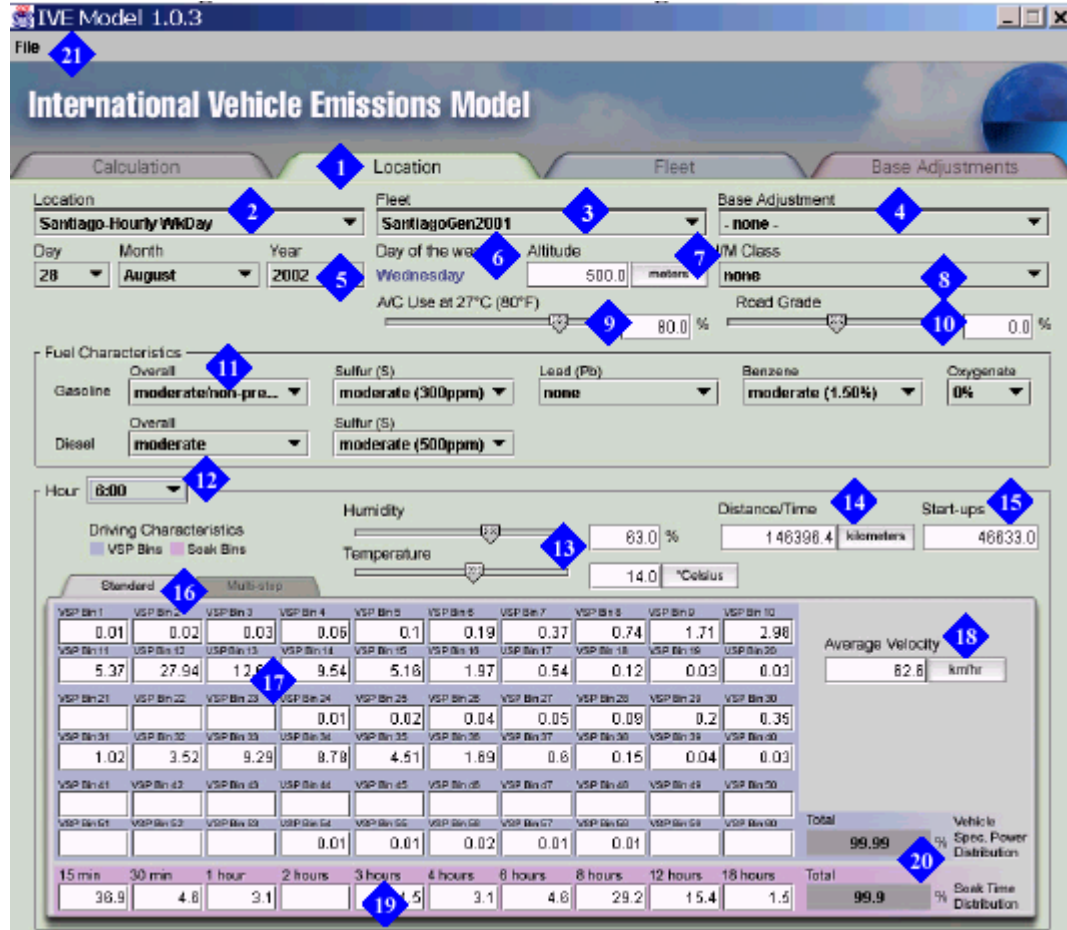


Figura 4-12: Ventana del Módulo de Localidades

Fuente: IVE User's Manual

A continuación se presenta una breve descripción de las variables o campos señalados en la anterior Figura 4-12, su forma de obtención y el valor asignado como entrada para esta investigación.

#### 4.2.3.1. Información general

- Etiqueta Location

Al hacer clic en esta se despliega el módulo de localidad en el cual se introduce información propia de la zona.

- Menú desplegable de localidades

Muestra la localidad actual, en este se puede seleccionar alguna localidad de las disponibles.

- Menú desplegable de flota

Muestra la flota asociada a la localidad actual.

- Menú desplegable de ajuste de las tasas de emisión

Muestra el archivo que contiene los ajustes a las tasas básicas de emisión TBE, asociado a la localidad seleccionada.

- Fecha

Muestra la fecha para la cual se esta modelando y no en la cual se esta realizando la modelación, esta cumple únicamente una función de etiqueta, para nuestro estudio se modela un día promedio entre los meses de Abril 7 a Julio 7, por ser estos los días en los que la estación de monitoreo Centro se encontraba a nivel del suelo.

- Día de la Semana

Al igual que la fecha cumple solo función de etiqueta

#### 4.2.3.2. Altitud

Se refiere al valor con respecto al nivel del mar, se incluye debido a que a mayor altura sobre el nivel del mar, menor será la densidad del aire y por lo tanto la cantidad de oxígeno presente en el mismo volumen, alterando el proceso de combustión descrito anteriormente. Para la modelación efectuada se tomo 1000 msnm para la ciudad de Bucaramanga.

#### 4.2.3.3. Programa de Inspección y Mantenimiento I/M

Hace referencia al estado general de la flota en el área de interés, debido a que la implementación de este tipo de programas permite identificar a los vehículos considerados como altos emisores, obligándolos a cumplir ciertos estándares, reduciendo de esta forma las emisiones. Para la ciudad este programa es coordinado por la Corporación Autónoma Regional para la defensa de la Meseta de Bucaramanga CDMB, la cual recibe de diferentes Servicentros<sup>83</sup> los resultados de las pruebas realizadas a los vehículos en reposo.

Debido a estas características de la prueba, se optó por trabajar para la ciudad con una etiqueta de entrada igual a *IDLE DECENTRALIZED PROGRAM FOR ALL VEHICLES*.

---

<sup>83</sup> Los Servicentros (centros de servicio automotriz) actúan como entes independientes en la recolección de los datos, por lo que la prueba se considera descentralizada.

#### 4.2.3.4. Uso del aire Acondicionado (AC)

Se refiere al porcentaje de los vehículos equipados con aire acondicionado (AC), que lo usan a una temperatura de 27 °C. El programa supone que para 15 °C ningún vehículo usa AC y que para 32 °C, todos los vehículos lo usan sin importar el valor proporcionado como entrada en esta casilla. El modelo internamente calcula el efecto del uso del AC en función de la temperatura introducida y en el valor introducido en esta casilla. Para la modelación realizada este parámetro no se tuvo en cuenta debido a que en la zona de estudio predomina el transporte público y el uso del AC en esta flota es mínimo.

#### 4.2.3.5. Pendiente de la Vía (Road Grade)

Este parámetro se refiere a la pendiente de la vía o de la zona analizada, se debe tener especial cuidado con su manejo ya que en la caracterización del tipo de conducción, este también es incluido, por lo que no es correcto incluirlo dos veces. Esta utilidad es provechosa cuando se pretende modelar una zona con una pendiente que prevalece, o para conocer la variación de las emisiones dependiendo de las condiciones topográficas.

Para este estudio, debido a que se trabajó con los archivos de comportamiento vehicular de Santiago de Chile, estos ya incluyen los efectos de la pendiente, de igual forma como se mencionó anteriormente este valor debe ser usado cuando existen pendientes considerables, las cuales para nuestro dominio son despreciables.

#### 4.2.3.6. Características del Combustible

El modelo permite el uso de diferentes tipos de combustibles como lo son el Gas Natural y el Etanol entre otros, pero solo permite la entrada de las características del diesel y de la gasolina. La información de estos fue suministrada directamente por la Empresa Colombiana de Petróleos ECOPELROL

Las características de los combustibles son:

- Gasolina
  - Características Generales : Moderate / Premixed  
Esta categoría no tiene efecto sobre las emisiones, es el valor por defecto, Premixed significa que la gasolina es mezclada con aceite directamente en la planta por los productores.
  - Plomo: 0 %  
Las gasolinas nacionales están libres de plomo
  - Azufre: 5 ppm (super low)  
El contenido de azufre en la gasolina reduce la efectividad del catalizador incrementando la emisión de óxidos de azufre
  - Benceno: 1 % (low)  
Este porcentaje afecta directamente las emisiones de benceno.
  - Oxígeno: 0 %  
Los combustibles oxigenados mejoran la combustión, reduciendo las emisiones producidas por los motores.
- Diesel
  - Características Generales: Moderate  
Esta categoría no tiene efecto sobre las emisiones, es el valor por defecto.
  - Azufre: 50 ppm (low)  
El contenido de azufre en el Diesel afecta las emisiones de Óxidos de Azufre y material particulado

#### 4.2.3.7. Temperatura y Humedad Relativa

Este campo permite la entrada de estas características ambientales. La temperatura por su parte incide en el uso del AC como se mencionó anteriormente y también en la cantidad de oxígeno presente en el aire, ya que al aumentar la temperatura, el aire se hace menos denso disminuyendo la cantidad de O<sub>2</sub> presente.

Los valores con los que se realizó este estudio corresponden a los promedios del periodo comprendido entre Abril 7 y Julio 7 de 2003, fecha en la cual la estación centro de monitoreo de calidad del aire que opera la CDMB, estaba en la intersección de la Calle 36 (Telebucaramanga). Los valores que se introdujeron en esta casilla son los que se exponen en la Tabla 4-3.

Hora	Temperatura °C	Humedad %
6:00 AM	21	99.6
7:00 AM	21.7	98.9
8:00 AM	23.1	96.3
9:00 AM	24.7	90.6
10:00 AM	26.4	83.4
11:00 AM	27.8	76.8
12:00 PM	28.2	76.4
1:00 PM	28.2	78.6
2:00 PM	28.0	80.8
3:00 PM	27.7	81.6
4:00 PM	27.1	84.6
5:00 PM	26.2	89.2
6:00 PM	25.1	93.6

*Tabla 4-3 Valores promedio de temperatura y humedad relativa usados en la modelación*

*Fuente: CDMB*

#### 4.2.3.8. Menú desplegable para hora

En este campo se permite introducir información referente a los patrones de conducción para las diferentes horas del día.

#### 4.2.3.9. Distancia / Tiempo

Este parámetro permite introducir al modelo la cantidad de viaje para una flota vehicular dada, es decir la distancia total recorrida por los vehículos de la flota de interés en un intervalo de tiempo (hora, día). Por ejemplo se posee una flota de 100 vehículos que circulan en una vía de 1 Km. de longitud, durante una hora, el valor que se debe ingresar al modelo es  $100 * 1 = 100$  Km. para la hora analizada.

La distancia total estimada para la modelación se calcula para todas las horas entre las 6:00 AM y las 7:00 PM, y para todos los sentidos de circulación de las intersecciones seleccionadas, multiplicando la longitud del tramo analizado por el número de vehículos que pasan cada hora. Esta información sobre los volúmenes vehiculares se obtuvo de un estudio hecho por la empresa Siemens para la Dirección de Tránsito de Bucaramanga, en el cual se aforaron todas las intersecciones semaforizadas de la ciudad.

En la siguiente Tabla 4-4 se encuentra un ejemplo con los valores para la intersección de la Calle 36 con Carrera 15, sentido E-W. La longitud de este tramo se tomó de la Cra 17 hasta la Cra 14 con un valor de 274 m.

INTER-VALO	TIPO DE VEHÍCULO			Distancia Recorrida (km)
	Auto	Bus	Camion	
600 - 700	44	0	0	12.0
700 - 800	102	0	3	28.7
800 - 900	219	0	2	60.5
900 - 1000	325	0	3	89.8
1000 - 1100	618	0	0	169.2
1100 - 1200	476	0	4	131.4
1200 - 1300	477	0	2	131.1
1300 - 1400	251	0	1	69.0
1400 - 1500	172	0	0	47.1
1500 - 1600	162	0	1	44.6
1600 - 1700	198	0	2	54.7
1700 - 1800	182	0	0	49.8
1800 - 1900	210	0	0	57.5

*Tabla 4-4: Aforo Vehicular Calle 36 Sentido E-W*

*Fuente: SIEMENS. Abril de 2002.*

Al momento de modelar las emisiones en reposo, el valor de esta entrada no se debe manejar en distancia sino en tiempo, para nuestro caso se modelo 1 min., obteniéndose emisiones en masa / min.

#### 4.2.3.10. Número de Arrancadas

Esta variable permite introducir le número total de arrancadas (en frío y en caliente) para la flota de interés, con el fin de estimar las emisiones que se generan debido a estas. Como se mencionó anteriormente una arrancada consiste en encender el vehículo después de que este ha estado apagado por un periodo de tiempo, por tal razón este factor esta fuera de los objetivos de esta investigación, debido a que para el dominio seleccionado y para el periodo de tiempo analizado las arrancadas tal como se definen para el modelo no se presentan.

En su reemplazo se estiman unas emisiones para cuando los vehículos están en reposo, pero su motor continúa operando, con el fin de simular el comportamiento en los semáforos.

El valor suministrado para esta variable al modelo es cero (0).

#### 4.2.3.11. Etiquetas Standard y Multi-Stop

Permite la inclusión de dos tipos de comportamiento vehicular, el estándar (Standard) que se refiere a los vehículos cuyas condiciones de operación son normales, como por ejemplo los autos particulares, y los multi-parada (Multi-Stop) que son los vehículos como los taxis y buses de servicio público que realizan múltiples paradas.

Al seleccionar cualquiera de estas etiquetas se puede introducir el comportamiento vehicular correspondiente para la flota y el intervalo analizados

#### 4.2.3.12. Campos para la entrada del comportamiento vehicular

Se introduce el comportamiento vehicular (driving behavior) para la flota de interés, esta compuesto se 60 sub-campos en los cuales se debe introducir la fracción conducida bajo las características de cada sub-campo.

La velocidad, aceleración y desaceleración son eventos que tienen gran influencia en las emisiones vehiculares, la Figura 4-13 muestra las emisiones de CO en función de la potencia demandada por los vehículos y el esfuerzo del motor. En esta se visualizan variaciones alrededor de 200 veces bajo ciertas condiciones de conducción, por esta razón es que es indispensable caracterizar el comportamiento de los vehículos.

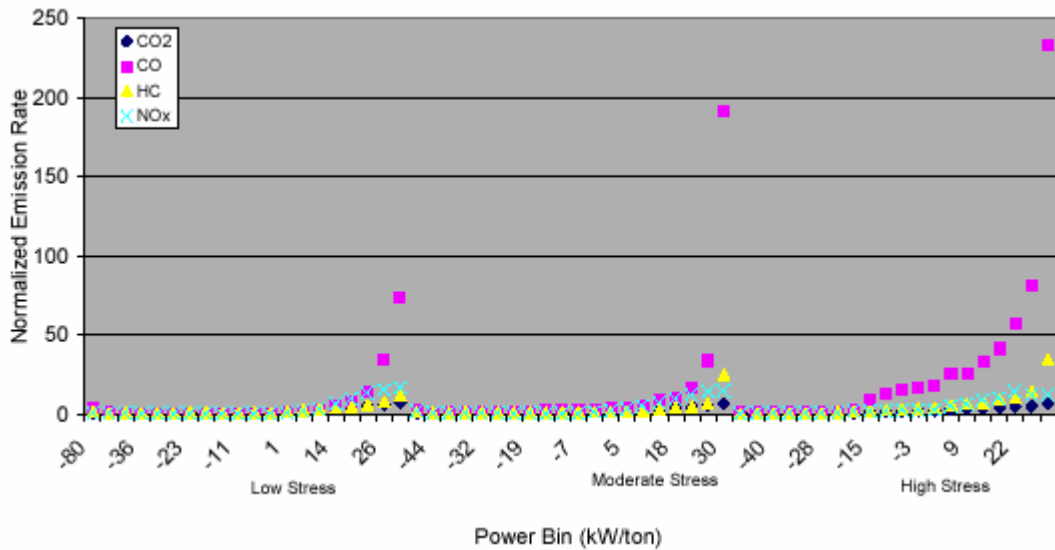


Figura 4-13 Variación en la emisión de CO, para diferentes condiciones de operación de los motores

Fuente: IVE User's Manual

Los diferentes patrones de conducción se incluyen dentro del modelo mediante los siguientes parámetros:

- VSP (Vehicle Specific Power)
- Engine Stress

Estos parámetros se determinan a partir de la variación horaria de la velocidad segundo a segundo para todos los tipos de vehículos y para todos los tipos de vía. Otro factor que influye en la determinación de estos es la pendiente, por lo que se requiere conocer segundo a segundo la altitud a la que se encuentran los diferentes vehículos.

Las siguientes ecuaciones muestran la forma como son calculados estos parámetros:

$$\text{VSP} = v [1.1a + 9.81 (\text{atan}(\sin(\text{pend}))) + 0.132] + 0.000302v^3 \quad (4.5)$$

Donde,

$$\text{pend} = [h(t=0) - h(t=-1)] / [v(t=0) - v(t=-1)]$$

$v$  = velocidad (m/s)

$a$  = aceleración (m/s<sup>2</sup>)

$h$  = altitud

La inclusión del VSP en la modelación permite obtener buenas aproximaciones para las emisiones de CO<sub>2</sub><sup>84</sup>, pero para alcanzar este objetivo en contaminantes como CO, HC, NO<sub>x</sub> y NH<sub>3</sub> es necesario la inclusión de otro parámetro adicional, conocido como el Esfuerzo del Motor (Engine stress), mencionado anteriormente. Por ejemplo, un vehículo con un esfuerzo bajo en el motor refleja unas condiciones de operación con velocidad baja y aceleraciones bajas, mientras que un esfuerzo alto se refiere a un vehículo operando a altas velocidades con aceleraciones altas.

Este parámetro se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Esfuerzo del Motor} = \text{RPM Índice} + (0.08 \text{ ton/kW}) * \text{Potencia Predecesora Promedio} \quad (4.6)$$

Donde,

$$\text{Potencia predecesora promedio (kW/ton)} = \text{Promedio (VSP } t = -5 \text{ a } -25)$$

$$\text{RPM Índice} = \text{Velocidad } t = 0 / (\text{Divisor de Velocidad})$$

$$\text{Mínimo RPM Índice} = 0.9$$

La información necesaria para poder determinar estos parámetros adecuadamente se puede obtener de mediciones hechas con módulos combinados de posicionamiento global (CGPS) instalados en los diferentes

---

<sup>84</sup> UNIVERSITY OF CALIFORNIA AT RIVERSIDE y GSSR. IVE Model User's Manual Version 1.0.3. [en línea] USA. 2003. <http://www.gssr.net/ive>. Attachment C.

tipos de vehículos y poniendo estos a circular en los diferentes tipos de vía, y así de esta forma obtener la variación de la velocidad, la posición y la altitud segundo a segundo.

En la Figura 4-14 se puede observar uno de los equipos que se deben instalar en los vehículos



*Figura 4-14: Módulo de CGPS usado en la determinación del VSP*

*Fuente: IVE User's Manual*

Con la información colectada de la anterior forma se puede determinar la fracción de tiempo que gastan los vehículos conduciendo en cada una de la categorías de VSP y el esfuerzo del motor (Engine stress) establecidas. Estos son 20 y 3 intervalos respectivamente, para un total de 60 posibilidades de conducción, para un tipo de vehículo en un tipo de vía especificado.

Para el objeto del presente estudio, la información correspondiente al comportamiento de manejo, debido a la carencia de los equipos necesarios, se obtuvo a partir de las mediciones hechas en Santiago de Chile<sup>85</sup>, tomando la velocidad promedio local y el tipo de vía como parámetros de

---

<sup>85</sup> Recomendación hechas por el Dr. James Lents del College of Engineering – Center for Environmental Research and Technology (CE-CERT) , desarrolladores del modelo.

comparación en la determinación de los comportamientos vehiculares mas adecuados.

Para esta labor se determinó la velocidad ponderada de la flota para las horas comprendidas entre las 6:00 AM y las 7:00 PM<sup>86</sup>, para todas las intersecciones, todos los sentidos de circulación y para las diferentes alternativas planteadas, es decir en las condiciones de tráfico actuales y con el SITM, esto con el fin de obtener un parámetro para poder comparar el comportamiento local, con el medido en Santiago de Chile.

Al realizar esta labor se seleccionaron dos tipos de comportamientos que se podían utilizar para nuestra ciudad, ya que las velocidades promedio de estos eran de 23.9 y 30 kph respectivamente, las cuales son muy similares las medidas en Bucaramanga. Es importante señalar que los archivos analizados corresponden al tipo de vía arteria, debido a que la Carrera 15 pertenece a esta clasificación.

Siguiendo las recomendaciones de los desarrolladores del IVE, seleccionaron los archivos de entrada de Santiago de Chile, tanto para las condiciones de flujo en arteria normal (Tabla 4-5) como para las condiciones de congestión (Tabla 4-6).

---

<sup>86</sup> La metodología usada en la determinación de la velocidad ponderada de la flota se describe la siguiente sección.

Location File: Santiago ART ALL V = 30 kph											
Esfuerzo Bajo				Esfuerzo Medio				Esfuerzo Alto			
BIN	%	BIN	%	BIN	%	BIN	%	BIN	%	BIN	%
1	0.01	11	5.61	21	0	31	0.7	41	0	51	0
2	0.01	12	40.17	22	0	32	2.49	42	0	52	0
3	0.02	13	14.21	23	0	33	5.73	43	0	53	0
4	0.04	14	9.95	24	0	34	4.76	44	0	54	0
5	0.08	15	5.05	25	0.01	35	1.82	45	0	55	0
6	0.17	16	1.78	26	0.02	36	0.44	46	0	56	0
7	0.36	17	0.47	27	0.04	37	0.15	47	0	57	0
8	0.73	18	0.09	28	0.07	38	0.03	48	0	58	0
9	1.57	19	0.02	29	0.15	39	0.01	49	0	59	0
10	2.94	20	0.03	30	0.25	40	0.01	50	0	60	0

Tabla 4-5: Distribución del comportamiento conducción, para una vía arteria en Santiago de Chile

Fuente: IVE User's Manual

Location File: Santiago Art Heavy congestion V = 23.9 kph											
Esfuerzo Bajo				Esfuerzo Medio				Esfuerzo Alto			
BIN	%	BIN	%	BIN	%	BIN	%	BIN	%	BIN	%
1	0	11	6.5	21	0	31	0.3	41	0	51	0
2	0	12	48.4	22	0	32	1.1	42	0	52	0
3	0	13	16.4	23	0	33	1.7	43	0	53	0
4	0	14	10.7	24	0	34	1.5	44	0	54	0
5	0	15	4.8	25	0	35	0.7	45	0	55	0
6	0.1	16	1.5	26	0	36	0.2	46	0	56	0
7	0.3	17	0.3	27	0	37	0.1	47	0	57	0
8	0.6	18	0.1	28	0	38	0	48	0	58	0
9	1.6	19	0	29	0.1	39	0	49	0	59	0
10	3.1	20	0	30	0.1	40	0	50	0	60	0

Tabla 4-6: Distribución del comportamiento de conducción, para una vía arteria en Santiago de Chile, en condiciones de congestión vehicular

Fuente: IVE User's Manual

Al tener seleccionados estos archivos se procedió a asignarlos a las diferentes horas de las alternativas modeladas, teniendo como base para esta labor la recomendación hecha por los desarrolladores del modelo, la cual consistía en que variaciones hasta del 15% en la velocidad medida en Santiago con la medida en Bucaramanga eran aceptables para la realización del cálculo, luego para la asignación se establecieron los rangos:

- < 26.5 kph : Se trabajó con el comportamiento vehicular de una vía arteria con gran congestión en Santiago de Chile ( Santiago ART Heavy Cong.)<sup>87</sup>. Ver Tabla 4-6
- > 26.5 kph : Se trabajo con el comportamiento general medido para las vías arterias (Santiago ART ALL). Ver Tabla 4-7

De esta forma se ajustó un comportamiento vehicular a nuestras condiciones de operación como se puede observar en la Tabla 4-7. Es importante mencionar que la velocidad que se introduce junto a dicho comportamiento como entradas al modelo es la medida en Bucaramanga y que este procedimiento es una alternativa para modelar lo mas cercano posible la emisión de los vehículos cuando estos están en movimiento (Running Emissions).

Calle 36 E-W		
Hora	Behavior	Velocidad Local ponderada (kph)
6:00 a.m.	HEAVY	25.27
7:00 a.m.	ART ALL	25.55
8:00 a.m.	HEAVY	19.35
9:00 a.m.	ART ALL	21.90
10:00 a.m.	HEAVY	24.03
11:00 a.m.	ART ALL	21.90
12:00 p.m.	HEAVY	22.93
1:00 p.m.	ART ALL	26.49
2:00 p.m.	HEAVY	22.11
3:00 p.m.	ART ALL	20.53
4:00 p.m.	HEAVY	22.92
5:00 p.m.	ART ALL	18.65
6:00 p.m.	HEAVY	24.39

*Tabla 4-7: Asignación en función de la velocidad, del comportamiento de conducción, para la Calle 36 sentido E-W en el periodo entre la 6 AM y la 6 PM.*

*Fuente: Autores*

---

<sup>87</sup> Este es el nombre del archivo tomado de Santiago de Chile

El comportamiento para modelar la emisión de los vehículos cuando estos están en reposo pero encendidos (IDLE), como por ejemplo en un semáforo, es más sencillo. Atendiendo a las recomendaciones hechas por los desarrolladores del modelo, este comportamiento se simula de una forma determinada.

Se asigna el 100% de la conducción al Bin 11, el cual corresponde a una velocidad de operación muy baja en la que el esfuerzo del motor también es muy bajo, condición cercana al reposo. Ver Tabla 4-8.

De esta forma junto con alguna consideración con respecto a la distancia recorrida y a la velocidad, se obtiene un comportamiento que representa el comportamiento de los vehículos en reposo.

Location File: IDLE Behavior B/manga V = 0 kph											
Esfuerzo Bajo				Esfuerzo Medio				Esfuerzo Alto			
BIN	%	BIN	%	BIN	%	BIN	%	BIN	%	BIN	%
1	0	11	100	21	0	31	0	41	0	51	0
2	0	12	0	22	0	32	0	42	0	52	0
3	0	13	0	23	0	33	0	43	0	53	0
4	0	14	0	24	0	34	0	44	0	54	0
5	0	15	0	25	0	35	0	45	0	55	0
6	0	16	0	26	0	36	0	46	0	56	0
7	0	17	0	27	0	37	0	47	0	57	0
8	0	18	0	28	0	38	0	48	0	58	0
9	0	19	0	29	0	39	0	49	0	59	0
10	0	20	0	30	0	40	0	50	0	60	0

Tabla 4-8: Distribución del comportamiento de conducción, para la condiciones de operación de los vehículos en reposo.

Fuente: IVE User's Manual

#### 4.2.3.13 Velocidad Promedio<sup>88</sup>

En este campo se introduce la velocidad promedio a la que opera la flota, para las diferentes horas del día.

A causa de la falta de información sobre la velocidad promedio en las vías a nivel local, se determinó ésta variable aplicando el Método del Vehículo en Movimiento. Este método consiste en que un vehículo se pone a circular en la corriente de tráfico de la vía seleccionada, registrándose las demoras y los tiempos de viaje.

La aplicación de tal método requiere de un vehículo, un conductor y dos personas que vayan registrando por separado los tiempos de viaje y las demoras que se presentan con su duración, localización y causa para su posterior análisis.

Con la información colectada de esta forma y conociendo las longitudes de los tramos se pueden obtener dos tipos de velocidades:

- Velocidad de Marcha ( $V_m$ )

Es la velocidad a la cual opera el vehículo sin tener en cuenta las demoras (es decir estas se restan del tiempo de viaje), esta es la que se introduce como entrada al modelo para estimar las emisiones de los vehículos en movimiento. Las emisiones para los vehículos en reposo se manejan de una forma distinta

---

<sup>88</sup> OPPELANDER, Joseph C. y VOX, Paul C. Manual de estudios de Ingeniería de Tránsito. México: Representaciones y Servicios de Ingeniería S.A, 1985. p. 98 - 110

- Velocidad de Recorrido ( $V_r$ )

Es la velocidad calculada como la distancia sobre el tiempo total de viaje, sin descontar las demoras, siempre es menor que la velocidad de marcha.

Estas mediciones se realizaron durante un periodo de un mes, fraccionando el dominio de estudio en cuatro grupos y la flota circulante en tres tipos, con el fin de facilitar su realización, las flotas son:

- Flota A: Autos, Taxis, Camionetas y Camperos
- Flota B: Buses, Busetas, Colectivos.
- Flota C: Flota A + Flota B

Cada uno de los grupos que se muestran en la Tabla 4-9, incluye los dos sentidos de circulación es decir N-S y S-N para la Cra 15 y E-W y W-E para las otras calles, excepto en la Calle 50 donde solo se presenta el sentido E-W.

Grupo	Vias	Flota
I	Carrera 15	A
II	Carrera 15	B
III	Av. Qebradaseca entre Cra 18 y 14 Calle 36 entre Cra 17 y 14 Calle 45 entre Cra 17 y 14	C
IV	Calle 50 entre Cra 18 y Calle 52 Carrera 17 entre Calle 52 y Av. La Rosita Calle 56 entre Cra 21 y 17C	C

Tabla 4-9: Distribución de las Flotas analizadas en la estimación de la velocidad

Fuente: Autores

Para la carrera 15 se estimó conveniente conocer la velocidad del transporte público colectivo (flota B) por separado, debido a que este es el elemento que se pretende optimizar con la futura implementación del sistema de transporte masivo.

Como resultado de este proceso se determinaron los perfiles horarios de velocidad de marcha y recorrido para todas las intersecciones como se muestran en las Figuras 4-15 y 4-16.

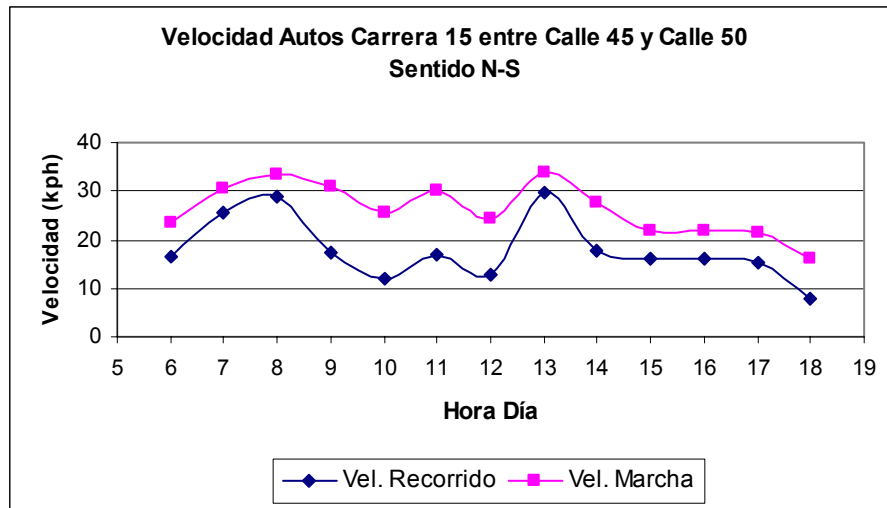


Figura 4-15: Variación de la Velocidad de los Autos en la Cra 15 entre Calle 45 y Calle 50 Sentido N-S

Fuente: Autores

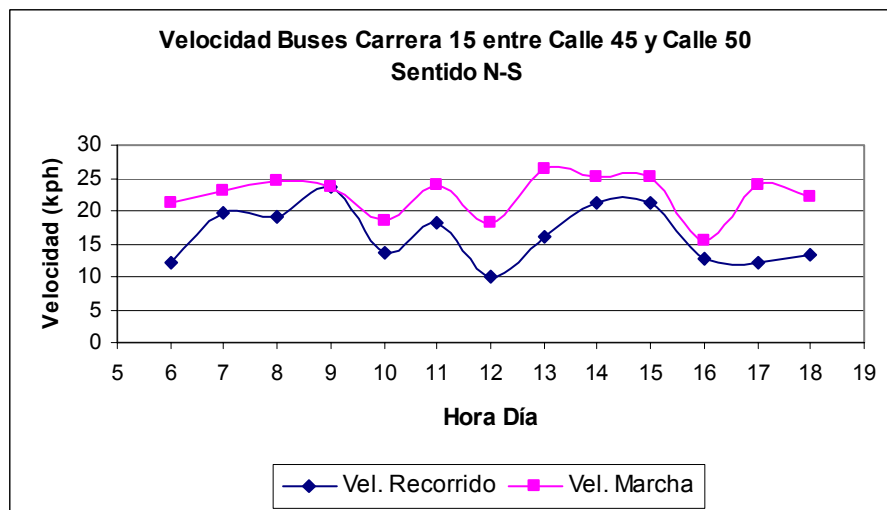


Figura 4-16: Variación de la Velocidad de los Buses en la Cra 15 entre Calle 45 y Calle 50 Sentido N-S

Fuente: Autores

Al conocer la velocidad de los diferentes tramos, se procedió a ponderarla con base en la composición vehicular, información obtenida de los conteos de tráfico hechos por la empresa Siemens<sup>89</sup> a la Dirección de Tránsito de Bucaramanga en el año 2002. La ponderación se hizo, convirtiendo los autos, buses y camiones a vehículos equivalentes, con el fin de incluir los efectos de la composición de la flota y no darle el mismo peso a todas las clases vehiculares.

La velocidad asignada a los camiones por su baja presencia, se asumió igual a la de los buses, consideración que no altera significativamente el resultado, que se obtiene de la siguiente forma,

$$V_{\text{Ponderada}} = ((V_a * A) + (V_b * FE_b * B) + (V_b * FE_c * C)) / VE \quad (4.7)$$

Donde,

**V<sub>a</sub>** = Velocidad de los Autos (Flota A)

**V<sub>b</sub>** = Velocidad de los Buses (Flota B)

**A** = Volumen de Autos

**B** = Volumen de Buses

**C** = Volumen de Camiones

**FE<sub>b</sub>** = Factor de Equivalencia Buses (2)

**FE<sub>c</sub>** = Factor de Equivalencia Camiones (2.5)

**VE** = Número de Vehículos Equivalentes ( A + FE<sub>b</sub> \* B + FE<sub>c</sub> \* C)

En la Tabla 4-10 se muestra el ejemplo de la ponderación de la velocidad para un sentido en particular. La variación horaria se ilustra en la Figura 4-17.

---

<sup>89</sup> SIEMENS. Actualización, implementación y puesta en funcionamiento del planeamiento de tráfico en función del tiempo y del tráfico para la ciudad de Bucaramanga. Bucaramanga. 2002. Código: INFBU0301.301

Hora	TIPO DE VEHICULO			Veh Equiv	Velocidad		
	A	B	C		Auto	Bus/Camion	Ponderada
6	242	160	2	567	43	26	34
7	287	171	1	632	52	28	39
8	239	219	1	680	49	29	36
9	183	294	1	774	43	29	32
10	318	334	6	1001	38	26	30
11	424	291	2	1011	35	24	29
12	232	159	1	553	36	29	32
13	658	269	9	1219	43	26	35
14	578	268	5	1127	34	26	30
15	603	269	7	1159	41	26	34
16	616	268	4	1162	41	15	29
17	652	264	5	1193	24	17	21
18	657	231	7	1137	23	30	26

Tabla 4-10: Ponderación de la Velocidad para las condiciones Actuales en Carrera 15 entre Calle 45 Y Calle 50, Sentido N-S

Fuente: Autores

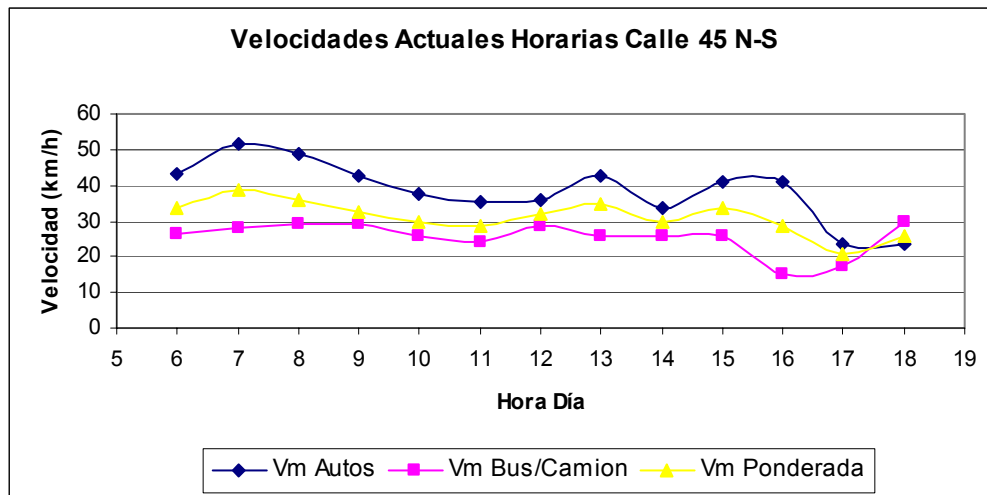


Figura 4-17: Variación de la Velocidad bajo las condiciones Actuales en la Cra 15 entre Calle 45 y Calle 50, Sentido N-S

Fuente: Autores

La velocidad ponderada al introducir el SITM en la carrera 15 se calcula dejando iguales los valores empleados anteriormente para los autos y los camiones y reemplazando la velocidad de los buses por la de los nuevos

vehículos que implementará el sistema, la cual es de 25 Km/h<sup>90</sup>. La velocidad de las vías alimentadoras (Calle 36, 45, 50, 56 y Qda. Seca) se conservan igual por lo que en estas no operan los nuevos vehículos. En la Tabla 4-11 se presenta un ejemplo de la nueva ponderación.

Hora	TIPO DE VEHICULO			Veh Equiv	Velocidad			
	A	B	C		Auto	Metrolinea	Camion	Ponderada
6	242	45	2	337	43	25	26	38
7	287	45	1	380	52	25	28	45
8	239	33	1	308	49	25	29	44
9	183	44	1	274	43	25	29	37
10	318	50	6	433	38	25	26	34
11	424	62	2	553	35	25	24	33
12	232	62	1	359	36	25	29	32
13	658	43	9	767	43	25	26	40
14	578	23	5	637	34	25	26	33
15	603	29	7	679	41	25	26	39
16	616	37	4	700	41	25	15	39
17	652	58	5	781	24	25	17	24
18	657	93	7	861	23	25	30	24

Tabla 4-11 Ponderación de la Velocidad para las condiciones futuras (SITM) en Cra 15 entre Calle 45 Y Calle 50, Sentido N-S

Fuente: Autores

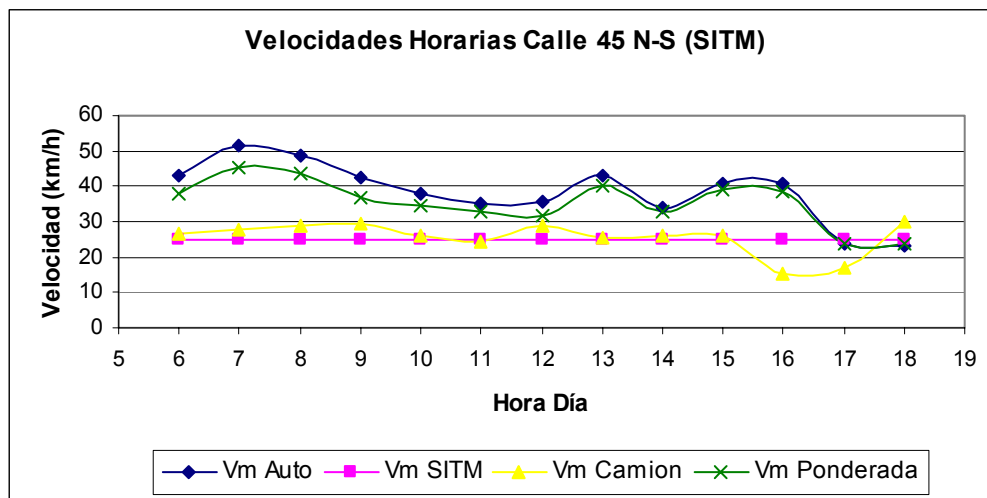


Figura 4-18: Variación de la Velocidad bajo las condiciones futuras (SITM) en la Cra 15 entre Calle 45 y Calle 50, Sentido N-S

Fuente: Autores

<sup>90</sup> SIEMENS. Op. cit

#### 4.2.3.14. Patrones de encendidos o arranques

Al igual que los comportamientos de conducción, las arrancadas presentan una distribución en función del tiempo que duran los vehículos detenidos o más específicamente apagados, este tiempo se conoce como Soak Time.

Para las arrancadas<sup>91</sup> en frío es decir cuando el vehículo ha estado detenido por mas de 18 horas, las emisiones son mayores debido a que el motor debe alcanzar la temperatura óptima de funcionamiento, al igual que los sistemas de control de emisiones. Por su parte una arrancada en caliente se considera cuando el vehículo ha sido apagado durante menos de 5 minutos, generando emisiones menores.

Con el fin de incluir los efectos de la emisiones generados por las arrancadas de los vehículos se emplean unos dispositivos conocidos como VOCE (Empadronador de las Características de Ocupación de los Vehículos) que permiten caracterizar este comportamiento, estos se conectan directamente al enchufe del encendedor de cigarrillos y almacenan el voltaje del vehículo segundo a segundo, siendo este un indicador de cuando el auto esta siendo operado y cuando esta detenido.

En la Figura 4-19 se puede observar la imagen de un VOCE y su ubicación dentro del vehículo.

#### 4.2.3.15. Totales

Muestran la suma de las distribuciones de comportamiento y de encendidos, la cual debe ser de 100 % para cada una.

---

<sup>91</sup> Una arrancada es el evento en que un vehículo es encendido luego de haber sido apagado completamente.



*Figura 4-19: Dispositivo VOCE usado en la determinación de la distribución de los tiempos que demoran los vehículos apagados*

*Fuente: IVE User's Manual*

#### 4.2.3.16. Menú Archivo (FILE)

Permite crear y grabar archivos de localidad. Estos archivos de localidad se pueden crear a través de la interfase del modelo o mediante una plantilla en Excel, que permite de una manipulación mas simple de los datos, el archivo creado a través de esta vía debe ser exportado como archivo de texto delimitado por tabulaciones a la carpeta del modelo.

#### 4.2.4. Módulo de Distribución de la Flota Vehicular (Fleet File)

Al momento de hacer una estimación de las emisiones vehiculares, es indispensable conocer cómo esta conformada la flota circulante, debido a que no todos los vehículos contaminan igual.

Este aspecto es tenido en cuenta a través de este módulo, el cual se presenta como una lista de 1372 tecnologías o tipos de vehículos, en las que se introducen la fracción de viaje para cada uno, es decir la participación de determinada clase vehicular en una flota dada.

La interfase gráfica de éste módulo se puede apreciar en la Figura 4-20, en donde se señalan la ubicación de los datos de entrada.

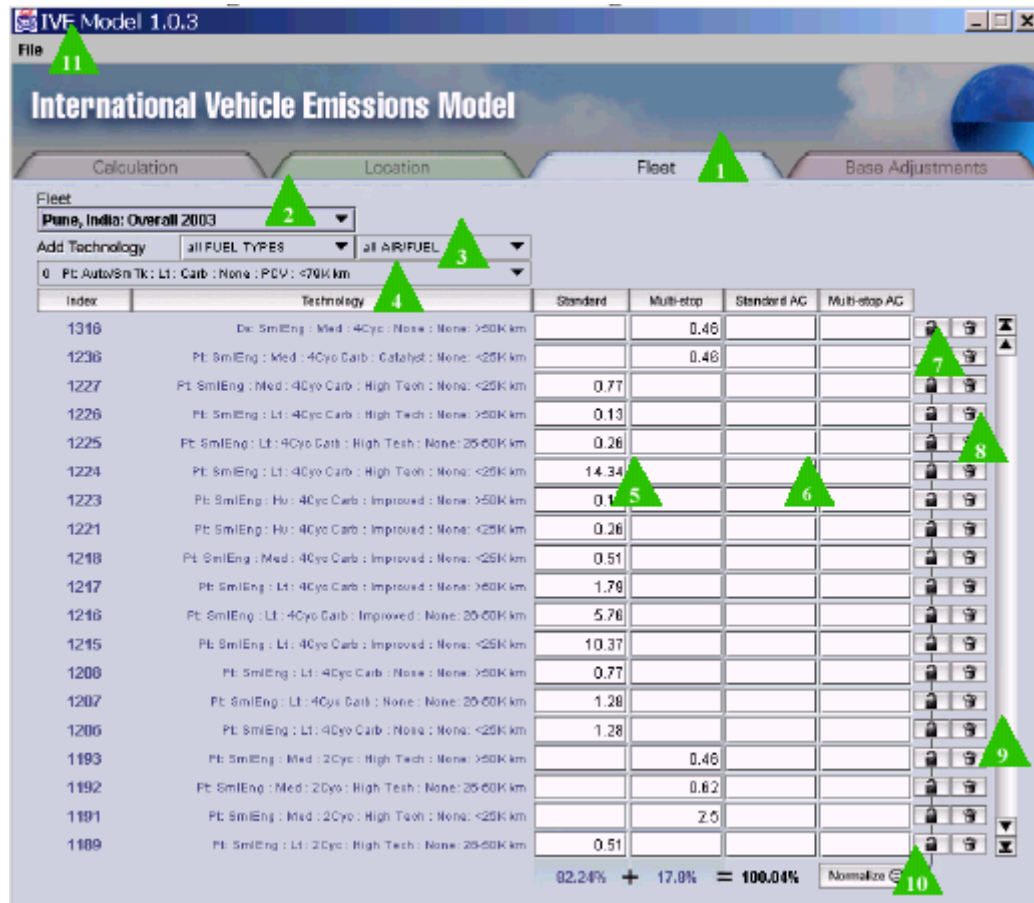


Figura 4-20: Ventana del Módulo de Distribución de la Flota Vehicular

Fuente: IVE User's Manual

La clasificación de los vehículos se hace mediante los siguientes parámetros,

- Tipo del Vehículo y Servicio (auto, taxi, camión, bus, buseta etc.)
- Tamaño del motor
- Tipo de combustible (Gasolina, diesel, gas natural etc.)
- Kilometraje Recorrido por vehículo KRV (edad)
- Sistema de Alimentación de Combustible (carburador, inyección etc.)

- Control de emisiones evaporativas (PCV)
- Control de emisiones de escape (EGR, Convertidor Catalítico)

A continuación se describe el proceso implementado en la determinación de las tecnologías presentes en las flotas vehiculares que circulan en la zona de estudio. Para esta labor, en primera instancia se realizó un reconocimiento de las diferentes tecnologías presentes en los vehículos registrados en el AMB y posteriormente se realizó la asignación de estas a las diferentes intersecciones del dominio, con base a los volúmenes vehiculares suministrados por la Dirección de Tránsito de la ciudad y a una muestra de la composición tomada in situ, a la cual se hará referencia posteriormente.

#### 4.2.4.1 Distribución del parque automotor

Como primer paso en la determinación de los parámetros requeridos para la identificación de las tecnologías que se presentan en el dominio del estudio, fue necesario conocer el número de vehículos y algunas de sus características (línea, modelo, cilindraje, servicio y peso entre otras). Esta información fue obtenida de las diferentes direcciones de tránsito en el Área Metropolitana de Bucaramanga AMB (Bucaramanga, Floridablanca, Piedecuesta y Girón) y que se sintetiza en Tabla 4-12.

En la Tabla 4-12 se puede observar la distribución por modelo de la flota vehicular en el AMB, llegando a la conclusión que es una flota antigua, aspecto que tiene gran incidencia sobre las emisiones ya que los motores y los sistemas de control de emisiones de los vehículos se encuentran más deteriorados.

MODELO	AUTOMOVILES			CAMIONES LIVIANOS PESO < 6000 LBS			CAMIONES LIVIANOS ENTRE 6000 Y 8500 LBS			CAMIONES PESADOS PESO > 8500			BUSES, MICROS Y BUSETAS			MOTOS		
	PAR	PUB	OFI	PAR	PUB	OFI	PAR	PUB	OFI	PAR	PUB	OFI	PAR	PUB	OFI	PAR	PUB	OFI
1979	14428	181	124	5263	100	60	1445	560	12	1334	2225	64	382	618	13	4726	6	12
1980	2103	41	8	581	3	8	80	40	1	80	246	27	14	77	1	1814	0	8
1981	1886	13	14	446	1	2	80	28	3	54	87	24	20	84	0	557	0	5
1982	2308	19	5	630	3	15	57	21	0	53	50	3	11	52	1	1162	0	2
1983	1660	32	5	410	4	7	38	12	2	22	26	1	7	39	1	1374	0	11
1984	1409	21	9	405	3	12	30	20	1	33	39	28	5	188	0	969	0	18
1985	1746	36	6	366	0	3	32	10	1	9	27	5	4	58	1	350	0	8
1986	1457	41	4	442	2	4	47	6	3	8	53	2	1	26	0	339	0	8
1987	1716	41	6	428	1	6	46	13	2	11	77	10	0	50	0	342	0	7
1988	2050	140	15	414	10	9	59	12	3	14	105	13	2	66	0	591	0	20
1989	1703	135	25	321	11	13	39	19	2	15	54	32	1	94	3	713	1	8
1990	1501	127	8	390	20	8	29	14	1	5	49	12	0	65	1	1052	0	19
1991	1279	270	18	343	22	8	13	16	3	10	14	4	1	56	0	1023	2	9
1992	1473	801	11	359	27	3	19	23	1	16	43	1	1	122	2	1680	0	6
1993	2995	1201	17	747	234	13	62	100	1	14	285	11	3	246	0	2730	2	31
1994	3832	601	60	985	489	30	79	223	6	34	295	12	5	224	4	4274	0	41
1995	3930	590	30	1119	665	50	68	382	2	9	359	5	5	136	0	6055	0	61
1996	3322	722	21	999	369	51	90	300	6	15	129	6	2	47	0	6609	2	21
1997	3451	878	34	1180	242	44	58	177	7	12	126	2	3	119	1	6015	0	18
1998	4230	555	15	1252	436	12	28	160	6	14	227	1	0	135	0	6324	1	21
1999	1363	248	8	357	161	10	8	38	0	1	59	0	0	66	0	3107	0	59
2000	1686	225	5	283	157	14	3	23	0	5	33	1	0	205	2	1851	0	7
2001	1619	331	2	245	177	6	1	20	0	1	24	0	0	109	0	1953	0	29
2002	2214	542	7	191	121	4	1	57	0	1	56	0	0	202	0	2326	0	23
2003	2129	626	0	311	91	5	3	79	0	1	74	1	0	107	0	1779	1	2
Totales	67490	8417	457	18467	3349	397	2415	2353	63	1771	4762	265	467	3191	30	59715	15	454

Tabla 4.12 Composición del parque automotor circulante en el Área Metropolitana de Bucaramanga hasta Julio de 2003

Fuente: Direcciones de Tránsito de los municipios del área metropolitana y Autores

En las Figuras 4-21 a 4-24 se puede apreciar la distribución de las diferentes categorías según el modelo. Como se puede observar, la flota registrada es bastante antigua.

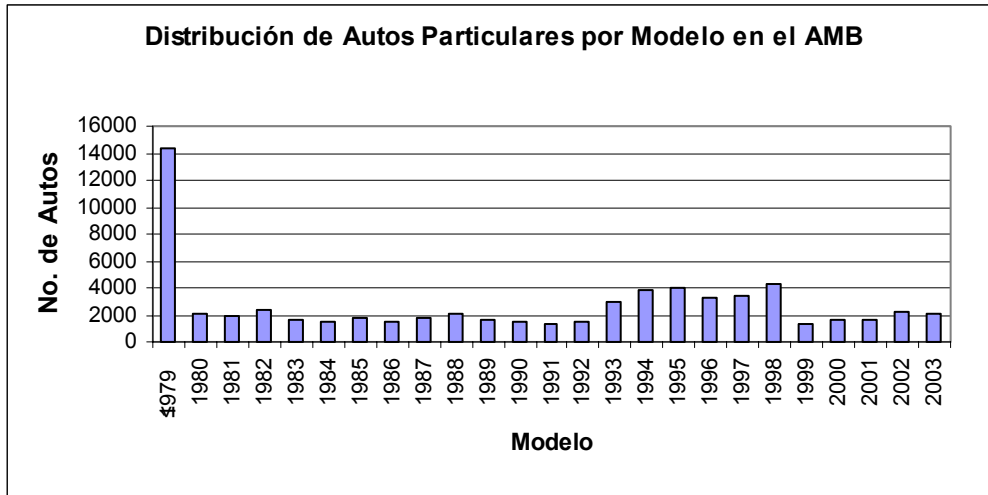


Figura 4-21: Distribución de Autos Particulares por Modelo en el Área Metropolitana de Bucaramanga  
Fuente: Autores

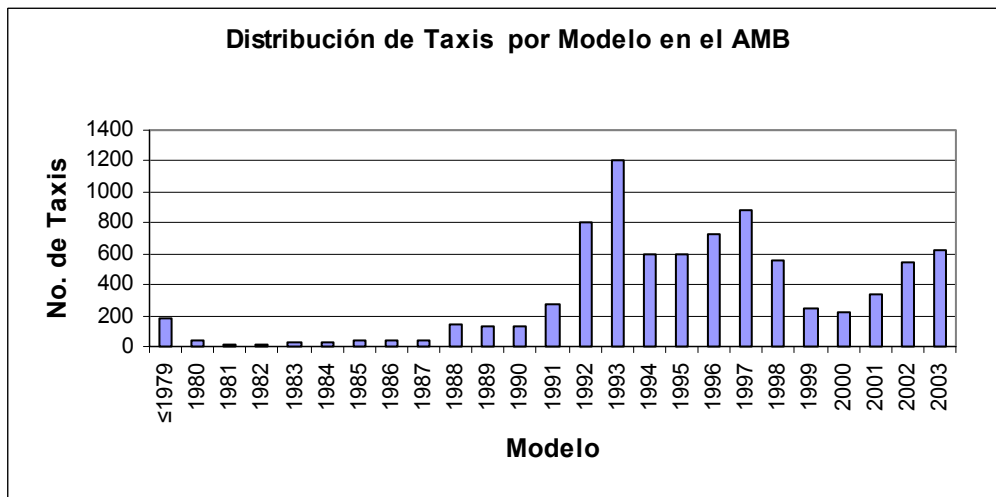


Figura 4-22: Distribución de Taxis por Modelo en el Área Metropolitana de Bucaramanga  
Fuente: Autores

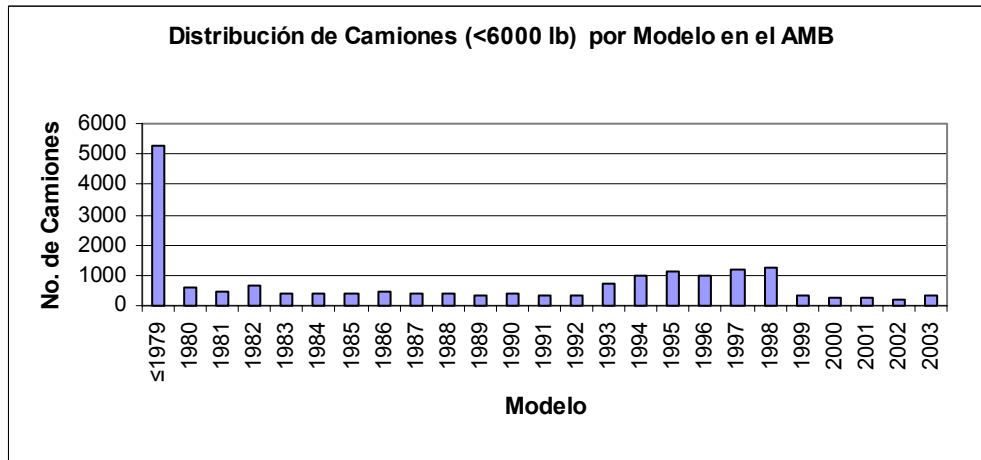


Figura 4-23: Distribución de Camiones por Modelo en el Área Metropolitana de Bucaramanga  
Fuente: Autores

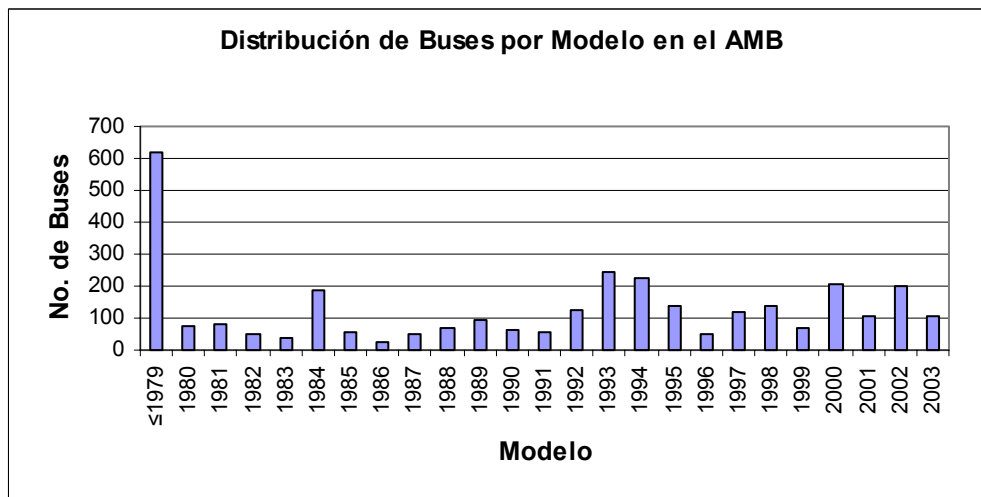


Figura 4-24: Distribución de Buses por Modelo en el Área Metropolitana de Bucaramanga  
Fuente: Autores

“La edad promedio ponderada de la flota de buses es de 18 años, mientras que la de busetas y microbuses es apenas de cinco años, lo que representa

para el conjunto de la flota una media de 11 años aproximadamente<sup>92</sup>. Con los vehículos de transporte público colectivo se presenta una situación importante debido a que la tendencia en los últimos años es la de reemplazar los vehículos de mayor capacidad por otros de menor (Buses por Busetas).

“Esta situación no es exclusiva de Bucaramanga sino también se presenta en la generalidad de las ciudades colombianas, tal como lo demuestran los datos del DANE. En el caso de Bucaramanga el parque de buses disminuye mientras aumenta significativamente el de busetas y microbuses, en 1993 la participación porcentual en la flota por tipo de vehículos era de un 85.3% de buses 10.7 % de busetas y cerca del 4% en microbuses. En el 2003, los buses representan apenas el 43.6% de la flota, mientras que las busetas aumentan su participación al 41.6%. Los microbuses mantienen su participación en cerca del 4%.”<sup>93</sup>

Como consecuencia de lo anterior, se presenta una disminución de la capacidad media de la flota. Como es de esperarse, esta situación tiene efectos negativos sobre el tránsito, ya que de atenderse la demanda con vehículos de mayor capacidad se reduciría la congestión y el riesgo de accidentes. Por otra parte, en las actuales condiciones de prestación del servicio de transporte público colectivo, se consume más combustible y se incrementa la emisión de gases tóxicos.

Este incremento de buses de menor capacidad en la flota de servicio público, se observa en Figura 4-25.

---

<sup>92</sup> SIEMENS. Op. cit.

<sup>19</sup> Ibid.

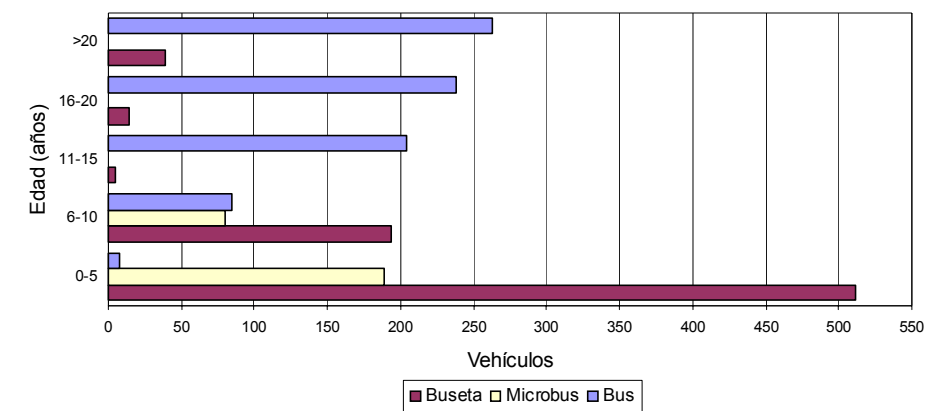


Figura 4-25: Edad de la Flota de Transporte Público Colectivo

Fuente: SAIP Ltda.

#### 4.2.4.2. Tipo de Vehículo y Servicio

Las clases vehiculares que se tuvieron en cuenta para esta investigación, se agruparon como aparece en la Tabla 4-13.

Tipo	Descripción
Auto	Automóviles, Camperos y Camionetas de servicio particular u oficial
Taxi	Automóviles de Servicio Público
Bus	Servicio Público colectivo
Busetas y Micros	Servicio Público colectivo
Camión	Camiones Livianos y Volquetas
METROLÍNEA	Vehículos del SITM

Tabla 4-13: Clases Vehiculares incluidas en la investigación

Fuente: Autores

Los tipos incluidos en esta clasificación se deben, a que para estos se cuenta con la información de tráfico en las diferentes intersecciones analizadas y también a que son los que mayor presencia tienen en el dominio, información obtenida de las bases de datos suministradas por las direcciones de tránsito.

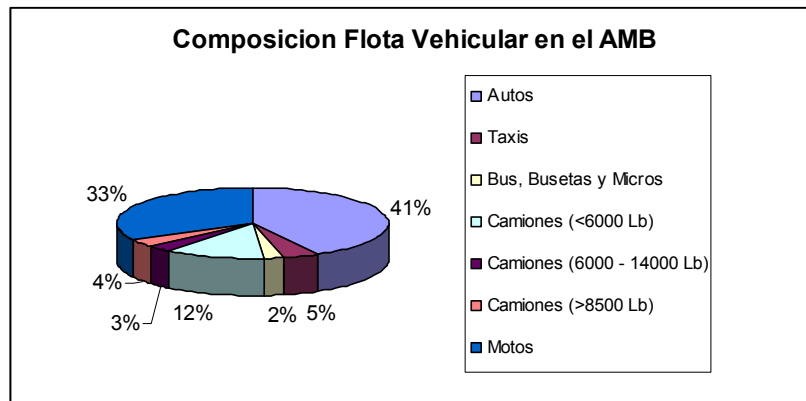


Figura 4-26: Composición Flota Vehicular en el Área Metropolitana de Bucaramanga

Fuente: Autores

Los conteos de tráfico fueron realizados por la empresa Siemens en el año 2002<sup>94</sup> e incluyen información cada 15 minutos desde la 6 AM hasta las 8 PM para autos (A), buses (B) y camiones (C), por lo que es necesario agrupar estos valores por horas, para el periodo de estudio (6 AM a 7 PM). Luego, hay que distribuirlos en las categorías incluidas en la Tabla 4-13 mediante la implementación de un muestreo, que se explicará mas adelante.

Categorías como motos y tractocamiones no se tuvieron en cuenta debido a la falta de información sobre estos y para el caso de los segundos a su baja presencia.

En la anterior clasificación se puede observar que se independiza el transporte público particular (taxis) y colectivo (buses) del privado con el fin

<sup>20</sup> SIEMENS. Op. cit.

de obtener la el aporte de cada uno de estos a la contaminación del aire, aspecto primordial al momento de analizar la implementación de un sistema de transporte masivo.

#### 4.2.4.3. Tamaño del Motor

Este dato se obtuvo a partir de la información suministrada por las Direcciones de Tránsito del AMB, que a su vez contribuye a la caracterización del parque vehicular. Esta información se procesó para acomodarlas a las categorías incluidas en el modelo, como se observa en la Tabla 4-14.

<b>Categoría</b>	<b>LDV</b>	<b>HDV</b>
Light	< 1500 cc	< 9000 Lb
Medium	1500 a 3000 cc	9000 a 14000 Lb
Heavy	> 3000 cc	> 14000 Lb

*Tabla 4-14 Tamaños del motor incluidos en el modelo*

*Fuente: IVE User's Manual*

Donde LDV (Light Duty Vehicles) se refiere a los vehículos livianos como los autos, taxis camperos y camionetas, mientras que HDV (Heavy Duty Vehicles), se refiere a los vehículos como buses, busetas, camiones, tracto-camiones y volquetas.

En esta categoría, los buses actuales y los del futuro SITM se clasificaron como Medium, las busetas y camiones como Light, y los tracto-camiones y volquetas como Heavy, estos últimos como se mencionó anteriormente no se incluyeron dentro de las flotas que circulan en la zona.

#### 4.2.4.4. Tipo de combustible

Con el propósito mundial por la conservación y protección del medio ambiente, los combustibles han evolucionado notablemente, presentando alternativas con mayor eficiencia y con un menor impacto en la contaminación del aire. Los combustibles incluidos en el modelo son:

- Gasolina
- Diesel (ACPM)
- Etanol
- GN (Gas Natural)
- Propano

Los tipos de combustibles usados por los vehículos que circulan en el AMB son la gasolina, principalmente por los vehículos particulares, el ACPM por los buses y el Gas Natural por un creciente número de taxis. Éste último se presenta como una alternativa reciente en la región y cuyo uso día a día aumenta notablemente tanto por sus beneficios económicos como ambientales. (Ver Gráfica 4-27)

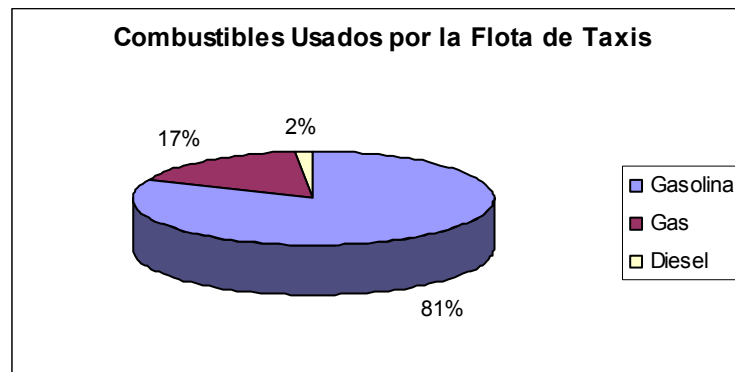


Figura 4-27: Combustible usados por la Flota de Taxis, en el Área Metropolitana de Bucaramanga

Fuente: Autores

La información sobre el tipo de combustible usado, el sistema de alimentación y los sistemas de control de emisiones, se obtuvieron de visitas hechas a los diferentes concesionarios de ciudad, en los cuales se solicitó cada uno de estos aspectos para las diferentes líneas y modelos de las marcas más significativas. Las casas automotrices con mayor participación tienen en el parque vehicular local, se identificaron previamente, a partir de la información suministrada por las direcciones de Tránsito del AMB.

Los concesionarios visitados fueron:

- Sanautos: Vehículos Renault
- Campesa: Vehículos livianos Chevrolet
- Codiesel: Vehículos pesados Chevrolet
- Mayorautos: Vehículos Mazda y Ford
- Autopalma: Vehículos Honda
- Distribuidora Hyundai
- Distoyota: Vehículos Toyota
- Distribuidora Nissan
- Autoriente: Vehículos Mitsubishi

Para la obtención de la información referente a los buses se recurrió a la empresa Calibraciones Técnicas, que es la encargada del mantenimiento de los motores de estos vehículos en la ciudad.

Para los vehículos del futuro SITM, de acuerdo a las características de la región, tanto económicas como de infraestructura, el Diesel y el Gas Natural<sup>95</sup>, son los combustibles más convenientes a implementar.

---

<sup>95</sup> SIEMENS. Op. cit.

En la tecnología Diesel se han adelantado esfuerzos en materia de purificación y mejoramiento en la calidad de operación, esta labor se refleja en el consumo efectivo y en el nivel de emisiones contaminantes producidas.

El Gas Natural Comprimido es otra opción importante, considerando las ventajas ofrecidas, como la economía en el consumo, bajos costos de operación y mínimos niveles de emisiones de agentes contaminantes a la atmósfera. En la Figura 4-28 se describe le número de vehículos convertidos a Gas Natural, según tipo de vehículo.

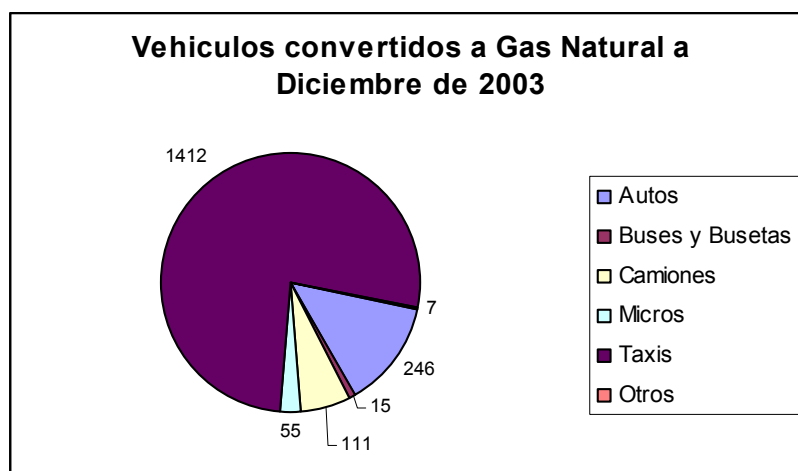


Figura 4-28: Composición por tipo, de los vehículos convertidos a Gas Natural  
Fuente: Bureau Veritas. Empresa certificadora de las conversiones a Gas

En la Tabla 4-15 se presenta una relación de las diferentes tipologías de combustible encontradas y se realiza una descripción de las principales ventajas y desventajas de cada tipo de sistema.

Tipología	Principales Ventajas	Principales Desventajas
<b>Tecnología Diesel Avanzada (Estándares EURO)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Menores emisiones de NOx, PM, CO y HC.</li> <li>○ Tecnología ampliamente probada en Sistemas de Transporte Masivo por Buses.</li> <li>○ Infraestructura para la distribución de combustible bien desarrollada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Baja calidad de combustibles producidos y disponibles en Colombia.</li> </ul>
<b>GNC (Gas natural Comprimido)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Bajas emisiones de NOx, PM y CO.</li> <li>○ Bajos costos de combustible.</li> <li>○ Utilización Esencial de combustible libre de azufre.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Mayores Costos de Capital en comparación con la tecnología Diesel.</li> <li>○ Infraestructura de combustible menos desarrollada.</li> <li>○ Poca experiencia en operación y mantenimiento. (Para el caso específico del AMB, este tipo de tecnología ha tenido bastante acogida, lo que puede convertirse quizá en una ventaja)</li> <li>○ Menor autonomía de operación con respecto al Diesel, lo cual puede ser resuelto aumentando la capacidad de almacenamiento de combustible con el incremento del peso vehicular.</li> <li>○ Mayores emisiones de HC (Especialmente Metano)</li> </ul>
<b>LPG (Gas de Petróleo Líquido)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Bajas emisiones de NOx, PM y CO.</li> <li>○ Bajos costos de combustible.</li> <li>○ Utilización Esencial de combustible libre de azufre.</li> <li>○ Mayor vida útil del motor.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Mayores Costos de Capital en comparación con la tecnología Diesel.</li> <li>○ Infraestructura de combustible menos desarrollada.</li> <li>○ Poca experiencia en operación y mantenimiento.</li> <li>○ Menor autonomía de operación con respecto al Diesel.</li> </ul>
<b>Etanol</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Bajas emisiones de PM y NOx.</li> <li>○ Utilización Esencial de combustible libre de azufre.</li> <li>○ La reutilización del combustible significa menores emisiones de gases invernadero e independencia ante recursos como el petróleo y su posible importación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Requiere mayores volúmenes de combustible.</li> <li>○ Baja confiabilidad técnica.</li> <li>○ Poca experiencia en operación y mantenimiento.</li> <li>○ Mayores Costos de Capital en comparación con la tecnología Diesel.</li> <li>○ Potencialidad de problemas con la implantación de la infraestructura de combustible requerida.</li> <li>○ Costos de combustible variables, poco confiables y dependientes de la agricultura.</li> </ul>

<b>Eléctrico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Producción nula de emisiones contaminantes</li> <li>○ Utilización de energía renovable.</li> <li>○ Mayor eficiencia energética durante la operación.</li> <li>○ Recuperación de la energía cinética mediante metodologías de regeneración durante el frenado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Costos capitales muy altos.</li> <li>○ Menor autonomía de operación.</li> <li>○ Tiempo de recarga de baterías extensor.</li> <li>○ Incremento de peso en los vehículos de la flota.</li> <li>○ Problemas potenciales generados por emisiones en la producción de electricidad.</li> <li>○ Poca experiencia en operación y mantenimiento.</li> <li>○ Emisiones de SOx potencialmente mayores.</li> </ul>
<b>Híbrido Diesel Eléctrico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Reducción potencial en el consumo de combustibles y en emisiones.</li> <li>○ Potencialidad de operación bajo modos de cero emisiones contaminantes.</li> <li>○ Recuperación de la energía cinética mediante metodologías de regeneración durante el frenado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Costos capitales y de mantenimiento muy altos.</li> <li>○ Incremento de peso y consecuente consumo adicional de energía.</li> <li>○ Sistemas duales de operación pueden requerir procedimientos de mantenimiento adicionales.</li> <li>○ Poca experiencia en operación y mantenimiento.</li> </ul>
<b>Celdas de Combustible e Hidrógeno</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Alta eficiencia energética y potencial de utilización de energía renovable reduciendo así el ciclo de duración de contaminantes y de emisiones de gases tipo invernadero.</li> <li>○ Cero emisiones durante la operación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Costos capitales y de operación muy altos.</li> <li>○ Infraestructura subdesarrollada y aún en etapas de investigación y desarrollo.</li> </ul>
<b>Biodiesel</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ La reutilización del combustible significa menores emisiones de gases invernadero e independencia ante recursos como el petróleo y su posible importación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Costos de combustible variables, poco confiables y dependientes de la agricultura.</li> </ul>

*Tabla 4-15: Ventajas y Desventajas de los combustibles*

*Fuente: Página Web, <http://www.worldbank.org/wbi/cleanair/cailac/index.htm> Clean Air Initiative in Latin American Cities publicada por el Banco Mundial.*

#### 4.2.4.5. Kilometraje Recorrido por vehículo KRV (edad)

Este parámetro permite clasificar la flota según su actividad total expresada en el número kilómetros recorridos, lo que está directamente relacionado con la edad de los vehículos, aspecto que influye notablemente en las emisiones.

Para la determinación de estos valores se emplearon dos procedimientos independientes, uno para taxis y automóviles en general y otro para la determinación de la actividad anual de los buses y busetas.

Para los autos (automóviles, camionetas, camperos y camiones livianos) y taxis, se revisaron los registros del mantenimiento de una muestra de vehículos tomada en una de las agencias mas importantes de la ciudad que es CAMPESA S.A. quien representa a la marca Chevrolet. Esta cuenta con un amplio registro digital de los vehículos que acuden al mantenimiento, donde para cada entrada de los vehículos al taller se registra la fecha y la lectura del odómetro correspondiente.

La determinación del tamaño de la muestra se realizó como aparece en la ecuación 4.8:<sup>96</sup>

$$N = (Z^2 * \sigma_x^2) / e^2 \quad (4.8)$$

Donde,

***N*** = *Tamaño de la Muestra*

***Z*** = *Valor Obtenido de la distribución normal para un nivel de confianza deseado (95%).*

**$\sigma_x$**  = *Desviación Estándar de la población*

***e*** = *Error Muestral permitido*

La desviación estándar de la población ( $\sigma_x$ ) se puede determinar a partir de:

- Una muestra Piloto o estudio previo

---

<sup>96</sup> BERENSON, Mark L. y LEVINE, David N. Estadística Básica en Administración. México: Prentice Hall, 1992 p. 344

- Como el cociente entre el rango de los datos sobre 6, esto suponiendo una variable de distribución normal

En nuestro caso los valores para la desviación estándar de la población, se tomaron del estudio “*Evaluación de tres modelos de dispersión Gaussiana para la simulación de contaminación por monóxido de carbono en Bucaramanga*” realizado por los ingenieros Manuel Amaya y Andrés Martín en 1998.

El error muestral no se refiere al error que se quiere tener en la estimación, sino al que se puede aceptar y aun estar en posibilidades de proporcionar conclusiones adecuadas. Se define como la diferencia entre la media poblacional y la media muestral. El valor tomado para objeto de esta investigación corresponde a una fracción menor del 10% de la media de la muestra piloto.

El nivel de confianza seleccionado fue del 95 % al que corresponde un  $Z = 1.96$ , estos datos y los respectivos tamaños para las muestras se encuentran en la Tabla 4-16

Datos	Autos	Taxis	Buses
Nivel de Confianza	95	95	95
Z	1.96	1.96	1.96
Error Admisible	1500	4000	3000
Desviacion Estandar Piloto	11970	31746	24653
Media Aritmetica Piloto	19470	74657	37650
Tamaño Muestra	245	242	259

*Tabla 4-16: Determinación del tamaño de la muestra para la obtención de la actividad vehicular*

*Fuente: Autores*

El tamaño estimado de la muestra se refiere al número de registros que se deben inspeccionar, cada uno de estos contiene las fechas de entrada del

vehículo al taller y el kilometraje acumulado, calculando así los kilómetros que recorre cada uno en un año.

Este método tiene el inconveniente de no ser muy representativo de toda la flota vehicular, pues la mayoría de vehículos que se revisaron son modelos nuevos vendidos en los últimos dos años, por lo que se asumió que todos los vehículos de una misma clase (taxi, automóvil particular, etc.), sin importar su modelo, recorren los mismos kilómetros al año.

La Tabla 4-16 incluye un tamaño de muestra estimado para los buses, sin embargo la actividad vehicular se estos se determinó con base a otro método que se expone posteriormente.

Para el análisis estadístico de los datos obtenidos en CAMPESA se realizó el siguiente procedimiento:

1. Organizar todos los datos recolectados y eliminar aquellos datos que no representaban un periodo significativo de circulación. Se tomó como período mínimo representativo una semana.
2. Distribuir todos los datos válidos en las siguientes categorías: autos y taxis.
3. Calcular para cada vehículo la acumulación anual de kilometraje, como aparece en la ecuación 4.9

$$A_{\text{vehículo}} = \Delta L_t / \Delta t * 365 \quad (4.9)$$

Donde:

$A_{\text{vehículo}}$  = Acumulación de kilómetros por vehículo al año (Km/año)

$\Delta L_t$  = Diferencia entre los valores leídos en el odómetro al final y al inicio del intervalo  $t$  (Km.)

$\Delta t$  = Intervalo de tiempo transcurrido entre las revisiones vehiculares (días)

4. Determinar el promedio de kilómetros recorridos al año por categoría vehicular, para esto se calculó la media acotada de los valores. La media acotada permite descartar un determinado porcentaje de valores extremos de la muestra (en este caso se descartó el 20%.)

$$A_{\text{categoría}} = \frac{\sum A'_{\text{vehículo}}}{N'} \quad (4.10)$$

$A_{\text{categoría}}$  = Acumulación por categoría vehicular al año (Km/año)

$A'_{\text{vehículo}}$  = Acumulación acotada por vehículo al año (Km/año)

$N'$  = Número acotado de vehículos de la muestra

Los resultados de este proceso se muestran a en la Tabla 4-17:

Parametro	Valores en Km / año	
	Autos	Taxis
Tamaño Muestra	245	242
Valor Maximo	144436	300459
Valor Minimo	2137	12085
Media Aritmetica	19679	93501
Desviación:	15316	47298
Media acotada	17568	90885

Tabla 4-17: Promedios de Actividad Vehicular para autos y Taxis

Fuente: Autores

El método empleado para estimar los kilómetros que recorren al año los buses, microbuses y busetas se fundamenta en el hecho de que estos siempre recorren las mismas rutas, las cuales tiene longitudes definidas.

Para este fin se utilizó la información suministrada por el Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB) por medio de Ciudad Digital, en la cual se identificaron las diferentes rutas que circulan en el área metropolitana de la ciudad, la longitud y duración de cada recorrido y la frecuencia con que salen estos vehículos. Con estos datos fue posible determinar el número de kilómetros promedio que recorren los buses para una determinada ruta al año. Finalmente, se obtuvo un promedio ponderado de los kilómetros anuales recorridos por estos vehículos, según las ecuaciones 4.11 y 4.12:

$$A_{RUTA} = (C_{RUTA} * L_{RUTA}) * 300 \quad (4.11)$$

$$A_{FINAL} = \frac{\sum (A_{RUTA} * N_{RUTA})}{N_{TOTAL}} * F \quad (4.12)$$

$C_{RUTA}$  = Número de ciclos que realiza un bus de cada ruta por día

$L_{RUTA}$  = Longitud de la ruta

$A_{FINAL}$  = Acumulación anual de kilometraje para buses, microbuses y busetas de servicio público

$A_{RUTA}$  = Acumulación de kilometraje por vehículo en cada ruta

$N_{RUTA}$  = Número de vehículos por ruta

$N_{TOTAL}$  = Número de vehículos totales en la muestra

$F$  = Factor adimensional positivo por circulación en días no laborales (en este caso fue de 1.2)

Como resultado de este proceso se obtuvo un valor promedio de 113,917 Km. /año para la flota de buses.

Al conocer la tasa de acumulación anual de kilómetros por clase vehicular (auto, taxi, bus) obtenida como resultado del anterior procedimiento y la distribución por modelos, obtenida de los datos suministrados por las direcciones de tránsito, se puede calcular la edad de cada clase expresada en kilómetros.

En la Tabla 4-18 se describe la clasificación por de edad de cada categoría vehicular, según el modelo del vehículo.

Categoría Modelo	Clase Vehicular			
	Autos	Taxis	Buses	Camiones
Joven (< 79000 km)	>= 2000	2003	2003	>= 2000
Medio (79000 - 161000 km)	1996 - 2000	2001 - 2002	2002	1996 - 2000
Viejo (> 161000)	< 1996	<= 2000	<= 2001	< 1996

*Tabla 4-18: Clasificación por edad, de los tipos vehiculares seleccionados*

*Fuente: Autores*

La edad de los vehículos que se van a emplear en el futuro SITM va estar dentro de la categoría joven, puesto que los vehículos propuestos para este son nuevos. Estos buses serán de tipo padrón con capacidad para 100 pasajeros. (Ver Figura 4-29)



*Figura 4-29: Vehículo modelo para el SITM METROLÍNEA*

*Fuente: SAIP Ltda.*

#### 4.2.4.6. Sistema de Alimentación de Combustible

Los sistemas de alimentación del combustible son los responsables de su atomización o pulverización, para facilitar su mezcla con el aire y así puedan reaccionar con el oxígeno contenido en este, generándose la energía necesaria para el movimiento de los vehículos.

Un sistema de alimentación defectuoso es aquel que no pulveriza adecuadamente el combustible, permitiendo que este entre a la cámara en forma líquida, inhibiendo el encendido de la mezcla y produciendo una combustión incompleta, principal responsable de las emisiones vehiculares.

A su vez, al presentarse una combustión incompleta el combustible sobrante se escapa por los anillos de los pistones lavándolos e incrementando su desgaste, luego cae al cárter donde contamina el aceite y afecta la lubricación total del motor.

Con base en este parámetro, se clasifica la flota según el nivel de tecnología de los vehículos, información obtenida de las visitas hechas a los diferentes concesionarios de las principales marcas en la ciudad.

Las alternativas incluidas en el modelo son:

- Inyección Multi-Punto (MPFI)
- Inyección Mono-Punto (SPFI)
- Carburador
- Pre-Cámara de Inyección
- Inyección directa
- Full Inyección

Los resultados de las visitas hechas se encuentran al final de este capítulo, en las Tablas 4.20 y 4.21, que contienen las tecnologías identificadas para el AMB y las empleadas por el futuro SITM.

#### 4.2.4.7. Control de emisiones evaporativas (PCV)

Las emisiones evaporativas corresponden al 40 % de las emisiones vehiculares, situación que ha motivado el desarrollo de controles para estas. El modelo incluye solo 2 alternativas para estos sistemas, las cuales son:

- Sin control de emisiones evaporativas, este valor se adopta para los vehículos que operan con ACPM como combustible.
- Vehículos con PCV (Positive Crankcase Ventilation) cuya función es la de extraer los gases de escape que se encuentran dentro del motor e introducirlos nuevamente en la cámara de combustión, para ser nuevamente quemados. Esta alternativa se adopta para los vehículos que operan con gasolina o gas natural como combustible.

#### 4.2.4.8. Control de emisiones de escape

Las emisiones de escape corresponden al 60% de las emisiones vehiculares, situación que ha generado el desarrollo de sistemas para su control a nivel mundial.

La identificación de estos sistemas en los vehículos que circulan en la ciudad se realizó mediante visitas hechas a los concesionarios, en las que se preguntó para las diferentes líneas y modelos de las respectivas marcas, sobre los controles empleados por estas.

Los principales sistemas de control de emisiones de escape son:

- **Convertidor catalítico (2 vías / 3 vías):** “su función es la de evitar la salida de los gases de escape a la atmósfera, generando en su interior una combustión a baja presión por reacciones químicas de sus componentes. Específicamente evita la salida de mas de un 90% de CO, HC y NOx”<sup>97</sup>  
El convertidor de 2 vías en realidad son dos convertidores es los que se realiza por independiente la oxidación del CO a CO<sub>2</sub> y la reducción del NO<sub>x</sub>, mientras que el convertidor de tres vías hace las funciones del anterior en una sola unidad.
- **Válvula EGR (Exhaust Gas Recirculation):** su principal función es la de reducir la cantidad de NO<sub>x</sub> que sale de la cámara de combustión.
- **Estándares de emisión EURO (I, II, III, IV):** estos se refieren al nivel de tecnología del vehículo, según los niveles máximos permitidos por la normatividad europea para emisiones vehiculares. Estos estándares establecen parámetros mas estrictos en forma progresiva, para el caso de los motores diesel la reducción en porcentaje para diferentes contaminantes se presentan en la Tabla 4-19.

Normativa	Exceso de emisiones en frío %				Factor en caliente %			
	NOx	HC	CO	Part.	NOx	HC	CO	Part.
Euro II	40	30	0	30	30	30	0	40
Euro III	58	51	35	51	51	51	45	64
Euro IV	79	76	55	76	76	76	56	84

*Tabla 4-19: Reducción en porcentaje de las emisiones en motores diesel*

*Fuente: Internet*

<sup>97</sup> DAMA, Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente. Cartilla Control de Emisión de Gases. Pág. 59

Como resultado de la determinación de los parámetros descritos anteriormente para los vehículos circulantes en el AMB, se obtuvieron las diferentes tecnologías presentes en la flota local la cuales se presentan en las Tablas 4-20 y 4-21.

**Tecnologías Identificadas en el AMB para los Autos Particulares**

Index	CLASE VEHICULAR	Fleet Type	Combusti	Weight	Air Fuel control	Exhaust	EDAD	% del Total Autos
2	Auto / Small Truck	Standard	Gasolina	Light	Carburador	None	Viejo	39.03
5	Auto / Small Truck	Standard	Gasolina	Medium	Carburador	None	Viejo	18.32
8	Auto / Small Truck	Standard	Gasolina	Heavy	Carburador	None	Viejo	10.43
117	Auto / Small Truck	Standard	Gasolina	Light	MPFI	3 vias	Joven	4.59
118	Auto / Small Truck	Standard	Gasolina	Light	MPFI	3 vias	Medio	4.45
122	Auto / Small Truck	Standard	Gasolina	Medium	MPFI	3 vias	Viejo	3.24
120	Auto / Small Truck	Standard	Gasolina	Medium	MPFI	3 vias	Joven	3.13
121	Auto / Small Truck	Standard	Gasolina	Medium	MPFI	3 vias	Medio	3.56
82	Auto / Small Truck	Standard	Gasolina	Light	SPFI	3 vias	Medio	1.92
81	Auto / Small Truck	Standard	Gasolina	Light	SPFI	3 vias	Joven	1.30
125	Auto / Small Truck	Standard	Gasolina	Heavy	MPFI	3 vias	Viejo	1.10
10	Auto / Small Truck	Standard	Gasolina	Light	Carburador	2 vias	Medio	1.07
1	Auto / Small Truck	Standard	Gasolina	Light	Carburador	None	Medio	1.07
119	Auto / Small Truck	Standard	Gasolina	Light	MPFI	3 vias	Viejo	0.81
127	Auto / Small Truck	Standard	Gasolina	Light	MPFI	3 vias / EGR	Medio	0.68
31	Auto / Small Truck	Standard	Gasolina	Medium	Carburador	3 vias	Medio	0.63
23	Auto / Small Truck	Standard	Gasolina	Medium	Carburador	2 vias / EGR	Viejo	0.59
124	Auto / Small Truck	Standard	Gasolina	Heavy	MPFI	3 vias	Medio	0.97
13	Auto / Small Truck	Standard	Gasolina	Medium	Carburador	2 vias	Medio	0.45
126	Auto / Small Truck	Standard	Gasolina	Light	MPFI	3 vias / EGR	Joven	0.30
4	Auto / Small Truck	Standard	Gasolina	Medium	Carburador	None	Medio	0.29
7	Auto / Small Truck	Standard	Gasolina	Heavy	Carburador	None	Medio	0.23
130	Auto / Small Truck	Standard	Gasolina	Medium	MPFI	3 vias / EGR	Medio	0.41
123	Auto / Small Truck	Standard	Gasolina	Heavy	MPFI	3 vias	Joven	0.25
14	Auto / Small Truck	Standard	Gasolina	Medium	Carburador	2 vias	Viejo	0.20
34	Auto / Small Truck	Standard	Gasolina	Heavy	Carburador	3 vias	Medio	0.17
11	Auto / Small Truck	Standard	Gasolina	Light	Carburador	2 vias	Viejo	0.15
110	Auto / Small Truck	Standard	Gasolina	Light	MPFI	None / EGR	Viejo	0.15
129	Auto / Small Truck	Standard	Gasolina	Medium	MPFI	3 vias / EGR	Joven	0.20
22	Auto / Small Truck	Standard	Gasolina	Medium	Carburador	2 vias / EGR	Medio	0.14
28	Auto / Small Truck	Standard	Gasolina	Light	Carburador	3 vias	Medio	0.11
109	Auto / Small Truck	Standard	Gasolina	Light	MPFI	None / EGR	Medio	0.08

100

*Tabla 4-20: Tecnologías Identificadas en el Área Metropolitana para los autos Particulares*

*Fuente: Autores*

Tecnologías Identificadas en el AMB

	Index	CLASE VEHICULAR	Fleet Type	Combustible	Weight	Air Fuel control	Exhaust	EDAD	% del Total
TAXIS	2	Auto / Small Truck	MultiStop	Gasolina	Light	Carburador	None	Viejo	46.88
	5	Auto / Small Truck	MultiStop	Gasolina	Medium	Carburador	None	Viejo	7.36
	122	Auto / Small Truck	MultiStop	Gasolina	Medium	MPFI	3 vias	Viejo	7.11
	218	Auto / Small Truck	MultiStop	Gas	Light	Carburador / Mixer	None	Viejo	6.41
	121	Auto / Small Truck	MultiStop	Gasolina	Medium	MPFI	3 vias	Medio	6.18
	83	Auto / Small Truck	MultiStop	Gasolina	Light	SPFI	3 vias	Viejo	3.81
	119	Auto / Small Truck	MultiStop	Gasolina	Light	MPFI	3 vias	Viejo	3.47
	125	Auto / Small Truck	MultiStop	Gasolina	Heavy	MPFI	3 vias	Viejo	2.21
	120	Auto / Small Truck	MultiStop	Gasolina	Medium	MPFI	3 vias	Joven	1.95
	245	Auto / Small Truck	MultiStop	Gas	Light	Carburador / Mixer	3 vias	Viejo	3.35
	8	Auto / Small Truck	MultiStop	Gasolina	Heavy	Carburador	None	Viejo	1.82
	118	Auto / Small Truck	MultiStop	Gasolina	Light	MPFI	3 vias	Medio	1.85
	124	Auto / Small Truck	MultiStop	Gasolina	Heavy	MPFI	3 vias	Medio	2.53
	221	Auto / Small Truck	MultiStop	Gas	Medium	Carburador / Mixer	None	Viejo	1.49
	244	Auto / Small Truck	MultiStop	Gas	Light	Carburador / Mixer	3 vias	Medio	1.34
	743	Auto / Small Truck	MultiStop	Diesel	Medium	Pre-Chamber Injection	None	Viejo	1.16
746	Auto / Small Truck	MultiStop	Diesel	Heavy	Pre-Chamber Injection	None	Viejo	1.08	
									100.00
CAMIONES	1073	Truck / Bus	Standard	Diesel	Light	Pre-Chamber Injection	None	Viejo	83.49
	1085	Truck / Bus	Standard	Diesel	Medium	Direct Injection	Improved	Viejo	13.72
	1117	Truck / Bus	Standard	Diesel	Light	Fuel Injection	Euro I	Medio	2.79
									100.00
BUS	1085	Truck / Bus	MultiStop	Diesel	Medium	Direct Injection	Improved	Viejo	100.00
									100.00
BUSETA	1127	Truck / Bus	MultiStop	Diesel	Light	Fuel Injection	Euro II	Viejo	36.04
	1073	Truck / Bus	MultiStop	Diesel	Light	Pre-Chamber Injection	None	Viejo	30.13
	1126	Truck / Bus	MultiStop	Diesel	Light	Fuel Injection	Euro II	Medio	16.10
	1117	Truck / Bus	MultiStop	Diesel	Light	Fuel Injection	Euro I	Medio	8.86
	1118	Truck / Bus	MultiStop	Diesel	Light	Fuel Injection	Euro I	Viejo	8.86
									100.00
METRO	1128	Truck / Bus	MultiStop	Diesel	Medium	FI	Euro II	Nuevo	0
	993	Truck / Bus	MultiStop	Gas	Medium	FI	3 Vias /EGR	Nuevo	100
									100

Tabla 4-21: Tecnologías Identificadas en el Área Metropolitana para los Taxis, Buses, Busetas, Camiones y METROLÍNEA

Fuente: Autores

Las principales características tecnológicas usadas para modelar la flota del Sistema de transporte masivo METROLÍNEA, se resumen en la Tabla 4-22.

MOTOR	
Posición	Trasero o entre ejes
Tecnología	Euro II
Potencia mínima	250 CV
Alimentación	Turbo Diesel o Gas Natural (GMV)

Tabla 4-22: Características Tecnológicas de los vehículos propuestos para el SITM

Fuente: SAIP Ltda.

#### 4.2.4.9 Asignación de las tecnologías identificadas a las flotas circulantes en las diferentes intersecciones

Luego de tener identificada la composición tecnológica de los vehículos registrados en el AMB, es necesario hacer su distribución para las diferentes intersecciones, con el fin de conocer como se reparte la actividad vehicular en cada una de estas tecnologías, en función del número real de vehículos circulante obtenido de los conteos de tráfico.

Los conteos de tráfico fueron obtenidos de un estudio hecho por la empresa Siemens para la Dirección de Tránsito de Bucaramanga. Estos contienen la composición cada 15 minutos de Autos, Buses y Camiones para la cual fue necesaria su agregación horaria. En la Tabla 4-23 se presenta un ejemplo de este proceso.

<b>Grupo 3</b> Calle 45 W-E				
<b>INTER- VALO</b>	<b>TIPO DE VEHÍCULO</b>			<b>VEHÍC. EQUIV.</b>
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	
600 - 700	267	22	5	324
700 - 800	347	30	9	430
800 - 900	521	31	10	608
900 - 1000	625	46	12	747
1000 - 1100	754	46	10	871
1100 - 1200	679	39	11	785
1200 - 1300	621	47	7	733
1300 - 1400	504	41	13	619
1400 - 1500	498	28	11	582
1500 - 1600	472	33	7	556
1600 - 1700	556	30	6	631
1700 - 1800	673	32	7	755
1800 - 1900	651	35	4	731
1900 - 2000	635	39	7	731

Tabla 4-23: Volúmenes horarios de Autos, Buses y Camiones en la Calle 45 Sentido W-E

Fuente: SIEMENS. Abril de 2002.

Es importante mencionar que tal como se encuentra la información de tráfico no es útil para los objetivos del proyecto, ya que por ejemplo no se discriminan en los conteos vehiculares la proporción de buses y busetas, la cual es una variable importante.

Este escenario se presenta también en el plano de los autos, para los cuales no se discrimina cuantos son taxis y cuantos particulares, aspecto importante al momento de estimar las emisiones ya que estas dos flotas presenta características tecnológicas y de operación muy diferentes, además, los primeros tienen mayor presencia en la zona de estudio, pero menor participación con respecto a los vehículos totales registrados en el AMB.

Para tener en cuenta las anteriores consideraciones se efectuó un muestreo in situ de la composición tanto de buses y busetas, como de taxis y autos particulares. Para su realización se determinaron los 15 minutos pico y valle de cada intersección y sentido de circulación, a partir del estudio elaborado por la empresa Siemens<sup>98</sup>, con el fin conocer la composición de las anteriores categorías en los eventos pico y no pico. En la Tabla 4-24 se presenta un ejemplo de los resultados de este muestreo.

Buses y Busetas	Intervalo	Tipo	Sentido	Buses		Busetas		Total Colectivo
				Cant.	% Total	Cant.	% Total	
	11:45 - 12:00 AM	P	36 N - S	20	29	49	71	69
	7:30 - 7:45 AM	NP	50 N - S	43	39	68	61	111
	9:00 - 9:15	P	45 S - N	29	35	53	65	82
	11:25 - 11:40 AM	NP	36 S - N	25	34	49	66	74

Tabla 4-24: Proporción de buses y busetas en los eventos pico y no pico

Fuente: Autores

Al observar estos valores se encuentra que la composición de los buses es muy uniforme para los dos sentidos de circulación y para los eventos pico y

<sup>98</sup> SIEMENS. Opc. cit.

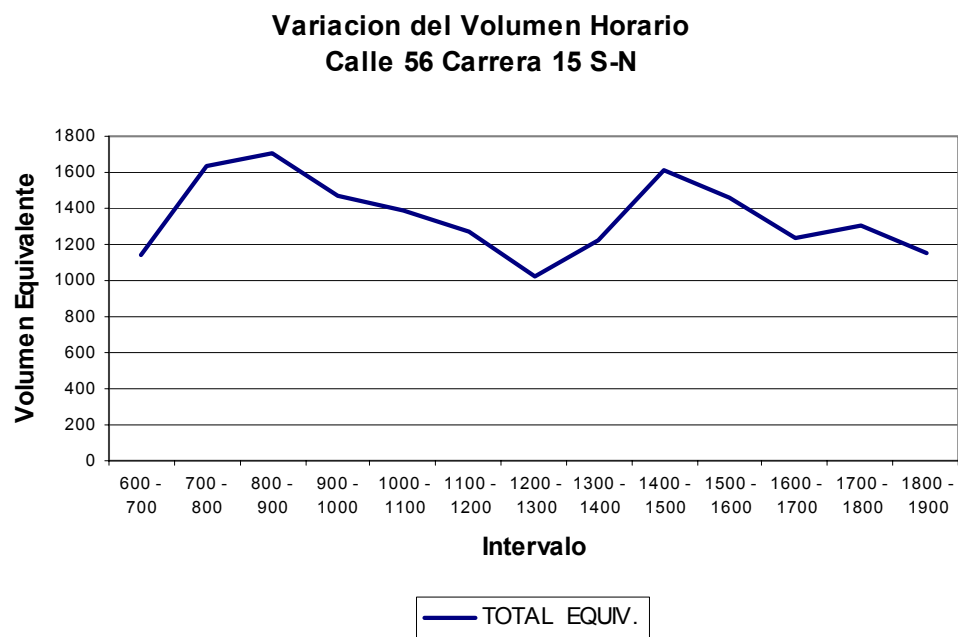
no pico, por tal razón para los sentidos E-W y W-E se tomo esta composición igual a la del sentido S-N. En la Tabla 4-25 se exponen los resultados del muestreo para vehículos particulares y taxis.

	Intervalo	Tipo	Sentido	Particulares		Taxis		Total Autos
				Cant.	% Total	Cant.	% Total	
Qda Seca	5:45 - 6:00 PM	P	W - E	173	71	71	29	244
	9:15 - 9:30 AM	NP	W - E	84	51	81	49	165
	4:00 - 4:15 PM	P	E -W	140	51	135	49	275
	8:45 - 9:00 AM	NP	E -W	104	60	69	40	173
	11:50 - 12:05 PM	P	S - N	33	33	67	67	100
	8:45 - 9:00 AM	NP	S - N	39	37	66	63	105
	6:00 - 6:15 PM	P	N - S	75	38	123	62	198
	9:15 - 9:30 PM	NP	N - S	46	36	83	64	129
Calle 36	11:00- 11:15 AM	P	W - E	46	26	130	74	176
	8:30 - 8:45 AM	NP	W - E	72	36	127	64	199
	10:30 - 10:45 AM	P	E - W	65	31	143	69	208
	8:45 - 9:00 AM	NP	E - W	35	24	109	76	144
	9:00 - 9:15 AM	P	S - N	53	32	112	68	165
	3:30 - 3:45 PM	NP	S - N	80	38	128	62	208
		P	N - S	En este sentido no circulan LDV				
	NP	N - S						
Calle 45	5:45 - 6:00 PM	P	W - E	173	71	71	29	244
	9:15 - 9:30 PM	NP	W - E	84	51	81	49	165
	3:45 - 4:00 PM	P	E -W	140	51	135	49	275
	8:45 - 9:00 AM	NP	E -W	104	60	69	40	173
	12:15 - 12:30 PM	P	S - N	33	33	67	67	100
	9:45 - 10:00 AM	NP	S - N	39	37	66	63	105
	6:00 - 6:15 AM	P	N - S	75	38	123	62	198
	9:30 - 9:45 AM	NP	N - S	46	36	83	64	129
Calle 50	4:30 - 4:45 PM	P	E -W	66	52	60	48	126
	2:30 - 2:45 PM	NP	E -W	190	64	107	36	297
	12:00 - 12:15 PM	P	17 S - N	99	52	90	48	189
	1:15 - 1:30 PM	NP	17 S - N	61	46	72	54	133
	8:00 - 8:15 AM	P	15 S - N	166	49	175	51	341
	2:45 - 3:00 PM	NP	15 S - N	101	48	109	52	210
	6:15 - 6:30 PM	P	N - S	164	55	136	45	300
	7:45 - 8:00 AM	NP	N - S	86	42	121	58	207
Calle 56	2:00 - 2:15 PM	P	W - E	70	60	46	40	116
	10:15 - 10:30 AM	NP	W - E	41	51	39	49	80
	12:30 - 12:45 PM	P	E -W	90	50	90	50	180
	10:00 - 10:15 AM	NP	E -W	89	59	62	41	151
	1:45 - 2:00 PM	P	S - N	292	65	155	35	447
	10:00 - 10:15 AM	NP	S - N	86	47	96	53	182
	12:15 - 12:30 PM	P	N - S	250	55	207	45	457
	10:15 - 10:30 AM	NP	N - S	66	43	86	57	152

Tabla 4-25: Proporción de Autos particulares y taxis, en los eventos pico y no pico

Fuente: Autores

Al tener esta información, se asignó para cada conteo y para las diferentes horas del día el atributo de hora pico (P) y hora no pico (NP), con el fin de extender la composición del tráfico en autos, taxis, buses, busetas y camiones. Para esto se usaron las proporciones obtenidas en las Tablas 4-24 y 4-25 y se determinó la composición promedio en el intervalo analizado (6:00 AM – 7:00 PM) para la flota que circula en cada intersección y sentido de circulación.



*Figura 4-30: Variación del volumen horario, para la Carrera 15 con Calle 56 Sentido S-N  
Fuente: SIEMENS. Abril de 2002.*

En la Figura 4-30 se observa que para la Carrera 15 con Calle 56, en sentido S-N, se presentan dos picos, uno en la mañana de 7 a 9 AM y otro en la tarde de 2 a 3 PM, para los cuales la flota se distribuye con la composición hallada para los eventos pico, mientras que para el resto del día, la flota se distribuye con la composición de los eventos no pico, determinados para la misma intersección y sentido de circulación.

Al tener la cantidad de autos, taxis, buses, busetas y camiones hora a hora, para las 12 horas analizadas, se totalizan y se halla una composición promedio diaria, es importante recalcar que esta labor se realizó para todos los sentidos de circulación de las intersecciones seleccionadas. Se puede observar un ejemplo de este proceso en la Tabla 4-26.

**Calle 56 -Cra 15 Sentido S-N**

INTER-VALO	TIPO DE VEHÍCULO			TOTAL	EQUIV.	Composicion Flota					
	A	B	C			Tipo Hora	Autos	Taxis	Buses	Busetas	Camiones
600 - 700	698	206	12	1140		NP	328	370	70	136	12
700 - 800	1133	235	14	1638		P	736	397	82	153	14
800 - 900	1209	230	17	1712		P	786	423	81	150	17
900 - 1000	1001	209	21	1472		NP	470	531	71	138	21
1000 - 1100	884	224	24	1392		NP	415	469	76	148	24
1100 - 1200	781	221	20	1273		NP	367	414	75	146	20
1200 - 1300	626	183	11	1020		NP	294	332	62	121	11
1300 - 1400	797	191	16	1219		NP	375	422	65	126	16
1400 - 1500	1160	201	20	1612		P	754	406	70	131	20
1500 - 1600	988	203	27	1462		NP	464	524	69	134	27
1600 - 1700	856	172	12	1230		NP	402	454	58	114	12
1700 - 1800	875	196	15	1305		NP	411	464	67	129	15
1800 - 1900	740	195	7	1148		NP	348	392	66	129	7
Suma	11748	2666	216			Suma	6152	5596	913	1753	216

Composicion Promedio Diaria		
Tipo	Total Diarios	% Diario
Autos	11748	80.30
Buses	2666	18.22
Camiones	216	1.48
	14630	100.00

Bus	34.25
Buseta	65.75
Taxis	47.63
Particulares	52.37

Composición Veh		
Vehiculo	Pico	No Pico
Buses	0.35	0.34
Busetas	0.65	0.66
Autos	0.65	0.47
Taxis	0.35	0.53

El Factor de Equivalencia usado para los Buses es de 2 y para los Camiones de 2.5 (Tomado estudio Siemens)

**Tabla 4-26: Cálculo de la composición promedio diaria de la flota circulante por la Carrera 15 con Calle 56, sentido S-N**

*Fuente: Autores*

Como resultado de realizar este proceso para todas las intersecciones se obtienen las composiciones de la flota vehicular circulante, como aparece en la Tabla 4-27.

### Resumen Composición de la Flota

Interseccion	Sentido	A (%)	B (%)	C (%)	A+B+C	Composicion Autos "A"		Composicion Buses "B"	
						Part.	Taxis	Buses	Busetas
Calle 36	E-W	99.48	0.00	0.52	Ok	27.20	72.80	0.00	0.00
	W-E	99.52	0.00	0.48	Ok	32.75	67.25	0.00	0.00
	N-S	0.00	98.82	1.18	Ok	0.00	0.00	34.66	65.34
	S- N	67.53	31.96	0.51	Ok	36.78	63.22	34.18	65.82
Calle 45	E-W	96.33	2.61	1.06	Ok	58.31	41.69	34.16	65.84
	W-E	92.61	5.94	1.45	Ok	60.35	39.65	34.46	65.54
	N-S	63.66	35.77	0.57	Ok	36.46	63.54	37.33	62.67
	S- N	64.57	34.90	0.53	Ok	35.88	64.12	34.26	65.74
Calle 50	E-W	94.77	2.72	2.51	Ok	60.70	39.30	34.17	65.83
	17 S-N	88.41	10.11	1.48	Ok	47.73	52.27	34.26	65.74
	15 N-S	75.25	23.47	1.28	Ok	47.01	52.99	35.83	64.17
	15 S-N	78.25	21.07	0.68	Ok	48.35	51.65	34.35	65.65
Calle 56	E-W	91.00	7.35	1.65	Ok	56.53	43.47	34.26	65.74
	W-E	97.47	1.47	1.06	Ok	53.45	46.55	34.24	65.76
	N-S	73.19	25.06	1.75	Ok	45.56	54.44	37.43	62.57
	S- N	80.30	18.22	1.48	Ok	52.37	47.63	34.25	65.75
Q Seca	E-W	88.07	6.88	5.05	Ok	57.61	42.39	34.23	65.77
	W-E	90.95	2.80	6.25	Ok	54.77	45.23	34.17	65.83
	N-S	51.89	44.94	3.17	Ok	36.34	63.66	37.37	62.63
	S- N	63.99	34.88	1.13	Ok	35.99	64.01	34.25	65.75

Tabla 4-27: Resumen de la composición promedio diaria, de la flota circulante por las diferentes intersecciones

Fuente: Autores

Estas composiciones promedio se distribuyen en las tecnologías identificadas para cada clase vehicular, obteniéndose así el archivo que caracteriza la flota para cada sentido de las intersecciones analizadas bajo las condiciones de operación actuales.

Al momento de modelar el funcionamiento del SITM METROLÍNEA, es necesario estimar como sería el comportamiento de este, a lo largo de la troncal que operará en la Carrera 15, con el fin de obtener un flujo vehicular que permita realizar una nueva distribución de la flota para las diferentes intersecciones.

Para esta labor se obtuvieron del estudio de aforos de frecuencia y ocupación vehicular realizados por la empresa SAIP Ltda. en diciembre de 2003, las curvas de oferta y demanda del transporte público colectivo correspondientes a las estación maestra de la calle 37 con carrera 15, la cual está ubicada dentro del dominio de la investigación y su información se toma como representativa para toda la zona.

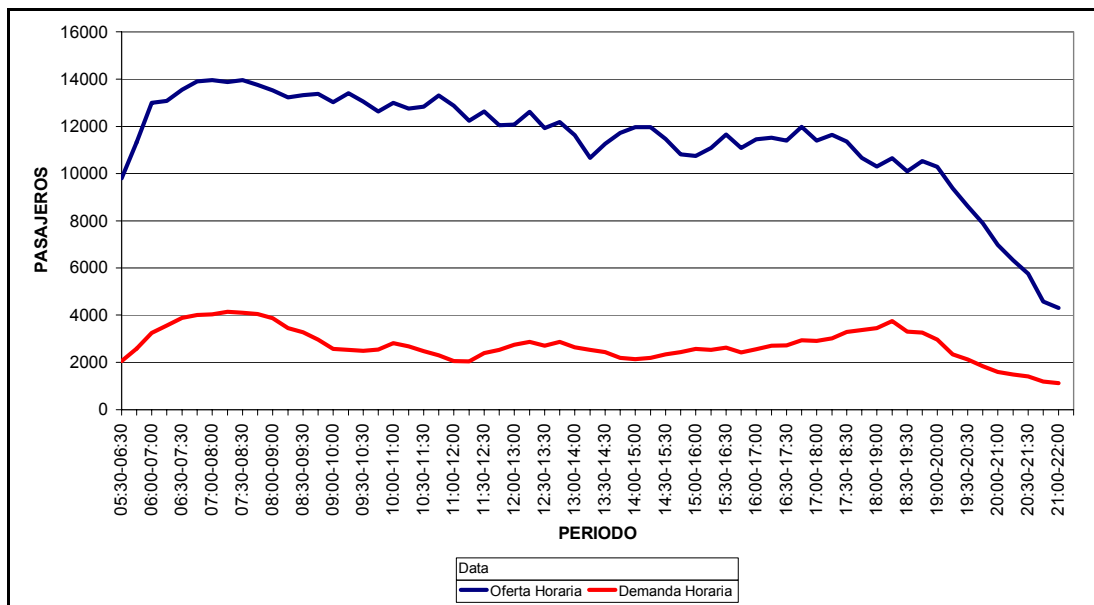


Figura 4-31: Curva Oferta Demanda Estación Centro Sentido S-N

Fuente: SAIP Ltda.

Como se observa en la Figura 4-31, el comportamiento de la demanda representada por la línea roja, muestra la existencia de tres picos. El primero ocurre de 7:15 a 8:15 AM con un valor de 4153 pasajeros, el otro al mediodía de 12:15 a 1:15 PM con 2865 pasajeros, y el último de 6:15 a 7:15 PM con 3757 pasajeros.

El comportamiento de la oferta representado por la línea azul, presenta su máximo en la mañana y decrece uniformemente a lo largo del día. El nivel de ocupación presentado varía del 17% al 35 %, alcanzando este último de

6:15 a 7:15 PM, situación que refleja el exceso de oferta en el transporte público colectivo, la cual se traduce en una flota sub-utilizada, congestiones vehiculares y en altas emisiones de contaminantes.

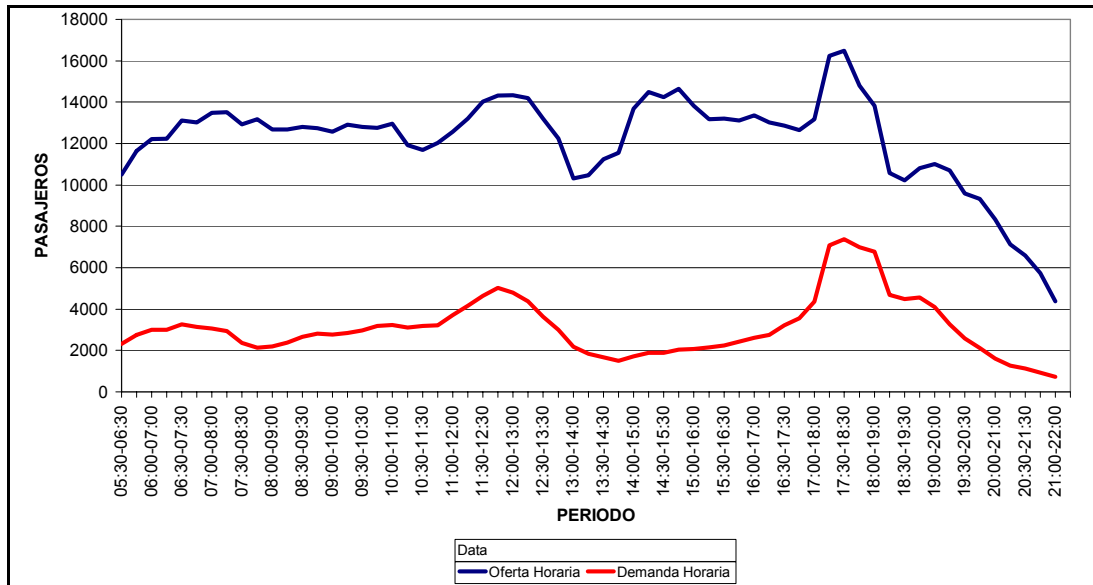


Figura 4-32: Curva Oferta Demanda Estación Centro Sentido N-S

Fuente: SAIP Ltda.

Para sentido Norte Sur (Figura 4-32) se observa que la demanda presenta tres picos en el día y en general su tendencia es creciente a lo largo del este. El valor máximo se presenta de 5:30 a 6:30 PM con un valor de 7371 pasajeros.

Similar al comportamiento de la demanda, la oferta presenta tres picos en el día y es siempre superior a la demanda, el mayor porcentaje de ocupación se encuentra de 6:00 a 7:00 PM con un valor del 49%.

De estas curvas se puede obtener el índice de ocupación hora a hora para el periodo de estudio, el cual según la ecuación 4.13.

$$(I_o)_i = (D_i / O_i) \times 100 \quad (4.13)$$

Donde

$(I_o)_i$  = Índice de Ocupación para la hora  $i$ .

$D_i$  = Demanda para la hora  $i$ .

$O_i$  = Oferta en la hora  $i$ .

Los índices de ocupación determinados de la forma descrita se encuentran en la Tabla 4-28

**Índice de Ocupacion Horario  
Estacion Centro (calle 37- carrera 15)**

Hora	Índice de Ocupacion (S-N)	Índice de Ocupacion (N-S)
600 - 700	24.82%	26.16%
700 - 800	28.98%	22.40%
800 - 900	28.67%	17.01%
900 - 1000	19.57%	21.88%
1000 - 1100	21.51%	25.00%
1100 - 1200	16.30%	29.57%
1200 - 1300	22.73%	33.53%
1300 - 1400	22.76%	20.83%
1400 - 1500	18.11%	12.50%
1500 - 1600	23.68%	14.77%
1600 - 1700	22.31%	20.06%
1700 - 1800	25.62%	32.52%
1800 - 1900	33.58%	49.22%
1900 - 2000	28.70%	37.25%
2000 - 2100	26.98%	19.48%
2100 - 2200	26.09%	17.50%

*Tabla 4-28: Índice de Ocupación Horario, Sentidos N-S y S-N, Estación Centro*

*Fuente: Autores*

En el proceso de determinar un flujo vehicular para el SITM, es necesario conocer la capacidad media actual de la flota del transporte público colectivo y los volúmenes de tráfico de esta flota para el corredor de la carrera 15 en

todas las intersecciones seleccionadas, datos obtenidos del AMB y la Dirección de Tránsito respectivamente.

TIPO DE VEHÍCULO Y CAPACIDAD		
BUS	BUSETA	MICROBUS
Sentados 40 De pie 25	Sentados 25 De pie 15	Sentados 15

Tabla 4-29: Capacidad de los buses, busetas y micros.

Fuente: SAIP Ltda.

Las capacidades de los diferentes tipos de transporte público colectivo se describen en la Tabla 4-29. La capacidad ponderada de esta flota en la ciudad es de 47 pasajeros<sup>99</sup>.

Conociendo los índices de ocupación, la capacidad media de la flota y los volúmenes de buses que circulan en la carrera 15, se puede estimar la demanda actual para las diferentes intersecciones, en términos de pasajeros para el transporte público colectivo, dato de vital importancia para determinar la flota del SITM.

La forma de calcular esta demanda se presenta en la ecuación 4.14,

$$D_{ij} = (I_o)_j \times C \times V_{ij} \quad (4.14)$$

Donde,

$D_{ij}$  = Demanda para la intersección “i”, en la hora “j”, en pasajeros.

$(I_o)_j$  = Índice de ocupación para la hora “j”

$C$  = Capacidad ponderada de la flota, 47 pasajeros.

$V_{ij}$  = Volumen de Buses, en la intersección “i”, para la hora “j”,

<sup>99</sup> SAIP Ltda. Estudio de complementación y actualización del diseño operacional del sistema integrado de transporte masivo de Bucaramanga. Bogotá. 2004. p. 64

Al conocer la demanda estimada mediante el anterior procedimiento, se puede calcular la flota de buses del SITM, para todos los sentidos Norte - Sur y Sur – Norte de las intersecciones seleccionadas, la cual es el cociente entre esta la demanda y la capacidad de los nuevos vehículos (100 pasajeros).<sup>100</sup>

Es importante mencionar que la flota calculada de esta forma, es la que satisface exactamente la demanda actual en todas las intersecciones, por lo tanto este valor se incrementa en un 20%, el cual es destinado para cubrir flota de reserva y ocupaciones por debajo de la máxima en la hora pico.<sup>101</sup>

**Resumen Demanda y Flota Requerida para el SITM  
Sentido Norte-Sur**

Hora	Quebrada Seca		Calle 36		Calle 45		Calle 50		Calle 56	
	Demanda	Flota	Demanda	Flota	Demanda	Flota	Demanda	Flota	Demanda	Flota
600 - 700	3881	46.6	2127	25.5	1967	23.6	3738	44.9	3382	40.6
700 - 800	3398	40.8	2327	27.9	1800	21.6	3674	44.1	3064	36.8
800 - 900	2655	31.9	1854	22.3	1751	21.0	2726	32.7	2150	25.8
900 - 1000	3095	37.1	2499	30.0	3023	36.3	3589	43.1	2962	35.5
1000 - 1100	3487	41.8	2797	33.6	3925	47.1	4136	49.6	3149	37.8
1100 - 1200	4153	49.8	3850	46.2	4045	48.5	5115	61.4	3614	43.4
1200 - 1300	4599	55.2	4760	57.1	2506	30.1	5107	61.3	4255	51.1
1300 - 1400	2579	30.9	2673	32.1	2634	31.6	3545	42.5	2477	29.7
1400 - 1500	1798	21.6	1263	15.2	1575	18.9	1898	22.8	1516	18.2
1500 - 1600	2046	24.5	1993	23.9	1868	22.4	2417	29.0	1854	22.2
1600 - 1700	2750	33.0	2414	29.0	2527	30.3	3018	36.2	2376	28.5
1700 - 1800	4619	55.4	4081	49.0	4035	48.4	4784	57.4	4066	48.8
1800 - 1900	<b>6560</b>	<b>78.7</b>	<b>6431</b>	<b>77.2</b>	<b>5344</b>	<b>64.1</b>	<b>7749</b>	<b>93.0</b>	<b>6477</b>	<b>77.7</b>
1900 - 2000	4006	48.1	3677	44.1	3134	37.6	5463	65.6	4167	50.0

*Tabla 4-30: Resumen demanda y flota requerida para el SITM, sentido Norte Sur.*

*Fuente: Autores*

<sup>100</sup> Ibid. p. 118

<sup>101</sup> Estudio de Complementación y Actualización del Diseño Operacional del Sistema Integrado de Transporte Masivo de Bucaramanga. Sistemas Andinos de Ingeniería y Planificación SAIP Ltda. Pag 158

### Variación de la Demanda N-S

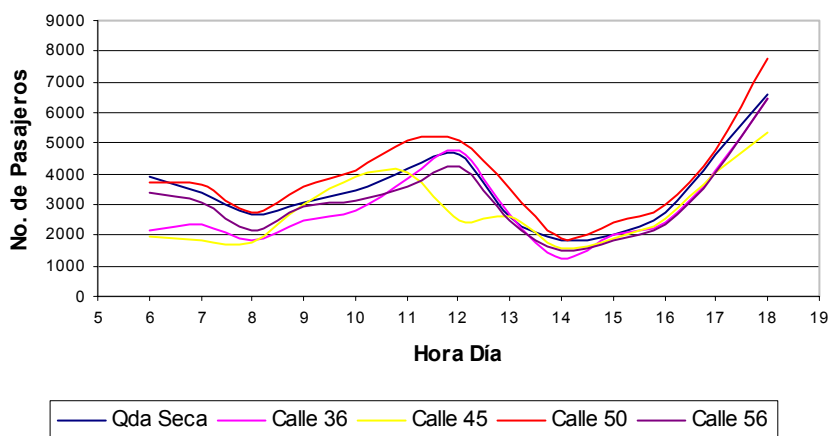


Figura 4-33: Variación Horaria de la demanda de transporte En sentido N-S, para las condiciones de operación del SITM

Fuente: Autores

En la Tabla 4-30 y la Figura 4—33, se observa en el sentido N – S, que el comportamiento de la demanda es uniforme, presentándose tres picos, siendo el de las 6:00 PM el mayor.

La intersección con mayores requerimientos de vehículos de 100 pasajeros, para satisfacer la demanda estimada, es la Calle 50, motivo por el cual se toma este volumen requerido igual para todo el sentido Norte-Sur, con el propósito de que la flota en operación satisfaga los requerimientos a lo largo de toda la troncal.

**Resumen Demanda y Flota Requerida para el SITM  
Sentido Sur-Norte**

Hora	Quebrada Seca		Calle 36		Calle 45		Calle 50		Calle 56	
	Demanda	Flota	Demanda	Flota	Demanda	Flota	Demanda	Flota	Demanda	Flota
600 - 700	3058	36.7	1820	21.8	1761	21.1	2729	32.8	2403	28.8
700 - 800	<b>3991</b>	<b>47.9</b>	2710	32.5	<b>2874</b>	<b>34.5</b>	3391	40.7	<b>3201</b>	<b>38.4</b>
800 - 900	3795	45.5	<b>2776</b>	<b>33.3</b>	2776	33.3	<b>3935</b>	<b>47.2</b>	3099	37.2
900 - 1000	2624	31.5	1913	23.0	1802	21.6	2299	27.6	1922	23.1
1000 - 1100	2697	32.4	2285	27.4	1921	23.1	2568	30.8	2265	27.2
1100 - 1200	2031	24.4	1578	18.9	1486	17.8	1723	20.7	1693	20.3
1200 - 1300	2679	32.1	2040	24.5	1933	23.2	2233	26.8	1955	23.5
1300 - 1400	2737	32.8	1894	22.7	1145	13.7	1904	22.9	2044	24.5
1400 - 1500	2475	29.7	1770	21.2	1481	17.8	1745	20.9	1711	20.5
1500 - 1600	2863	34.4	2137	25.6	2015	24.2	2260	27.1	2260	27.1
1600 - 1700	2192	26.3	1846	22.1	2202	26.4	1846	22.1	1804	21.6
1700 - 1800	3119	37.4	2095	25.1	1806	21.7	2372	28.5	2360	28.3
1800 - 1900	3526	42.3	2494	29.9	2730	32.8	2320	27.8	3077	36.9
1900 - 2000	2820	33.8	1686	20.2	1646	19.8	1875	22.5	2091	25.1

Tabla 4-31: Resumen demanda y flota requerida para el SITM, sentido Sur Norte.

Fuente: Autores

**Variación de la Demanda S-N**

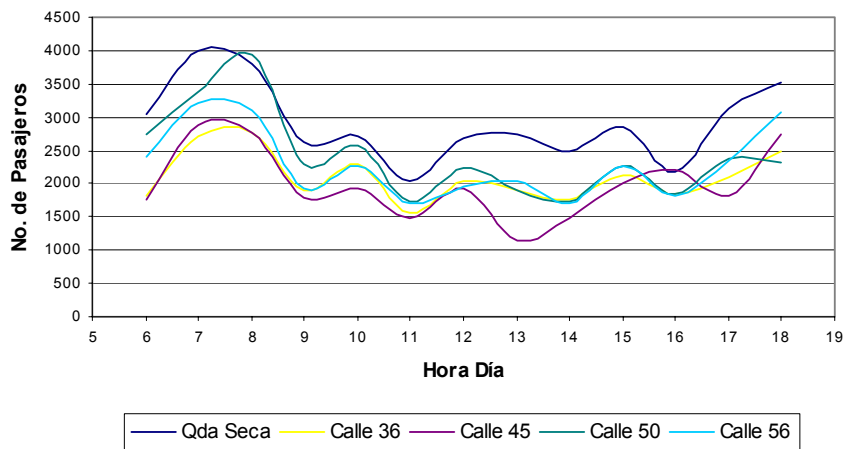


Figura 4-34: Variación Horaria de la demanda de transporte En sentido S-N, para las condiciones de operación del SITM

Fuente: Autores

Para el sentido Sur-Norte (Tabla 4-31 y Figura 4-34) se aplica el mismo análisis anterior, en este caso los mayores requerimiento de vehículos del nuevo sistema de transporte, se encuentran en la Avenida Quebrada Seca, por esta razón se asumen iguales para todas las intersecciones en el mismo

sentido de circulación, satisfaciendo de esta forma las demandas a lo largo del tramo.

Al tener identificado los volúmenes horarios para el SITM en sus dos sentidos de circulación (N-S, S-N), estos se reemplazan en la categoría de buses (B), de los conteos suministrados por la Dirección de Tránsito de Bucaramanga, de esta forma se obtienen unos conteos vehiculares que representan la operación del nuevo sistema de transporte.

A estos conteos se les da el mismo tratamiento dado para la flota bajo las actuales condiciones de operación, es decir se determina la composición promedio diaria para las diferentes clases vehiculares, las cuales para las carrera 15 serian autos, camiones y METROLÍNEA, mientras que para las demás calles se mantendrían igual, debido a que el SITM no transita por estas.

Los resultados de este proceso se resumen en la Tabla 4-32.

#### Resumen Composición de la Flota

Interseccion	Sentido	A	METROLÍNEA	C	A+B+C	Composicion Autos "A"	
						Particulares	Taxis
Q Seca	N-S	83.36	11.55	5.09	Ok	36.50	63.50
	S- N	91.63	6.76	1.61	Ok	35.66	64.34
Calle 36	N-S	0.00	94.12	5.88	Ok	----	----
	S- N	91.28	8.02	0.70	Ok	37.38	62.62
Calle 45	N-S	89.39	9.81	0.80	Ok	36.48	63.52
	S- N	89.68	9.59	0.73	Ok	35.49	64.51
Calle 50	15 N-S	94.21	4.18	1.61	Ok	44.71	55.29
	15 S-N	95.00	4.17	0.83	Ok	48.43	51.57
Calle 56	N-S	92.16	5.63	2.21	Ok	45.56	54.44
	S- N	94.56	3.70	1.74	Ok	52.37	47.63

*Tabla 4-32: Resumen de la composición promedio diaria, para la flota circulante por la carrera 15, bajo las condiciones de operación del SITM*

*Fuente: Autores*

Estas composiciones se distribuyen en las tecnologías identificadas para cada clase vehicular, obtenidas mediante el procedimiento descrito anteriormente, lo que genera el archivo que caracteriza la flota bajo las nuevas condiciones de operación, para cada sentido en las intersecciones analizadas.

#### 4.2.5. Módulo de ajuste de las Tasas Básicas de Emisión TBE

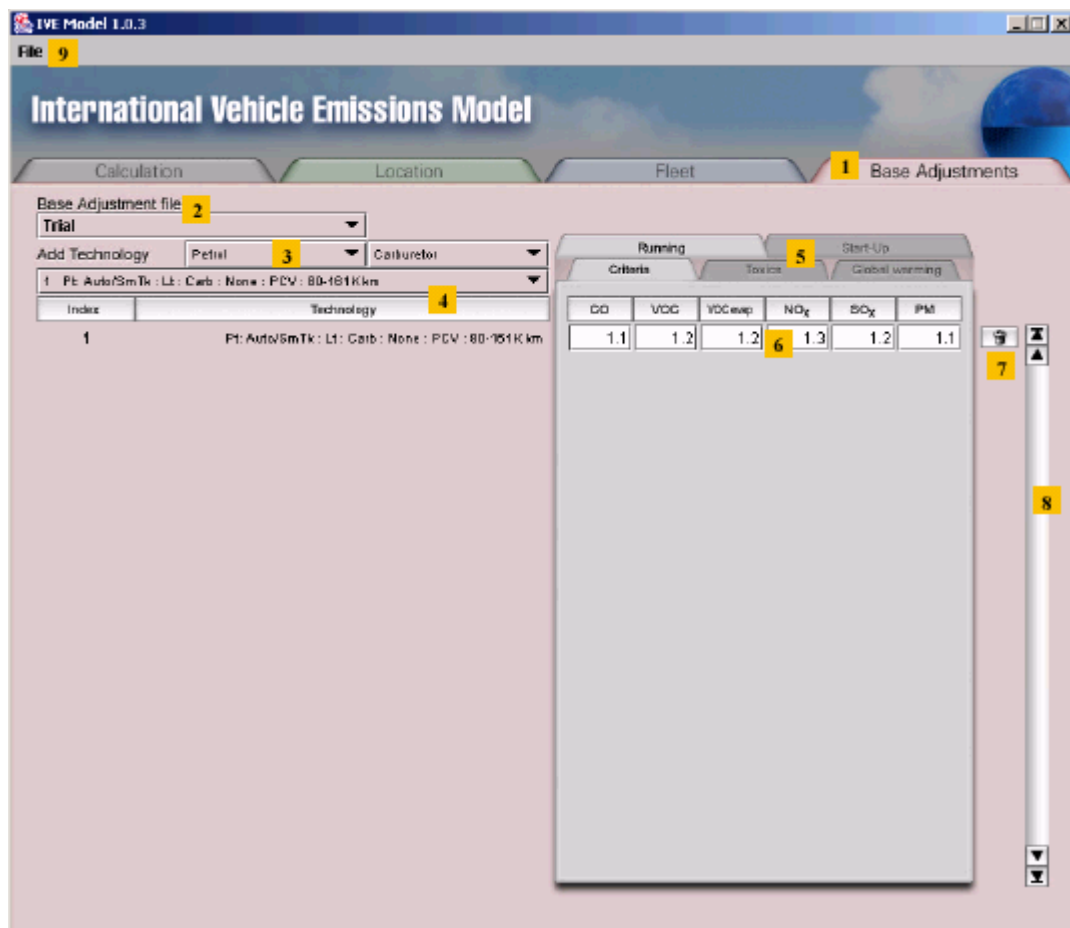


Figura 4-35: Ventana del Módulo de Ajuste de las tasas básicas de emisión TBE

Fuente: IVE User's Manual

El modelo posee tasas básicas de emisión para cada tecnología vehicular, tanto para las emisiones en movimiento (running) como para las emisiones por arrancadas (starts). Estas se obtienen de pruebas hechas a los vehículos en dinamómetros, bajo ciclos de conducción con condiciones estándar, las cuales en su mayoría se derivan de estudios realizados en los Estados Unidos. (Ver Figura 4-36). El modelo brinda la posibilidad de calibrar estas TBE con datos locales si se dispone de estos.



*Figura 4-36: Pruebas dinamométricas para determinar las TBE*

*Fuente: Modelación de la Calidad del Aire a Escala Urbana (25 – 29 ago. 2003: Bogotá):  
Memorias. Bogotá: UNIANDES, 2003*

Las TBE incluidas en el modelo se fundamentan en los resultados alcanzados por los ciclos de conducción del FTP (Federal Test Procedure), de los cuales los ciclos Bag 2 y 3 sirven para obtener las emisiones en movimiento. Por otra parte, se usa el resultado del ciclo Bag1 – Bag 3 para las emisiones por arrancadas. Estos ciclos pueden observarse en la Figura 4-37.

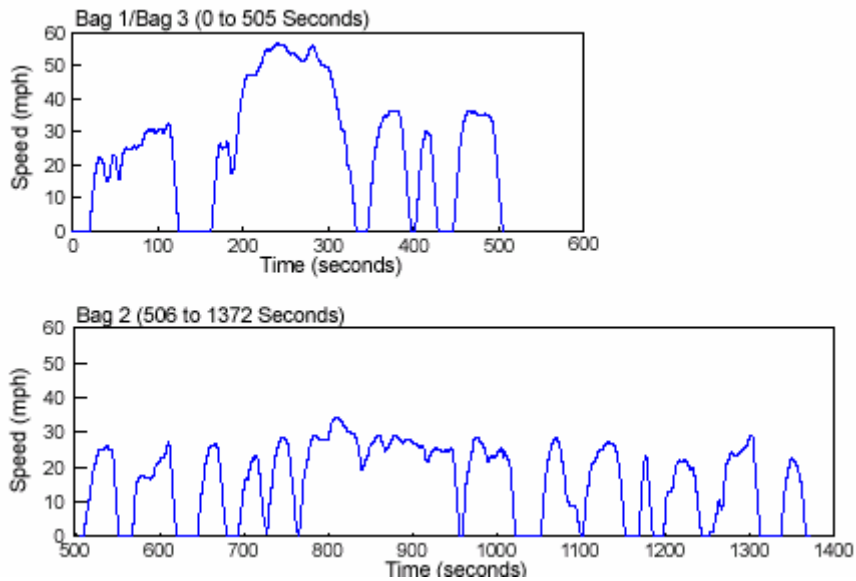


Figura 4-37: Ciclos de Conducción del FTP

Fuente: Mobile 6 User's Guide

#### 4.2.5.1. Proceso para la calibración del modelo

La calibración del modelo consiste en determinar los factores de corrección que ajusten las TBE a las condiciones locales. Para esto se editan los diferentes archivos de entrada, de forma que contengan las condiciones en las que se realizan las pruebas locales como la temperatura, la humedad, la velocidad y el comportamiento de conducción entre otras.

Los factores de corrección se determinan según la ecuación 4.15:

$$F_c = E_m / E_p \quad (4.15)$$

Donde,

$F_c$  = Factor de Ajuste

$E_m$  = Emisión medida en los ciclos locales

*$E_p$  = Emisión predecida por el modelo para las mismas condiciones en las que se desarrollan las pruebas locales.*

Esta calibración esta fuera del alcance de esta investigación puesto que para la ciudad no se han obtenido las tasas básicas de emisión, las cuales son el pilar de este proceso y un campo para una futura investigación.

### 4.3. RESULTADOS OBTENIDOS

Mediante los procedimientos descritos en las secciones anteriores, se determinaron las variables que influyen en la modelación, las cuales se agruparon en los dos tipos de archivos de entrada que maneja el modelo, que son el correspondiente a la composición de la flota y el que contiene las condiciones locales como temperatura, humedad y velocidad.

Este trabajo se realizó para cada uno de los sentidos de circulación en las intersecciones seleccionadas, bajo las actuales condiciones de operación y simulando estas con la implementación del SITM METROLÍNEA. Es importante mencionar que esta labor se realizó tanto para las emisiones de los vehículos en movimiento como para las emisiones de los vehículos en reposo, evento que se presenta en las congestiones y en los semáforos.

Este aspecto es importante, ya que para poder estimar unas emisiones que se ajusten a las condiciones que realmente se presentan, se deben contemplar estos dos comportamientos.

Para efectos de abarcar las alternativas planteadas en esta investigación, se construyeron un total de 71 archivos de entrada conformados como aparece en la Tabla 4-33.

Flotas	
Operación	Cantidad
Actual	20
SITM Diesel	10
SITM Gas	10

Localidades	
Operación	Cantidad
Actual	20
SITM (Gas/Diesel)	10
Reposo (IDLE)	1

Tabla 4-33: Composición de los Archivos de entrada

Fuente: Autores

Con esta información realizaron un total de 80 procesos de cálculo con el modelo, distribuidos como aparece en la Tabla 4-34.

Alternativa	Cantidad
Actuales / Movimiento	20
Actuales / Reposo	20
Metrolinea Diesel / Movimiento	10
Metrolinea Diesel / Reposo	10
Metrolinea Gas /Movimiento	10
Metrolinea Gas / Reposo	10

Tabla 4-34: Composición de las corridas del Modelo

Fuente: Autores

Los resultados se obtienen en formato de texto y contienen hora a hora las emisiones de monóxido de carbono CO y material particulado PM, en gramos, para cada tecnología vehicular, como se muestra en la Figura 4-38.

Calculation Results:					
Group: - single location -		Units: grams			
Containing Locations:		Fleets:			
Calle 36 (H/A) E-W		Calle 36 E-W			
Hour: 6:00					
index	technology	CO standard running	CO multi-stop running	PM standard running	PM multi-stop running
1	Pt: Auto/SmTk : Lt : Carb : None : PCV : 80-161K km	1.19242	0.00000	0.00009	0.00000
2	Pt: Auto/SmTk : Lt : Carb : None : PCV : >161K km	47.77657	153.49975	0.00643	0.02066
4	Pt: Auto/SmTk : Med : Carb : None : PCV : 80-161K km	0.32894	0.00000	0.00002	0.00000
5	Pt: Auto/SmTk : Med : Carb : None : PCV : >161K km	22.41928	24.09169	0.00376	0.00404
7	Pt: Auto/SmTk : Hv : Carb : None : PCV : 80-161K km	0.30539	0.00000	0.00002	0.00000
81	Pt: Auto/SmTk : Lt : SgPt Fl : 3Wy : PCV : <79K km	0.06153	0.00000	0.00013	0.00000
82	Pt: Auto/SmTk : Lt : SgPt Fl : 3Wy : PCV : 80-161K km	0.20114	0.00000	0.00017	0.00000
83	Pt: Auto/SmTk : Lt : SgPt Fl : 3Wy : PCV : >161K km	0.00000	2.02644	0.00000	0.00183
127	Pt: Auto/SmTk : Lt : MPFI: 3Wy/EGR : PCV : 80-161K km	0.04846	0.00000	0.00007	0.00000
129	Pt: Auto/SmTk : Med : MPFI: 3Wy/EGR : PCV : <79K km	0.00670	0.00000	0.00002	0.00000
130	Pt: Auto/SmTk : Med : MPFI: 3Wy/EGR : PCV : 80-161K km	0.06211	0.00000	0.00004	0.00000
218	NGrt: Auto/SmTk : Lt : Carb/Mx : None : PCV : >161K km	0.00000	21.01808	0.00000	0.00255
221	NGrt: Auto/SmTk : Med : Carb/Mx : None : PCV : >161K km	0.00000	4.88162	0.00000	0.00074
244	NGrt: Auto/SmTk : Lt : Carb/Mx : 3Wy : PCV : 80-161K km	0.00000	1.20677	0.00000	0.00027
245	NGrt: Auto/SmTk : Lt : Carb/Mx : 3Wy : PCV : >161K km	0.00000	5.68154	0.00000	0.00133
743	Ds: Auto/SmTk : Med : Pre-Inj : None : None : >161K km	0.00000	0.32396	0.00000	0.02106
746	Ds: Auto/SmTk : Hv : Pre-Inj : None : None : >161K km	0.00000	0.24479	0.00000	0.01944
1073	Ds: Tk/Bus : Lt : Pre-Inj : None : None : >161K km	0.61526	0.00000	0.02247	0.00000
1085	Ds: Tk/Bus : Med : Dir-Inj : Improved : None : >161K km	0.02842	0.00000	0.00409	0.00000
1117	Ds: Tk/Bus : Lt : Fl : EuroI : None : 80-161K km	0.02610	0.00000	0.00017	0.00000
HOURLY TOTALS:		90.98465816	234.8390211	0.063588486	0.106921803

Figura 4-38: Archivo de Salida, de la Calle 36 sentido E-W, en formato TXT

Fuente: Autores

A partir de estos resultados se pueden obtener los factores de emisión (FE), los cuales son los datos requeridos para alimentar el modelo de dispersión y que representan las tasas promedio a las cuales se emiten los contaminantes para unas condiciones específicas.

Para el caso de las emisiones en movimiento, los FE se obtienen como el cociente entre la emisión total para una hora dada y la distancia total recorrida en dicha hora, como se muestra en la ecuación 4.16:

$$(EF_{mov})_{ijk} = E_{ijk} / D_{ij} \quad (\text{gr /km}) \quad (4.16)$$

Donde:

$(EF_{mov})_{ij}$  = Factor de emisión en movimiento, para la intersección "i", en a hora "j", para el contaminante "k".

$E_{ijk}$  = Emisión para la intersección "i", en la hora "j", para el contaminante "k"

$D_{ij}$  = Distancia total recorrida en la intersección "i", en la hora "j"

Mientras que las emisiones de los vehículos en reposo se obtienen como el producto de la emisión horaria, la cual esta dadas en gr. / min., por 60, con el fin de obtener este valor en gr. / hora.

Este proceso se realiza para todas horas entre las 6 AM y las 7 PM, en todas las intersecciones y sentidos de circulación, para las diferentes alternativas planteadas, obteniéndose para cada una de ellas una tabla resultado como el ejemplo de Tabla 4-35.

Hora	Emisiones (gr)		EF (gr/(veh-milla))	
	CO Total	PM Total	CO	PM
6	325.82	0.17	43.54	0.02
7	769.23	0.40	41.30	0.02
8	2137.79	1.12	56.11	0.03
9	2803.48	1.47	49.58	0.03
10	4795.77	2.52	45.63	0.02
11	4087.19	2.15	49.45	0.03
12	3895.58	2.05	47.52	0.02
13	1773.86	0.93	41.14	0.02
14	1450.73	0.76	49.59	0.03
15	1480.41	0.78	52.91	0.03
16	1627.16	0.85	47.13	0.02
17	1819.97	0.96	58.80	0.03
18	1611.63	0.84	45.12	0.02

Tabla 4-35: Emisiones y Factores de emisión horarios para la Calle 36 sentido E-W

Fuente: Autores

Con estos valores para las tasas de emisión locales de realiza un promedio por tipo de contaminante. En la Figura 4-39 se puede observar una comparación gráfica entre las tasas de emisión para CO en movimiento y en la Figura 4-40 las de reposo, para Bucaramanga y otras ciudades, para vías arterias.

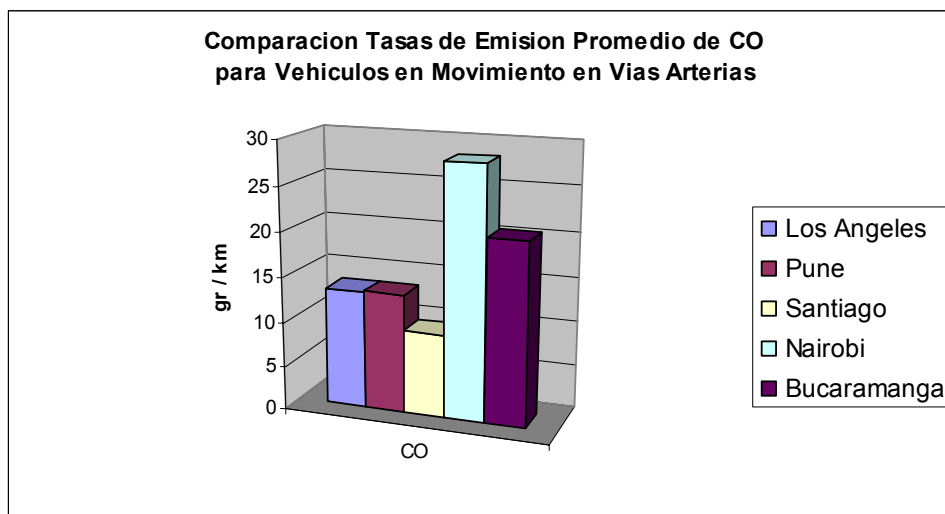
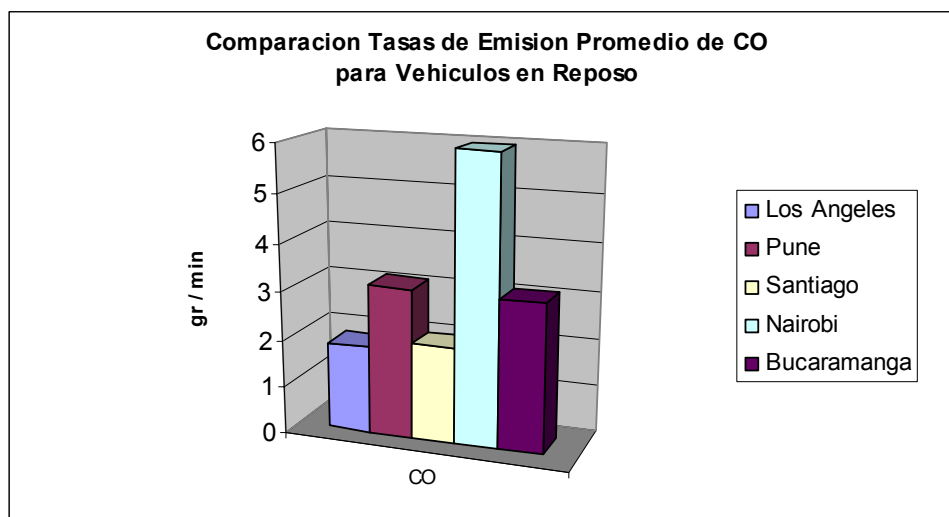


Figura 4-39: Comparación de las Tasas de Emisión Promedio de CO, para Vehículos en movimiento en vías arterias

Fuente: Autores

En la Figura 4-39 se puede observar la incidencia del alto número de vehículos particulares y taxis presentes en la flota local, ya que estos son los mayores responsables de las emisiones de CO. Otro aspecto importante es que la edad promedio de los carros de pasajeros en Bucaramanga es de 12.8 años, mientras que para Pune es de 4.6 años. Esta condición afecta considerablemente las tasas de emisión ya que los motores y los sistemas de control para esta flota local se encuentran mas deteriorados.



*Figura 4-40: Comparación de las Tasas de Emisión Promedio de CO, para Vehículos en Reposo (IDLE)*  
*Fuente: Autores*

En la Figura 4-40 se observan las diferentes tasas de emisión de CO para los vehículos en reposo, en esta la tasa de emisión local (3.1 gr/min) se encuentra mas cercana con respecto a las de las diferentes ciudades, ubicándose muy cerca del promedio (3.2 gr/min) de estas.

Para el material particulado PM se puede observar la misma comparación en las Figuras 4-41 y 4-42.

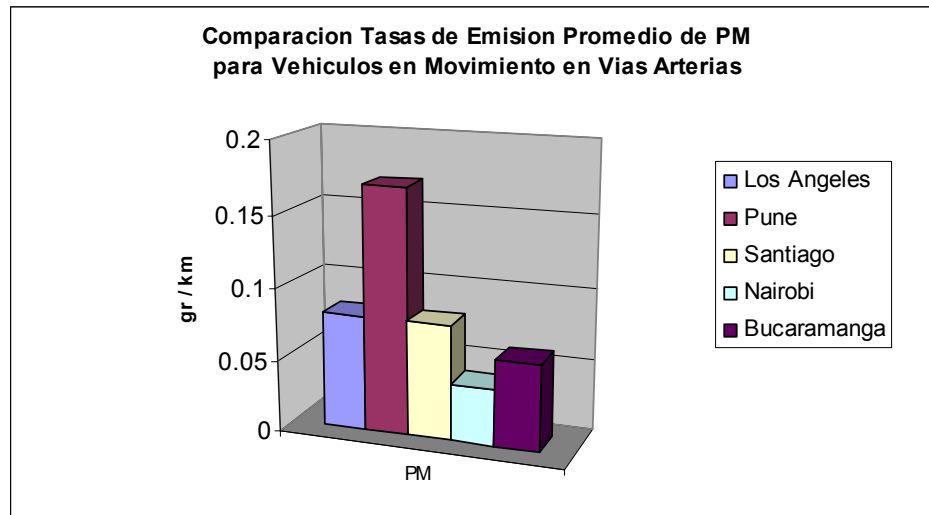


Figura 4-41: Comparación de las Tasas de Emisión Promedio de PM, para Vehículos en movimiento en vías arterias

Fuente: Autores

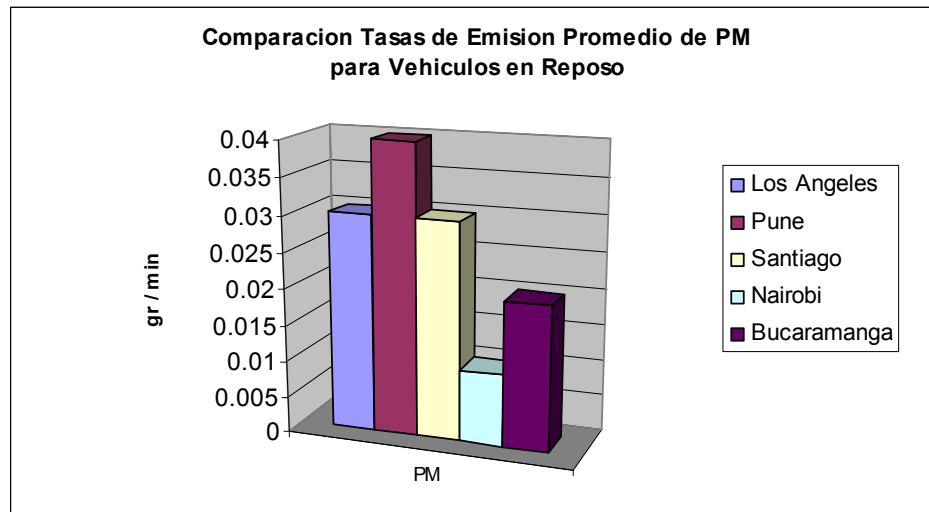


Figura 4-42: Comparación de las Tasas de Emisión Promedio de PM, para Vehículos en Reposo (IDLE)

Fuente: Autores

En estas dos gráficas se observa que las tasas promedio de emisión para el material particulado, tanto para las emisiones en movimiento como para las emisiones en reposo, son menores que las tasas de Pune. En Pune, la flota

está compuesta en un 90 %<sup>102</sup> por buses, vehículos de tres ruedas y motos, los cuales son los mayores contribuyentes de PM, mientras que para el Área Metropolitana de Bucaramanga esta flota alcanza solo el 35% del total. Más específicamente, para la zona de estudio (Carrera 15), los buses alcanzan una participación del 20.45 %, siendo los principales responsables del PM local.

#### 4.3.1 Emisiones de Vehículos en Movimiento

La información de los archivos de salida se debe procesar con el fin de poder determinar para las diferentes intersecciones, cuanto es el aporte de contaminantes (CO / PM) emitidos hora a hora para cada una de las clases vehiculares identificadas en la caracterización de la flota local, para esta labor se requirió de la elaboración de unas rutinas de programación que facilitaran el manejo de la información ya que el volumen de esta así lo demandaba.

##### 4.3.1.1 Emisiones de CO

El comportamiento de la emisión de este contaminante, para las diferentes alternativas modeladas del SITM, exhibe una leve reducción en comparación a las condiciones actuales, siendo para el caso de la flota a diesel del 8.24%, mientras que para la flota a gas del 9.23%.

La variación horaria de la emisión total de CO, para las diferentes alternativas se muestra en la Figura 4-43.

---

<sup>102</sup> UNIVERSITY OF CALIFORNIA AT RIVERSIDE. Pune Vehicle Activity Study. 2003

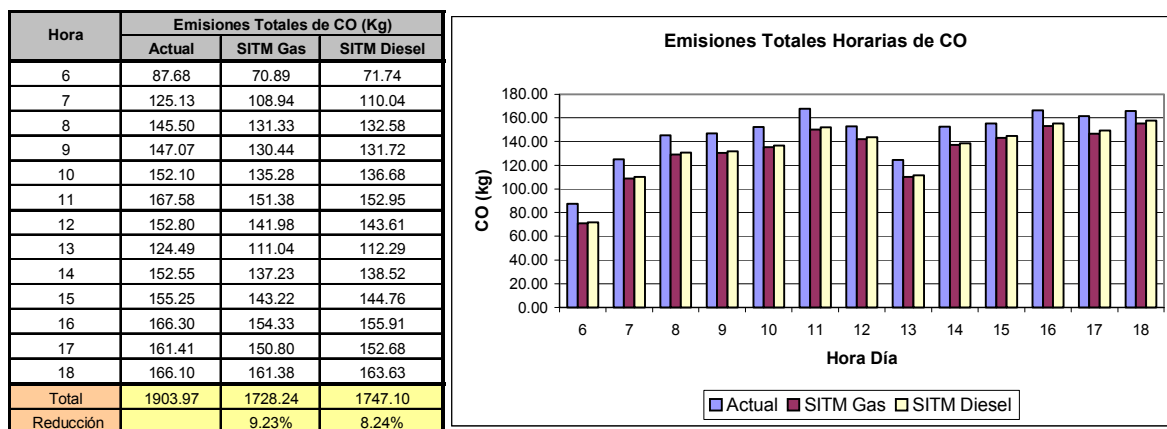


Figura 4-43: Emisiones Totales Horaria de CO (gr.), para las diferentes alternativas modeladas

Fuente: Autores

En la Figura 4-43, a primera vista exhibe que la alternativa del SITM a gas no representa un beneficio muy grande en comparación con la alternativa a Diesel, por lo que el porcentaje de reducción de CO de estas respecto a la situación actual es muy similar, sin embargo al analizar por separado estas flotas, se encuentra que los beneficios de la primera son mucho mayores en comparación a la segunda ya que la flota a diesel emite 34564 gr. de CO en el periodo de 6 AM a 6 PM, mientras que la flota a gas natural emite 15704 gr., lo que significa una reducción del 54% de esta flota respecto a la flota a diesel. (Ver Tabla 4-36)

Tipo de Veh.	Condiciones		
	Actual	SITM GAS	SITM Diesel
Auto	847540	817450	817450
Taxi	896690	870694	870694
Bus	18978	1320	1320
Buseta	126513	9290	9290
Camion	14250	13783	13783
Metrolinea	0	15704	34564
<b>Total</b>	<b>1903971</b>	<b>1728241</b>	<b>1747101</b>

Tabla 4-36: Emisiones Totales de CO (gr), por tipo de vehículo para las alternativas modeladas

Fuente: Autores

Para este comportamiento se puede afirmar que el sistema de transporte público colectivo actual, no es la principal fuente de CO y que en su lugar este contaminante proviene del resto de vehículos que circulan en la zona, tal como se muestra en las Figuras 4-44 a 4-46.

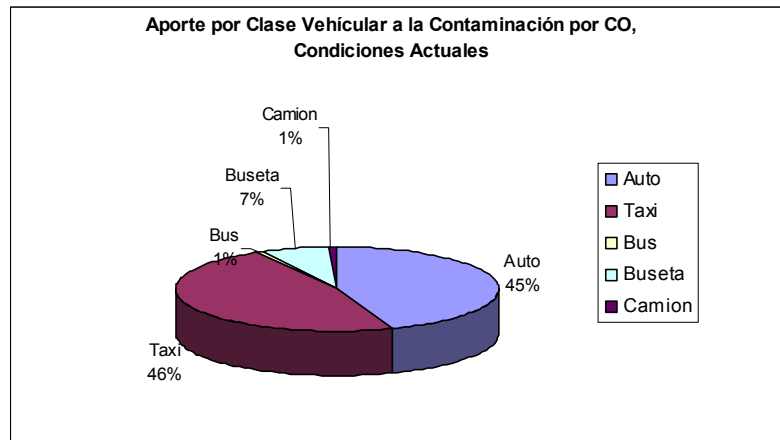


Figura 4-44: Aporte por clase vehicular a la contaminación por CO, Condiciones Actuales

Fuente: Autores

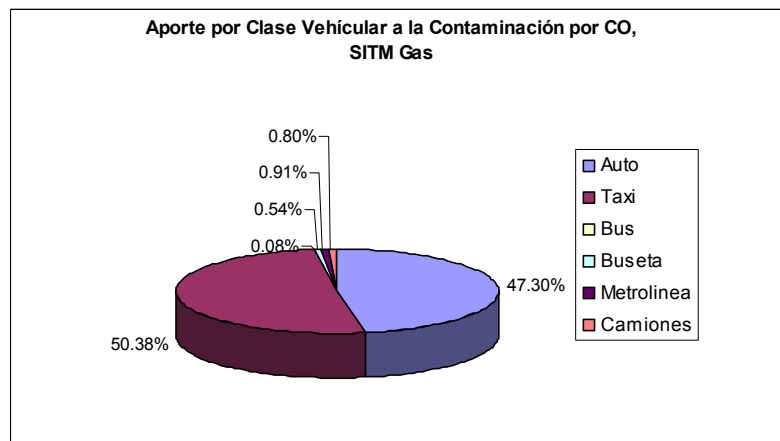


Figura 4-45: Aporte por clase vehicular a la contaminación por CO, SITM GAS

Fuente: Autores

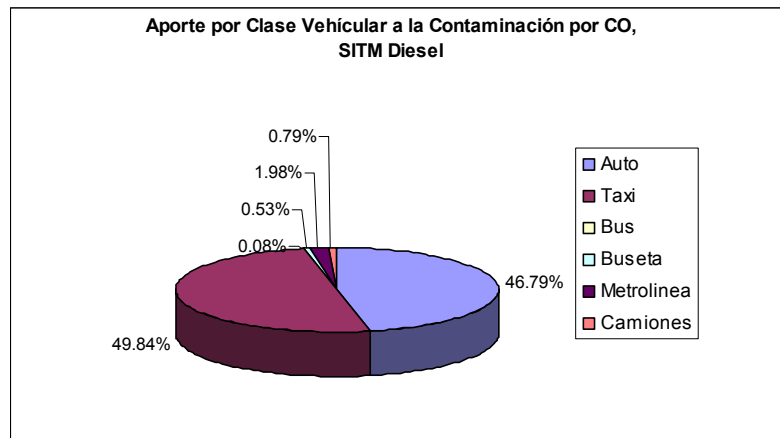


Figura 4-46: Aporte por clase vehicular a la contaminación por CO, SITM DIESEL

Fuente: Autores

En las anteriores figuras se puede observar que los principales responsables de la contaminación por CO, son los taxis y los automóviles (autos, camperos y camionetas), mientras que el aporte de los buses, busetas y vehículos del nuevo sistema es mínimo en comparación a la flota de vehículos livianos.

En las siguientes páginas se encontrarán los resultados obtenidos para cada sentido de circulación en las diferentes alternativas planteadas.

- Sentidos Este – Oeste y Oeste - Este

Las emisiones totales horarias de CO para las diferentes intersecciones en los sentidos de circulación Este - Oeste y Oeste - Este, se observan en las Figuras 4-47 y 4-48. En la figura 4-49 se aprecia la distribución por intersección para estos sentidos.

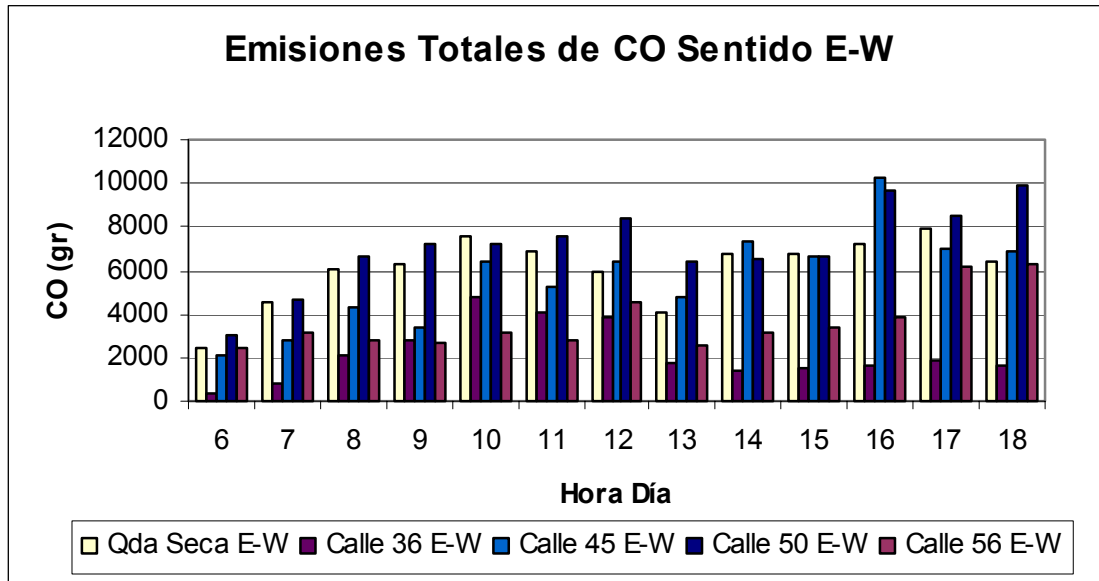


Figura 4-47: Emisión Horaria de CO, para Vehículos en movimiento en el sentido E-W de las intersecciones seleccionadas.

Fuente: Autores

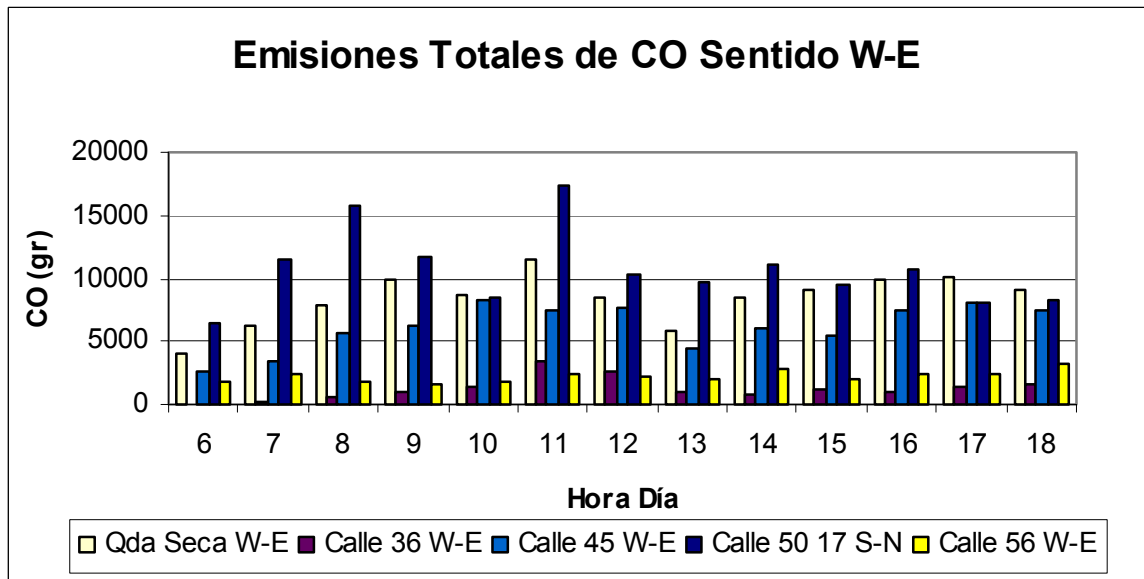


Figura 4-48 Emisión Horaria de CO, para Vehículos en movimiento en el sentido W-E de las intersecciones seleccionadas.

Fuente: Autores

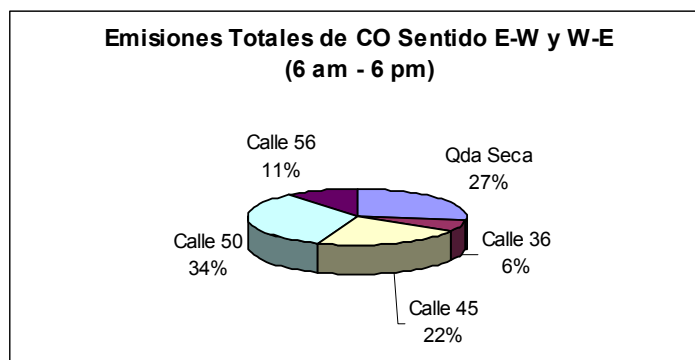


Figura 4-49: Aporte por intersección, en los Sentidos E-W y W-E a la contaminación por CO, debida a los vehículos en movimiento

Fuente: Autores

Analizando las gráficas, se puede observar que la calle 50 es la que mayor carga de CO aporta para estos sentidos, debido a que posee altos volúmenes vehiculares y a que su flota esta conformada por un alto porcentaje de automóviles, quienes son los principales responsables de las emisiones de CO. En la Tabla 4-37 se distribuyen las emisiones de la Carrera 17 (intersección Calle 50) por hora y tipo de vehículo.

Hora	CO_Auto	CO_Taxi	CO_Bus	CO_Busetas	CO_Camión
6	3017.36	3213.37	26.43	185.25	40.29
7	5383.54	5733.25	47.15	330.52	71.89
8	7305.37	7838.72	57.18	400.76	87.17
9	5480.25	5880.34	42.89	300.64	65.39
10	3976.17	4257.58	31.21	218.74	47.58
11	8062.68	8570.90	70.79	496.21	107.93
12	4765.64	5102.92	37.40	262.17	57.02
13	4501.99	4785.76	39.53	277.07	60.26
14	5152.88	5517.57	40.44	283.47	61.66
15	4394.82	4705.86	34.49	241.77	52.59
16	4977.78	5330.07	39.07	273.84	59.56
17	3732.81	3968.10	32.78	229.73	49.97
18	3886.95	4170.72	30.42	213.23	46.38
<b>Total general</b>	<b>64638.24</b>	<b>69075.16</b>	<b>529.79</b>	<b>3713.38</b>	<b>807.68</b>

Tabla 4-37: Emisiones horarias actuales de CO (gr.), por clase vehicular, en la Calle 50 con Cra 17 Sentido S-N

Fuente: Autores

### Emisiones Actuales de CO Calle 50 - 17 S-N

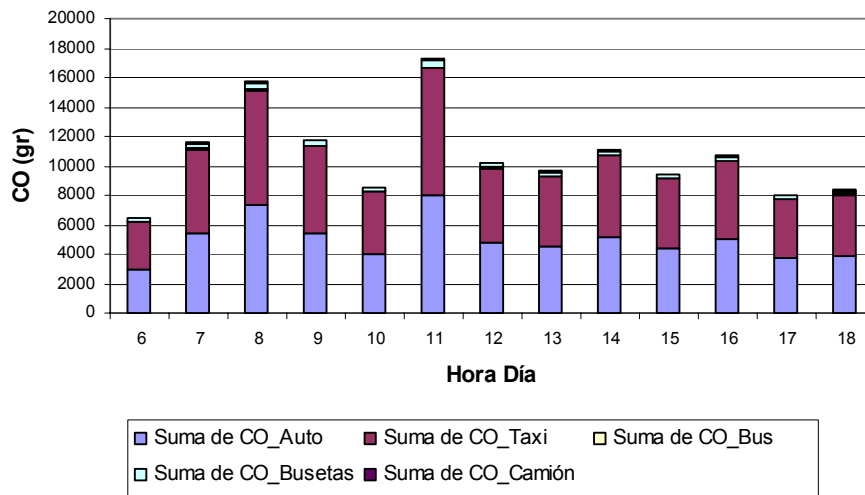


Figura 4-50: Emisiones horarias actuales de CO, por clase vehicular, en la Cra 17 con Calle 50 Sentido S-N

Fuente: Autores

### Variacion del Volumen Horario Calle 50 Carrera 17 S-N

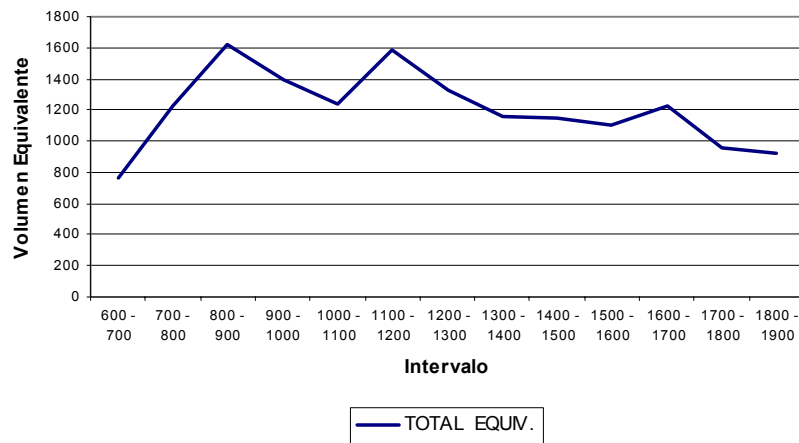


Figura 4-51: Variación del volumen horario, para la Carrera 17 con Calle 50 Sentido S-N

Fuente: SIEMENS. Abril de 2002.

En las Figuras 4.50 y 4.51 se observa que las emisiones de CO están directamente relacionadas con los volúmenes vehiculares, presentando una tendencia similar y sus valores máximos a las mismas horas, 8 AM y 11 AM.

Es importante observar en la Figura 4.50, que los principales responsables de la contaminación por CO son los vehículos livianos, es decir taxis y automóviles particulares, mientras que el aporte realizado por el resto de la flota es mucho menor.

- Sentido Norte - Sur

Las emisiones totales de CO para cada tramo de la carrera 15 en sentido Norte-Sur, para las diferentes alternativas modeladas, se presentan en las Figuras 4-52 a 4-56.

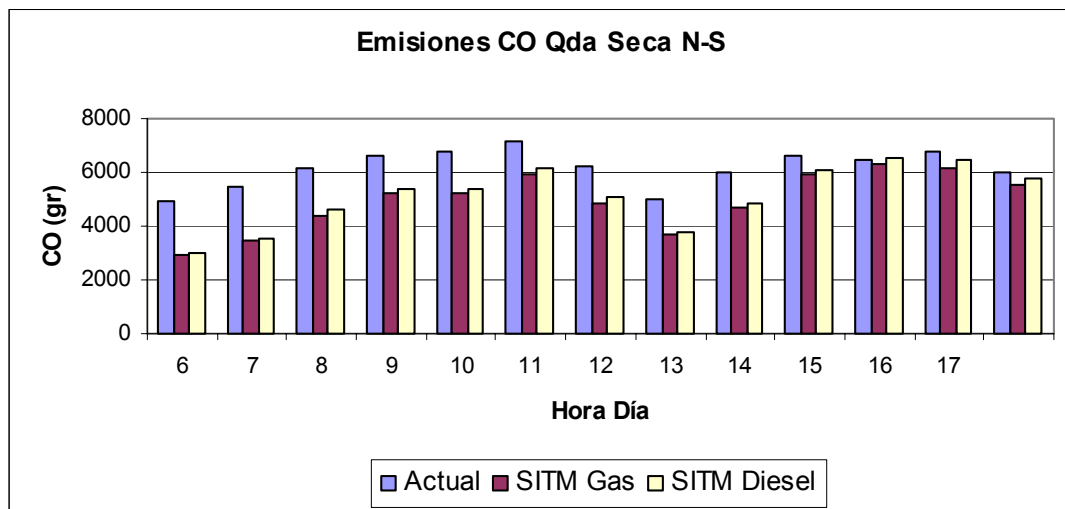


Figura 4-52: Emisiones de CO por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Avenida Quebrada Seca, sentido N-S, para las diferentes alternativas planteadas

Fuente: Autores

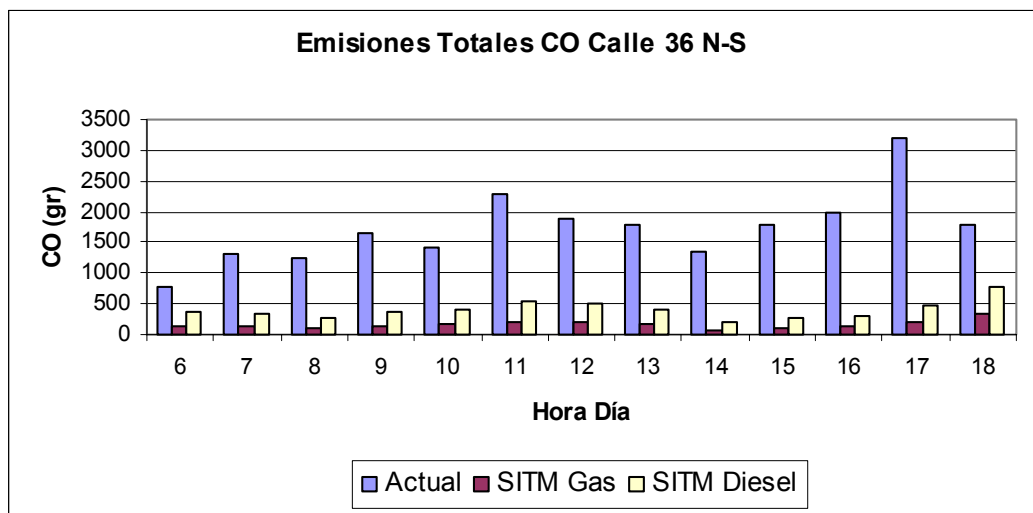


Figura 4-53: Emisiones de CO por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Calle 36, Sentido N-S, para las diferentes alternativas planteadas

Fuente: Autores

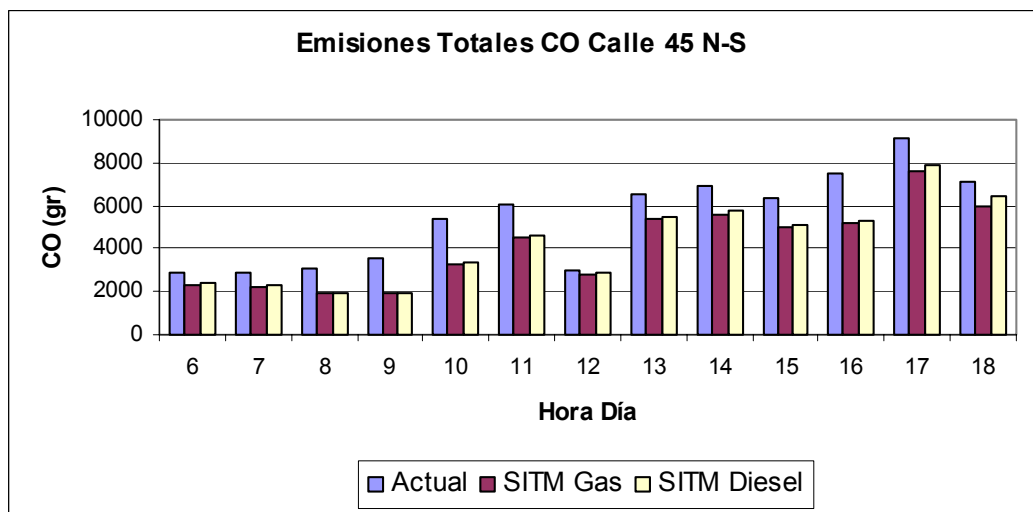


Figura 4-54: Emisiones de CO por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Calle 45, Sentido N-S, para las diferentes alternativas planteadas

Fuente: Autores

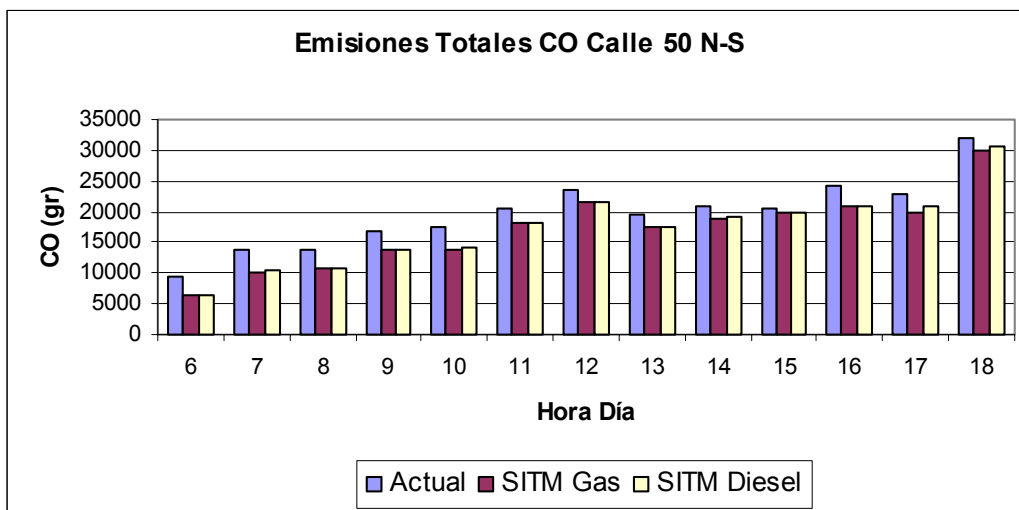


Figura 4-55: Emisiones de CO por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Calle 50, Sentido N-S, para las diferentes alternativas planteadas

Fuente: Autores

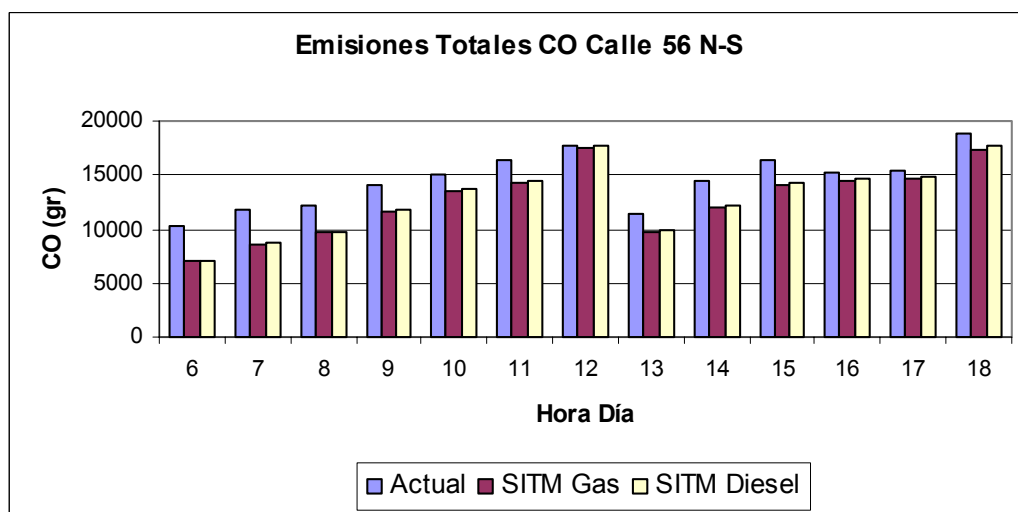


Figura 4-56: Emisiones de CO por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Calle 56, Sentido N-S, para las diferentes alternativas planteadas

Fuente: Autores

En las anteriores gráficas es importante resaltar que las alternativas planteadas para el SITM (diesel y Gas) reducen la emisiones de CO, pero no en una proporción significativa, siendo esta reducción un poco mayor para la alternativa que usa Gas Natural como combustible.

El tramo de la Carrera 15 con calle 36, actualmente es de circulación exclusiva para los vehículos de transporte público colectivo (buses, busetas y micros), los cuales con la implementación del SITM serán reemplazados por un número menor de vehículos, con mayor capacidad y mejores especificaciones tecnológicas, motivo por el cual, la reducción de las emisiones en este tramo es mayor.

Para la carrera 15 en el sentido analizado, al igual que en los sentido E-W y W-E, el mayor aporte es hecho por la intersección de la calle 50, debido a los altos volúmenes vehiculares que se presentan, principalmente vehículos livianos (taxis y particulares). Ver Tabla 4-38 y las Figuras 4-57 y 4-58.

Hora	CO_Auto	CO_Taxi	CO_Bus	CO_Busetas	CO_Camión
6	4062.69	4455.09	102.82	673.58	55.69
7	6038.52	6671.64	136.56	894.56	73.96
8	6098.11	6737.48	137.90	903.38	74.69
9	7328.96	8097.38	165.74	1085.72	89.77
10	7659.99	8384.67	194.34	1273.11	105.26
11	8946.94	9864.46	202.89	1329.13	109.90
12	10281.07	11253.71	260.84	1708.74	141.28
13	8528.19	9402.76	193.40	1266.92	104.75
14	9058.33	9987.27	205.42	1345.68	111.26
15	8929.67	9774.47	226.56	1484.13	122.71
16	10574.51	11574.92	268.29	1757.51	145.32
17	9984.24	10928.81	253.31	1659.40	137.20
18	13936.07	15282.11	352.71	2310.55	191.04
<b>Total general</b>	<b>111427.31</b>	<b>122414.76</b>	<b>2700.79</b>	<b>17692.40</b>	<b>1462.86</b>

Tabla 4-38: Emisiones horarias actuales de CO (gr.), por clase vehicular, en la Carrera 15 con Calle 50 Sentido N-S

Fuente: Autores

### Emisiones Actuales de CO Calle 50 15 N-S

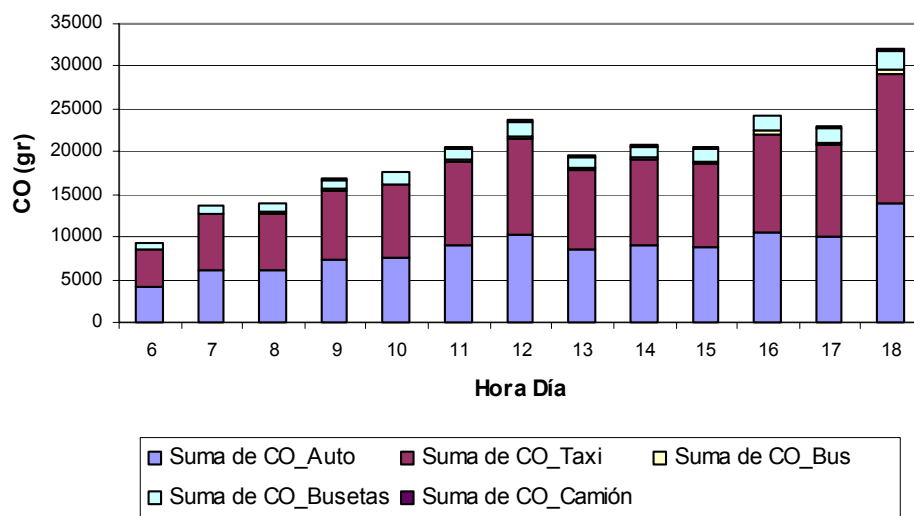


Figura 4-57: Emisiones horarias actuales de CO, por clase vehicular, en la Cra 15 con Calle 50, Sentido N-S  
Fuente: Autores

### Variación del Volumen Horario Calle 50 Carrera 15 N-S

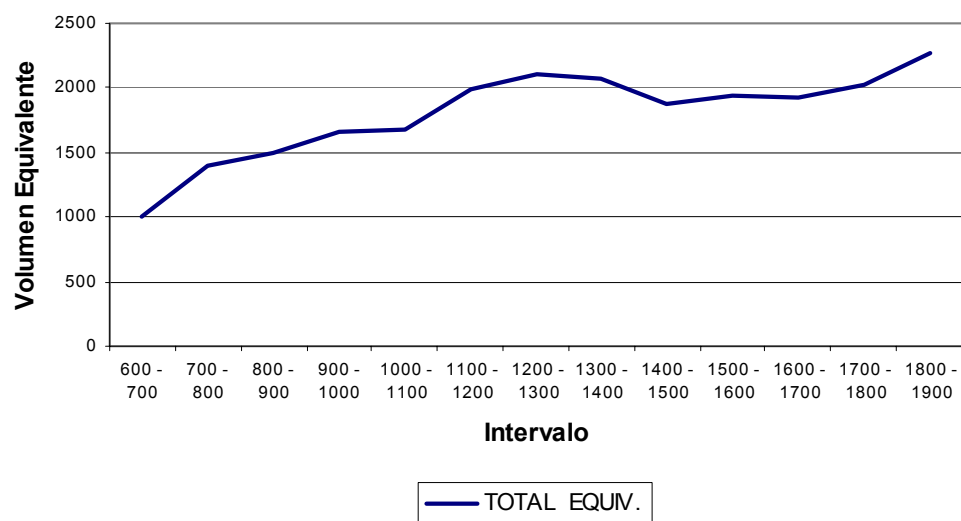


Figura 4-58: Variación del volumen horario, para la Carrera 15 con Calle 50 Sentido N-S  
Fuente: SIEMENS. Abril de 2002.

- Sentido Sur - Norte

Para el sentido Sur-Norte las emisiones para cada tramo se observan en las Figuras 4-59 a 4-63.

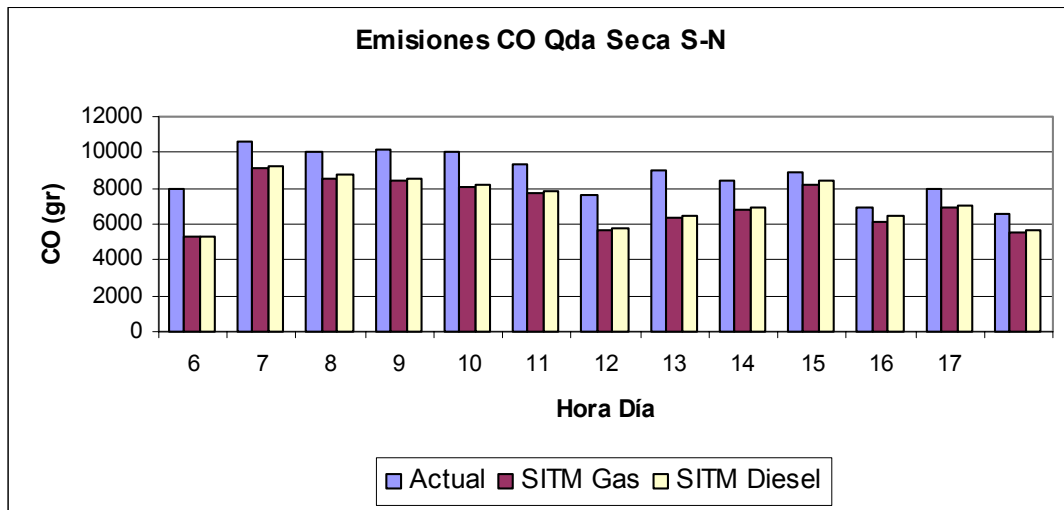


Figura 4-59: Emisiones de CO por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Avenida Quebrada Seca, sentido S-N, para las diferentes alternativas planteadas

Fuente: Autores

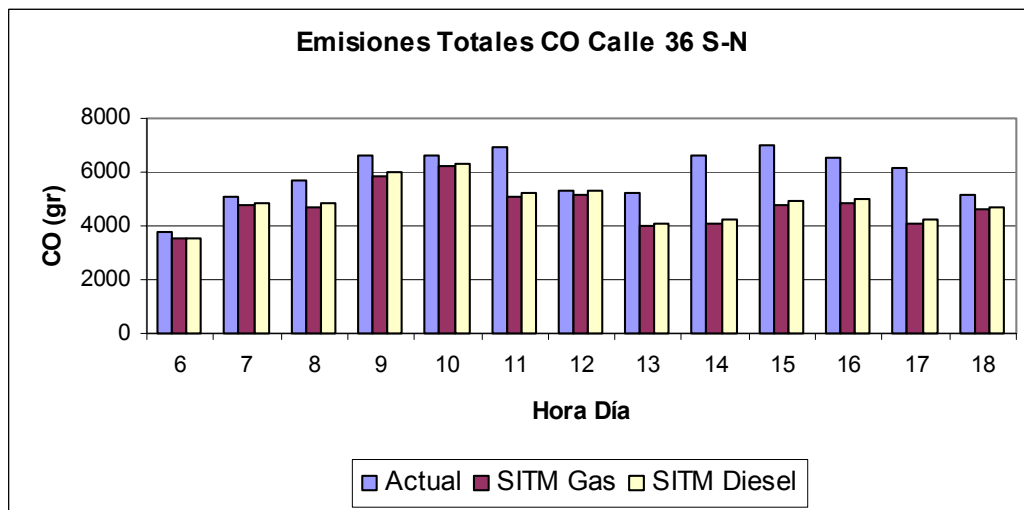


Figura 4-60: Emisiones de CO por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Calle 36, Sentido S-N, para las diferentes alternativas planteadas

Fuente: Autores

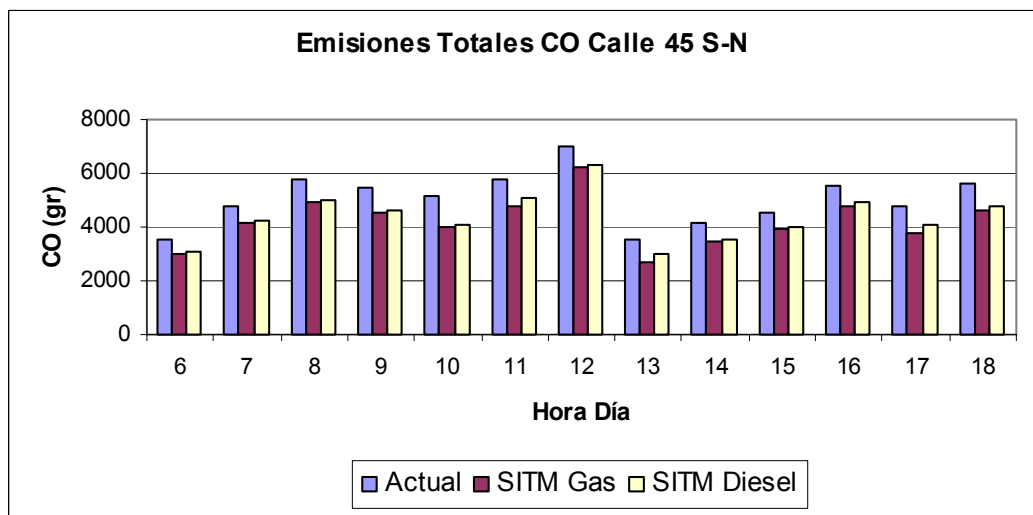


Figura 4-61: Emisiones de CO por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Calle 45, Sentido S-N, para las diferentes alternativas planteadas  
Fuente: Autores

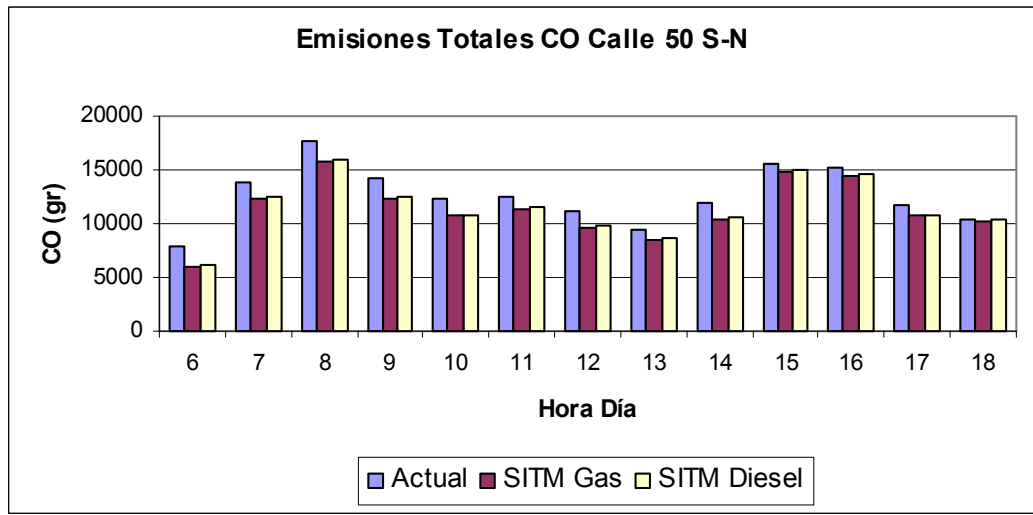


Figura 4-62: Emisiones de CO por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Calle 50, Sentido S-N, para las diferentes alternativas planteadas  
Fuente: Autores

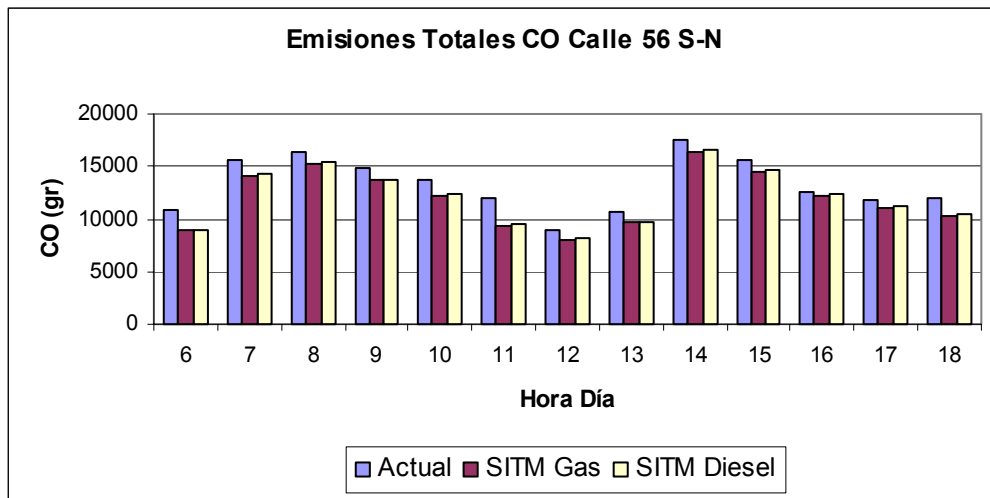


Figura 4-63: Emisiones de CO por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Calle 56, Sentido S-N, para las diferentes alternativas planteadas

Fuente: Autores

En las anteriores gráficas al igual que para el sentido Norte – Sur, se observa una pequeña reducción en las emisiones de CO, como consecuencia de la implementación del sistema de transporte masivo.

Para este sentido, la intersección que mas aporta a la contaminación por CO, es la Calle 56, cuyos volúmenes de tráfico y emisiones por clase vehicular para las condiciones actuales de operación, están compuestas como se describe en la Tabla 4-39 y las Figuras 4-64 y 4-65

Hora	CO_Auto	CO_Taxi	CO_Bus	CO_Busetas	CO_Camión
6	5378.78	4794.91	76.07	533.13	64.41
7	7767.43	6924.26	109.85	769.89	93.01
8	8117.96	7236.74	114.81	804.63	97.20
9	7390.16	6587.94	104.51	732.49	88.49
10	6814.41	6062.00	96.64	677.31	81.82
11	5950.45	5293.44	84.39	591.44	71.45
12	4442.76	3952.22	63.01	441.58	53.35
13	5296.18	4711.41	75.11	526.41	63.59
14	8651.62	7696.36	122.69	859.92	103.88
15	7767.52	6909.88	110.16	772.05	93.27
16	6277.97	5584.79	89.03	623.99	75.38
17	5904.18	5252.28	83.73	586.84	70.89
18	5932.84	5288.82	83.90	588.05	71.04
<b>Total general</b>	<b>85692.26</b>	<b>76295.05</b>	<b>1213.89</b>	<b>8507.72</b>	<b>1027.79</b>

Tabla 4-39: Emisiones horarias actuales de CO (gr.), por clase vehicular, en la Carrera 15 con Calle 56 Sentido S-N

Fuente: Autores

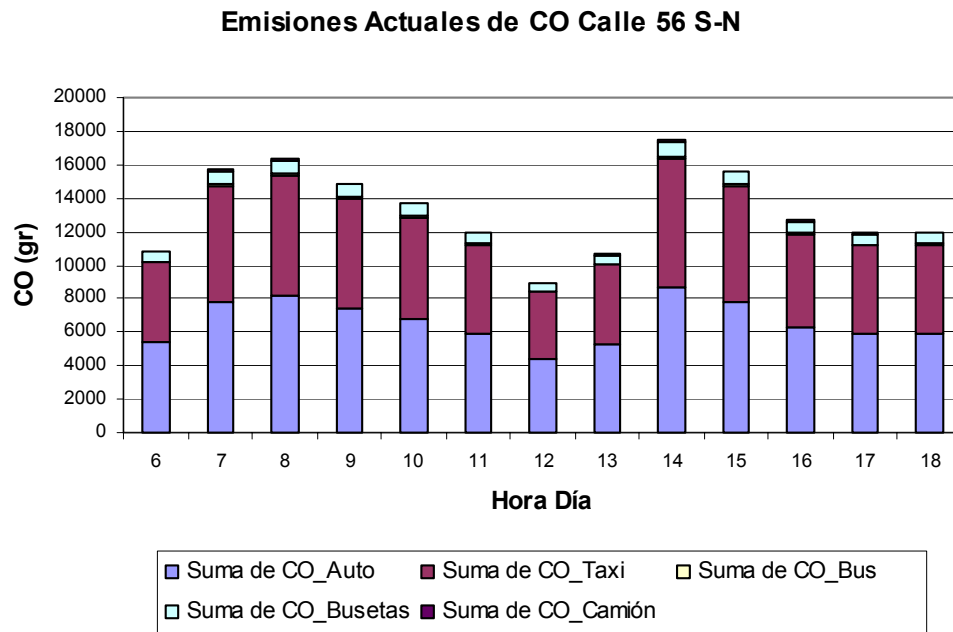
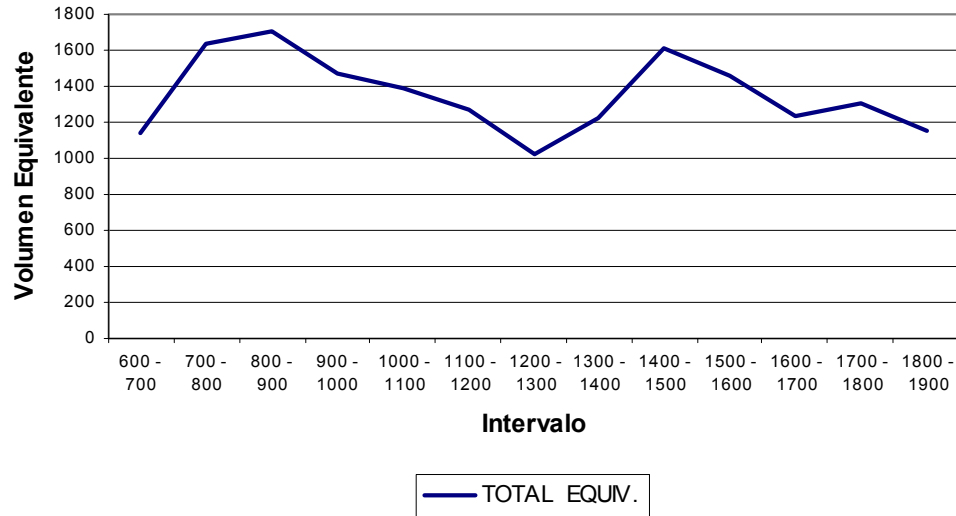


Figura 4-64: Emisiones horarias actuales de CO, por clase vehicular, en la Cra 15 con Calle 56, Sentido S-N

Fuente: Autores

**Variación del Volumen Horario  
Calle 56 Carrera 15 S-N**



*Figura 4-65: Variación del volumen horario, para la Carrera 15 con Calle 56, Sentido S-N  
Fuente: SIEMENS. Abril de 2002.*

Del comportamiento observado en las emisiones de monóxido de carbono, se puede concluir que están altamente influenciadas por la actividad vehicular, representada por los aforos realizados por la empresa Siemens en 2002, y que la principal fuente de este contaminante son los vehículos de pasajeros.

Para la carrera 15 en sentido sur-norte esta situación se evidencia ya que los volúmenes y las emisiones tienen la misma tendencia, presentando dos picos, uno a las 8 AM y otro a las 2 PM.

#### 4.3.1.2 Emisiones de PM<sub>10</sub>

El comportamiento de la emisión de este contaminante, para las diferentes alternativas modeladas del SITM, exhibe una importante reducción en comparación a las condiciones actuales, siendo para el caso de la flota a diesel del 75.23%, mientras que para la flota a gas del 76.63%.

La variación horaria de la emisión total de PM, para las diferentes alternativas se muestra en la Figura 4-66.

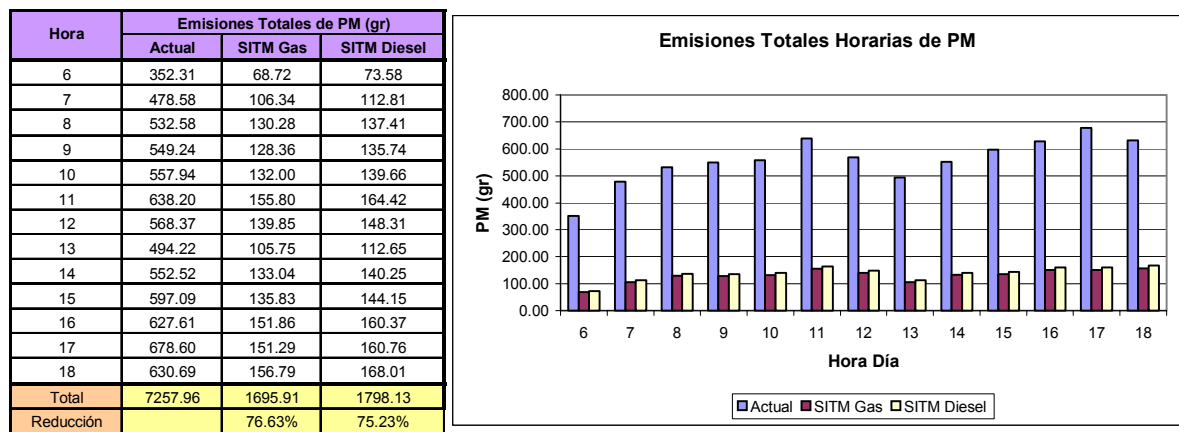


Figura 4-66: Emisiones Totales Horaria de PM (gr), para las diferentes alternativas modeladas

Fuente: Autores

La Figura 4-66 muestra que la reducción alcanzada por alternativa del SITM a gas es muy similar a la de la alternativa a Diesel y pareciera que trabajar con una u otra flota fuera lo mismo, sin embargo al analizarlas por separado, se encuentra que los beneficios de la flota a gas son mucho mayores en comparación que la flota a diesel, ya que mientras esta emite 107 gr. de PM en el periodo de 6 AM a 6 PM, la flota a gas natural solo emite 5 gr., lo que significa una reducción del 95% con respecto a la flota diesel, no obstante esta reducción no es muy significativa comparada con el total emitido, ya que

con la implementación del SITM, el aporte de PM de este, es mínimo, pasando a tener mas importancia el resto de fuentes. (Ver Tabla 4-40)

Tipo de Veh.	Condiciones		
	Actual	SITM GAS	SITM Diesel
Auto	344	332	332
Taxi	396	384	384
Bus	2729	190	190
Buseta	3221	236	236
Camion	567	548	548
Metrolinea	0	5	107
<b>Total</b>	<b>7258</b>	<b>1691</b>	<b>1691</b>

Tabla 4-40: Emisiones Totales de PM (gr.), por tipo de vehículo para las alternativas modeladas

Fuente: Autores

La alta reducción observada en la emisión de PM, con la implementación del SITM, deja ver claro que los buses y busetas actuales son las principales fuentes de este contaminante, como se muestra en la Figura 4-67

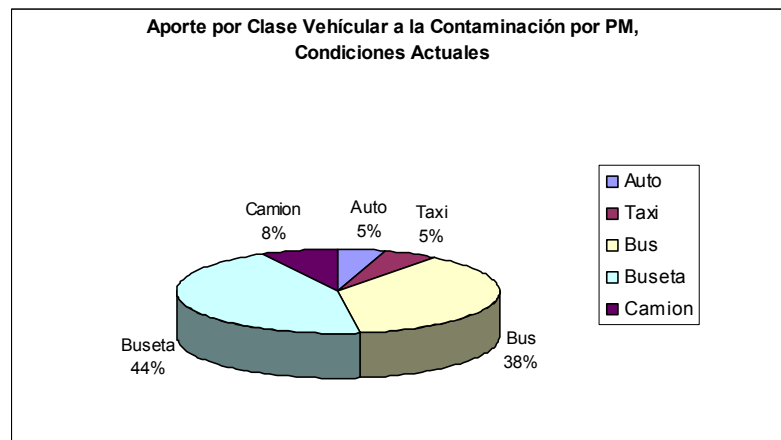


Figura 4-67: Aporte por clase vehicular a la contaminación por PM, Condiciones Actuales

Fuente: Autores

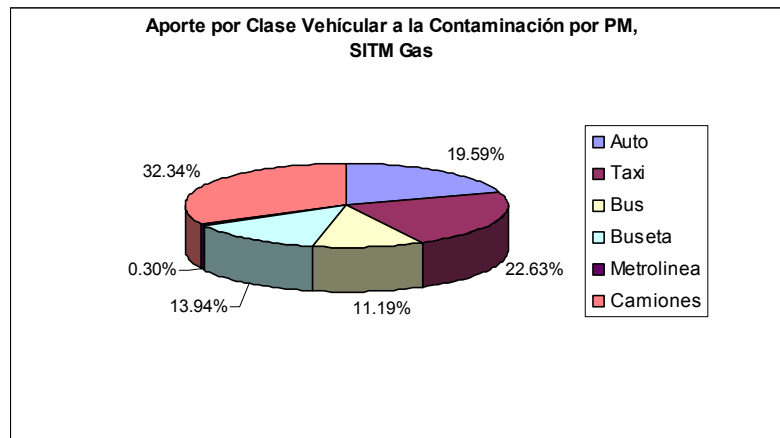


Figura 4-68: Aporte por clase vehicular a la contaminación por PM, SITM GAS

Fuente: Autores

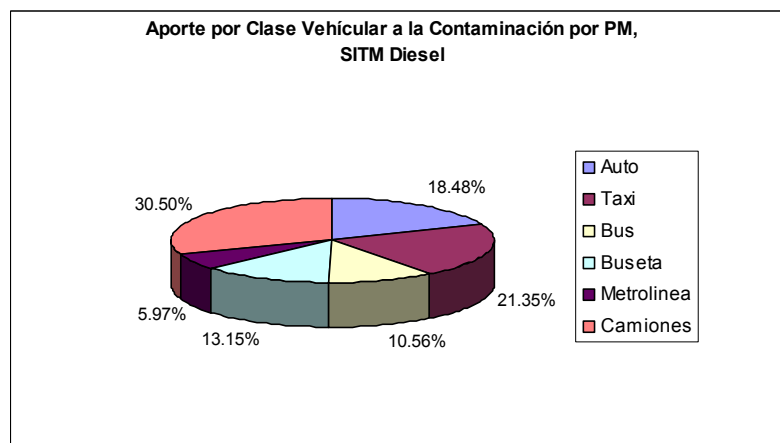


Figura 4-69: Aporte por clase vehicular a la contaminación por PM, SITM DIESEL

Fuente: Autores

En las Figuras 4-68 y 4-69 se puede observar que al implementar el SITM, el transporte público colectivo deja de ser la principal fuente de este contaminante, pasando a ser más importantes los camiones, taxis y autos, por lo que las futuras medidas de control para reducir estas emisiones deben estar orientadas a estos.

En las siguientes páginas se encontraran los resultados obtenidos para cada sentido de circulación en las diferentes alternativas planteadas.

- Sentidos Este – Oeste y Oeste – Este

Las emisiones totales horarias de PM para las diferentes intersecciones en los sentidos de circulación Este-Oeste y Oeste-Este, se observan en las Figuras 4-70 a 4-72.

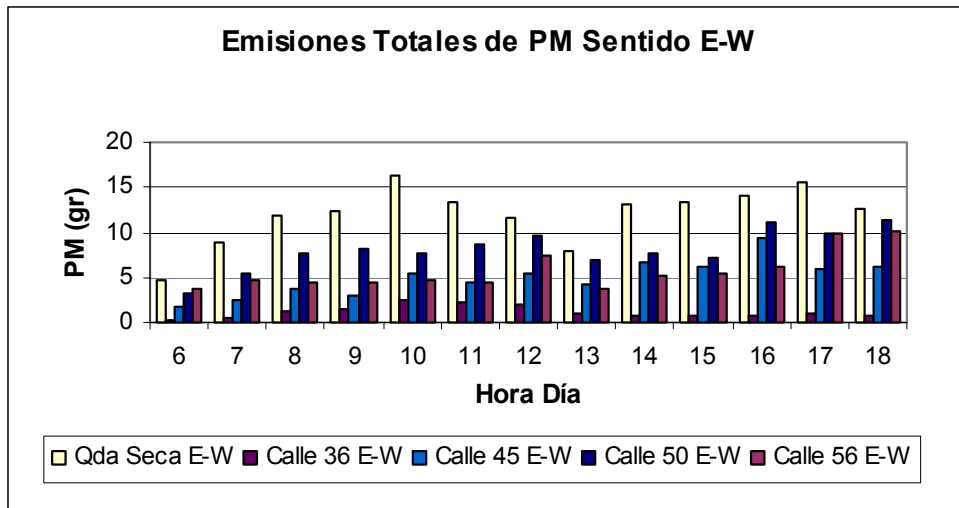


Figura 4-70: Emisión Horaria de PM, para Vehículos en movimiento en el sentido E-W de las intersecciones seleccionadas.

Fuente: Autores

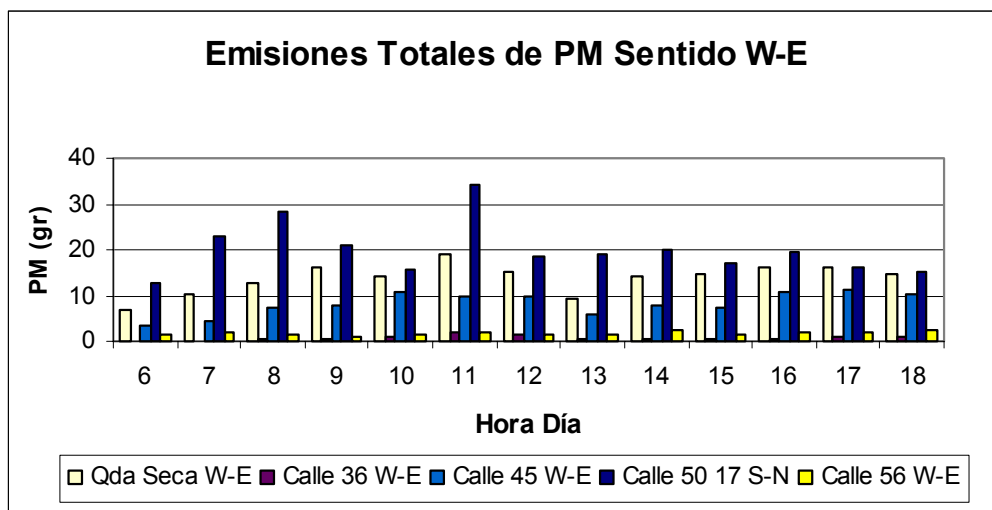


Figura 4-71: Emisión Horaria de PM, para Vehículos en movimiento en el sentido W-E de las intersecciones seleccionadas.

Fuente: Autores

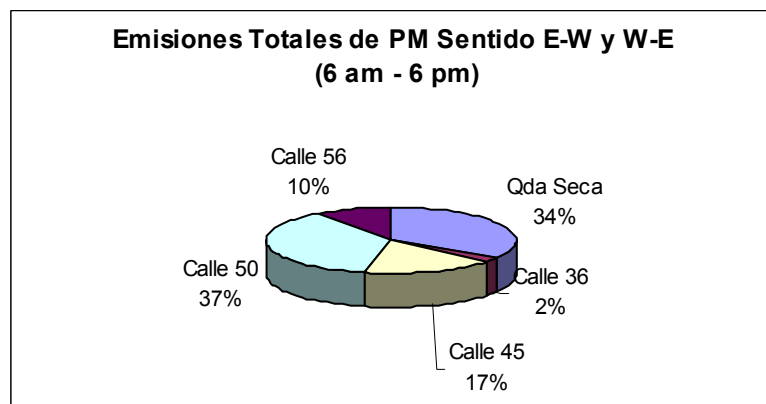


Figura 4-72: Aporte por intersección, en los Sentidos E-W y W-E a la contaminación por PM, debida a los vehículos en movimiento

Fuente: Autores

Para estos sentidos de circulación, las mayores emisiones se encuentran en la calle 50 y las menores en la calle 36, comportamiento causado por el alto volumen de buses que circula por la Carrera 17 (en la intersección de la calle 50), mientras que por la calle 36 la circulación de buses esta restringida, siendo estos los principales emisores de PM.

Este aspecto se observa en la Figura 4-73, donde cerca del 66% de las emisiones de PM en la Carrera 17 Sentido S-N, provienen de los vehículos de transporte público colectivo.

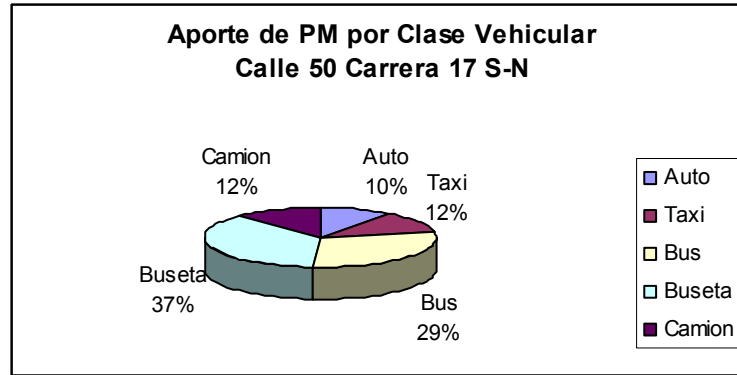


Figura 4-73: Aporte a la contaminación por PM, por clase vehicular, para la Carrera 17 con calle 50, Sentido S-N

Fuente: Autores

Para esta vía se presenta en la Tabla 4-41 y la Figuras 4-74 la variación en la emisión de PM por tipo de vehículo

Hora	PM_Auto	PM_Taxi	PM_Bus	PM_Busetas	PM_Camión
6.00	1.23	1.46	3.80	4.71	1.60
7.00	2.20	2.61	6.78	8.41	2.86
8.00	2.96	3.38	8.22	10.19	3.46
9.00	2.22	2.54	6.17	7.65	2.60
10.00	1.61	1.84	4.49	5.56	1.89
11.00	3.30	3.92	10.18	12.62	4.29
12.00	1.93	2.21	5.38	6.67	2.27
13.00	1.84	2.19	5.68	7.05	2.40
14.00	2.09	2.39	5.81	7.21	2.45
15.00	1.78	2.04	4.96	6.15	2.09
16.00	2.02	2.31	5.62	6.96	2.37
17.00	1.53	1.82	4.71	5.84	1.99
18.00	1.57	1.80	4.37	5.42	1.84
<b>Total general</b>	<b>26.30</b>	<b>30.51</b>	<b>76.17</b>	<b>94.44</b>	<b>32.10</b>

Tabla 4-41: Emisiones horarias actuales de PM (gr), por clase vehicular, en la Carrera 17 con Calle 50 Sentido S-N

Fuente: Autores

### Emisiones Actuales de PM Calle 50 - 17 S-N

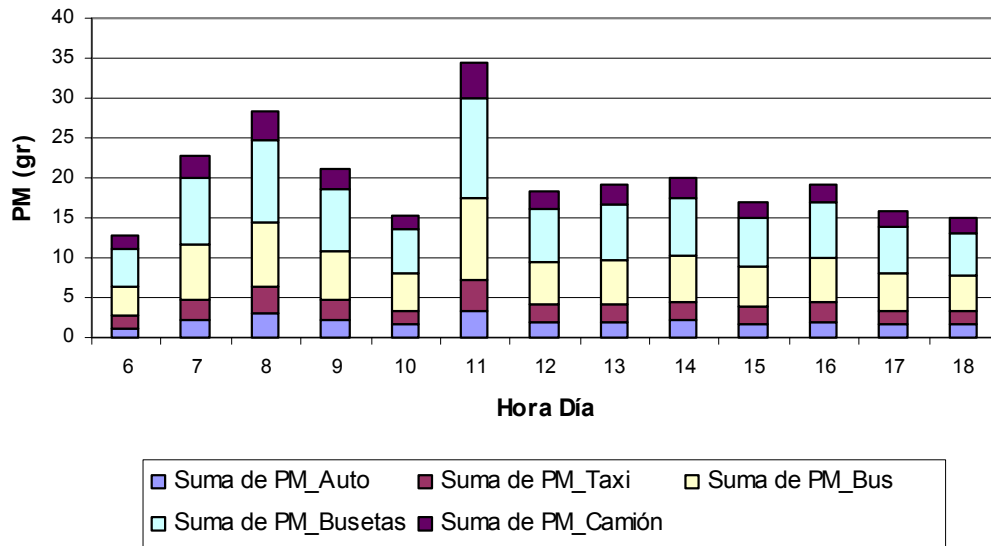


Figura 4-74: Emisiones horarias actuales de PM, por clase vehicular, en la Cra 17 con Calle 50, Sentido S-N  
Fuente: Autores

El comportamiento del PM<sub>10</sub>, al igual que el CO, está directamente influenciado por el volumen vehicular, siendo este uno de los principales factores a determinar en la estimación de las emisiones vehiculares. La emisión de PM presenta un pico a las 8 AM y otro a las 11 AM, al igual que los volúmenes de vehículos equivalentes mostrados en la Figura 4.51

- Sentido Norte - Sur

Las emisiones totales de material particulado PM, para cada tramo de la carrera 15 en sentido Norte-Sur, para las diferentes alternativas modeladas, se presentan en las Figuras 4-75 a 4-79.

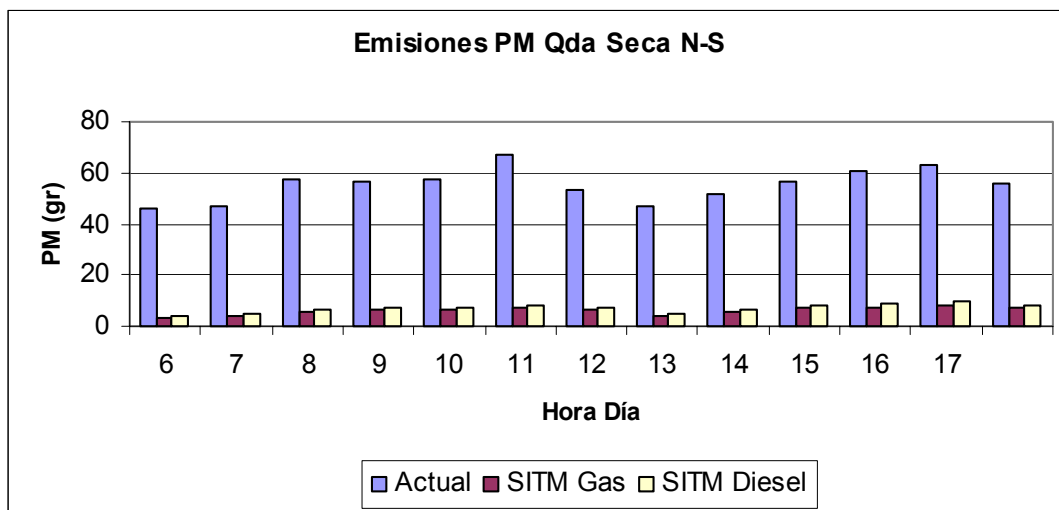


Figura 4-75: Emisiones de PM por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Avenida Quebrada Seca, sentido N-S, para las diferentes alternativas planteadas  
Fuente: Autores

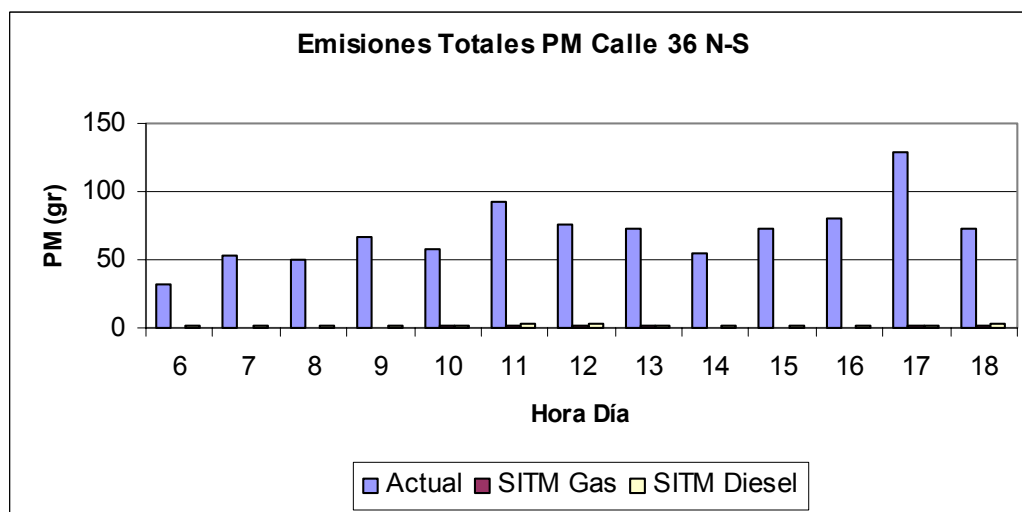


Figura 4-76: Emisiones de PM por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Calle 36 Sentido N-S, para las diferentes alternativas planteadas  
Fuente: Autores

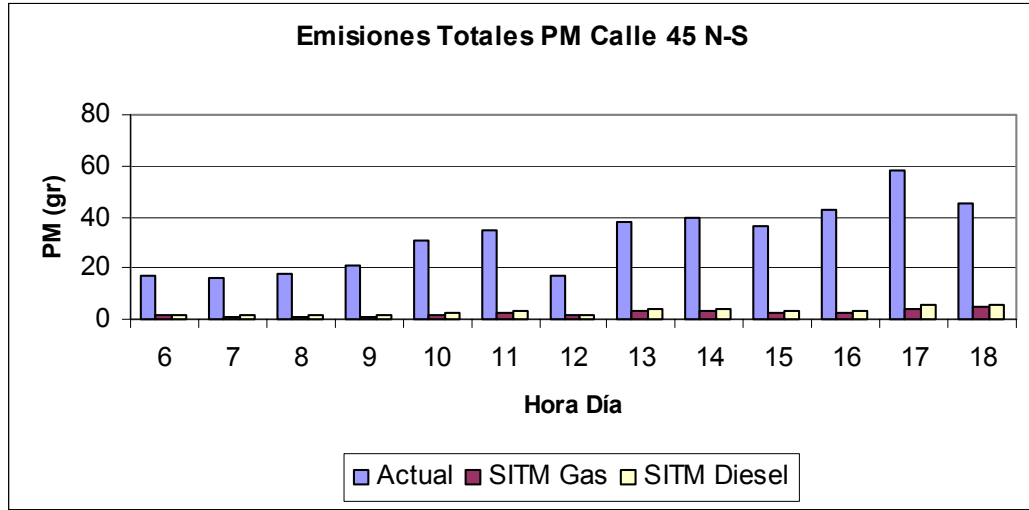


Figura 4-77: Emisiones de PM por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Calle 45 Sentido N-S, para las diferentes alternativas planteadas

Fuente: Autores

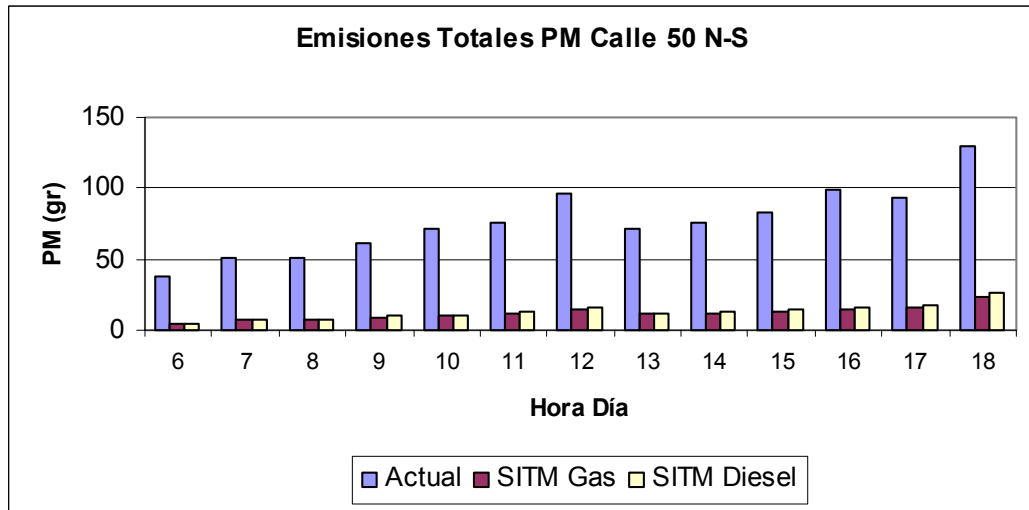


Figura 4-78: Emisiones de PM por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Calle 50 Sentido N-S, para las diferentes alternativas planteadas

Fuente: Autores

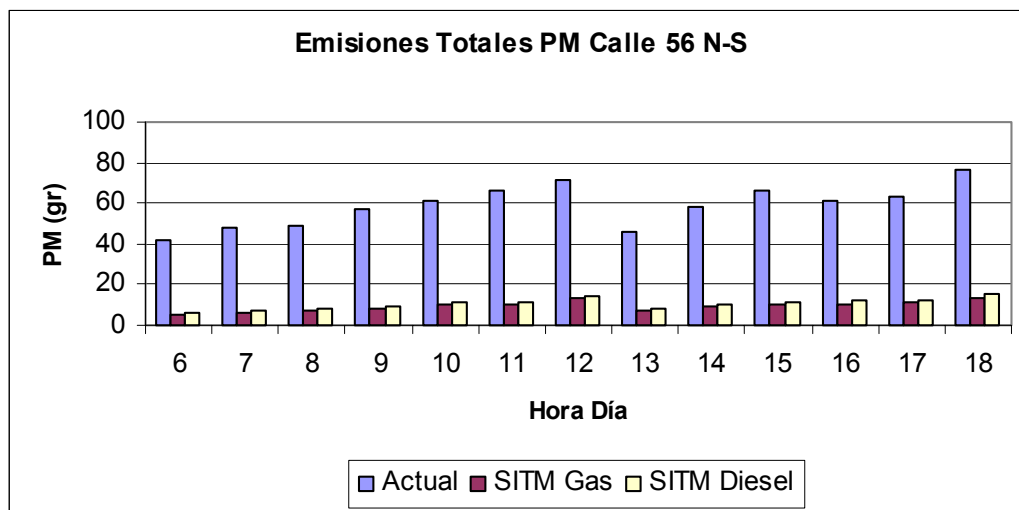


Figura 4-79: Emisiones de PM por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Calle 56 Sentido N-S, para las diferentes alternativas planteadas

Fuente: Autores

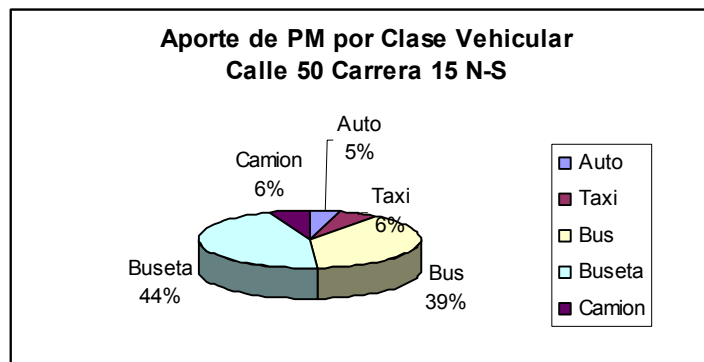
En las anteriores gráficas se observa una importante reducción en las emisiones de PM, bajo la implementación del SITM, este comportamiento es debido a que el nuevo sistema reemplaza los buses y busetas actuales, siendo estos las principales fuentes de emisión de este contaminante, por nuevos vehículos diseñados para satisfacer estándares de emisión mas estrictos.

Otro aspecto que incide en la reducción observada es que la flota del SITM es mucho menor que la que opera actualmente, puesto que los volúmenes vehiculares juegan un papel muy importante al momento de estimar las emisiones.

Para las alternativas del SITM planteadas se percibe una reducción en las emisiones un poco mayor para la flota operando con Gas natural como combustible que para la flota operando a diesel, este aspecto es importante al momento de evaluar las ventajas y desventajas tanto ambientales como económicas, para la selección del combustible.

En el tramo de la Carrera 15 con calle 36, se observan unas reducciones casi del 100%, este comportamiento se debe a que este tramo es de circulación exclusiva de buses y busetas los cuales bajo la implementación del nuevo sistema de transporte se reemplazan en tu totalidad como se mencionó anteriormente.

Para la carrera 15 en el sentido analizado, al igual que en los sentido E-W y W-E, el mayor aporte es hecho por la intersección de la calle 50 debido a los altos volúmenes vehiculares que presenta y a la alta proporción de buses en estos. En la Figura 4-80 se aprecia esta proporción.



*Figura 4-80: Aporte a la contaminación por PM, por clase vehicular, para la Carrera 15 con calle 50, Sentido N –S*

*Fuente: Autores*

En la Tabla 4-42 y la Figura 4-81 se describe la emisión de PM<sub>10</sub> en la Carrera 15 con Calle 50, para cada hora, discriminada en cada tipo de vehículo.

La cantidad de PM emitido, como es de esperarse, es proporcional al volumen vehicular presente, el cual como se mostró en la Figura 4.54, posee

la misma tendencia y sus valores máximos a las 12 PM y a las 6 PM, al igual que en la Figura 4.73.

Hora	PM_Auto	PM_Taxi	PM_Bus	PM_Busetas	PM_Camión
6	1.66	2.04	14.78	17.15	2.22
7	2.45	2.89	19.63	22.78	2.94
8	2.47	2.92	19.83	23.00	2.97
9	2.97	3.51	23.83	27.65	3.57
10	3.14	3.86	27.94	32.42	4.19
11	3.63	4.30	29.17	33.84	4.37
12	4.21	5.18	37.50	43.51	5.62
13	3.46	4.10	27.81	32.26	4.17
14	3.68	4.35	29.53	34.27	4.43
15	3.66	4.50	32.57	37.79	4.88
16	4.33	5.33	38.57	44.75	5.78
17	4.09	5.03	36.42	42.25	5.46
18	5.70	7.00	50.71	58.83	7.60
<b>Total general</b>	<b>45.44</b>	<b>55.01</b>	<b>388.31</b>	<b>450.50</b>	<b>58.22</b>

Tabla 4-42: Emisiones horarias actuales de PM (gr.), por clase vehicular, en la Carrera 15 con Calle 50 Sentido N-S

Fuente: Autores

#### Emisiones Actuales de PM Calle 50 15 N-S

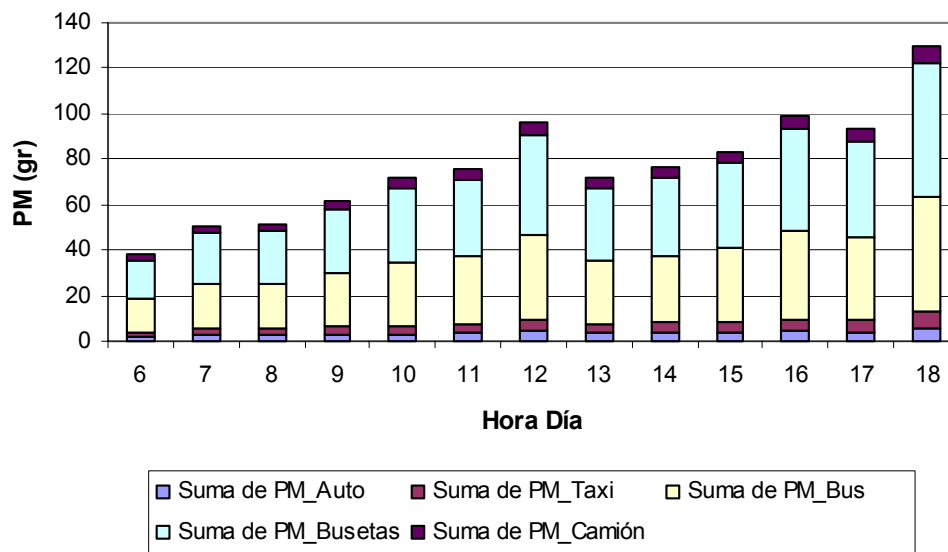


Figura 4-81: Emisiones horarias actuales de PM, por clase vehicular, en la Cra 15 con Calle 50, Sentido N-S

Fuente: Autores

- Sentido Sur - Norte

Para el sentido Sur-Norte las emisiones de material particulado para cada intersección se describen en las Figuras 4-82 a 4-86

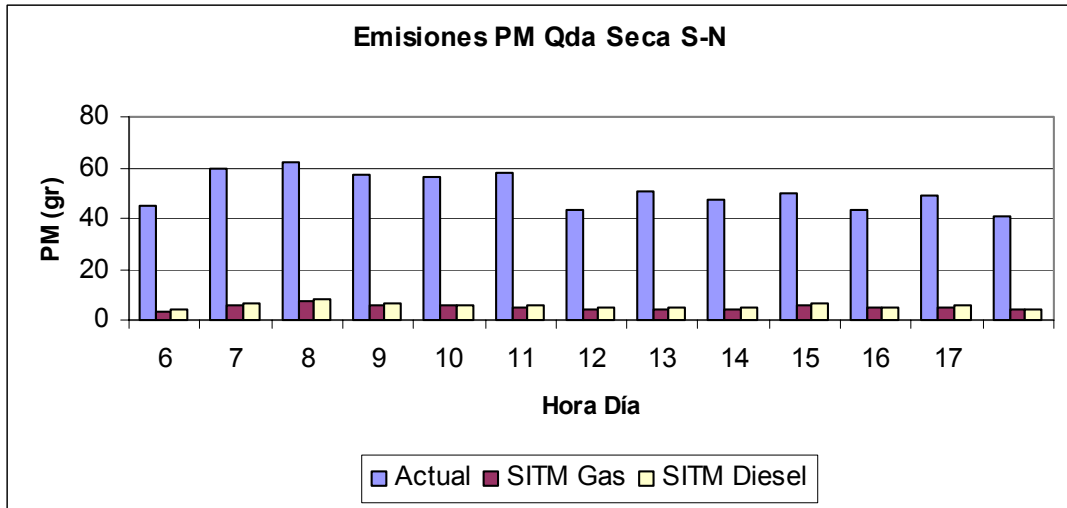


Figura 4-82: Emisiones de PM por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Avenida Quebrada Seca, sentido S-N, para las diferentes alternativas planteadas

Fuente: Autores

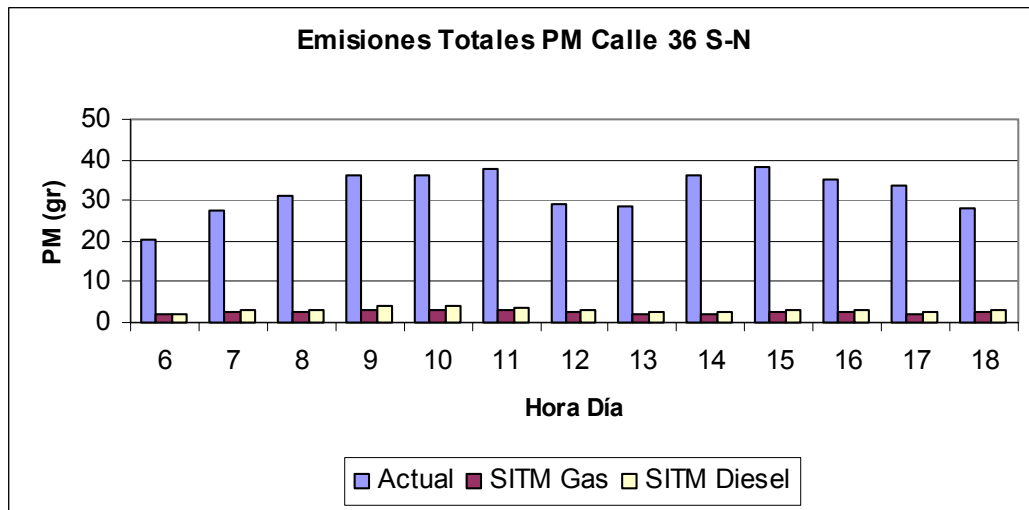


Figura 4-83: Emisiones de PM por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Calle 36, Sentido S-N, para las diferentes alternativas planteadas

Fuente: Autores

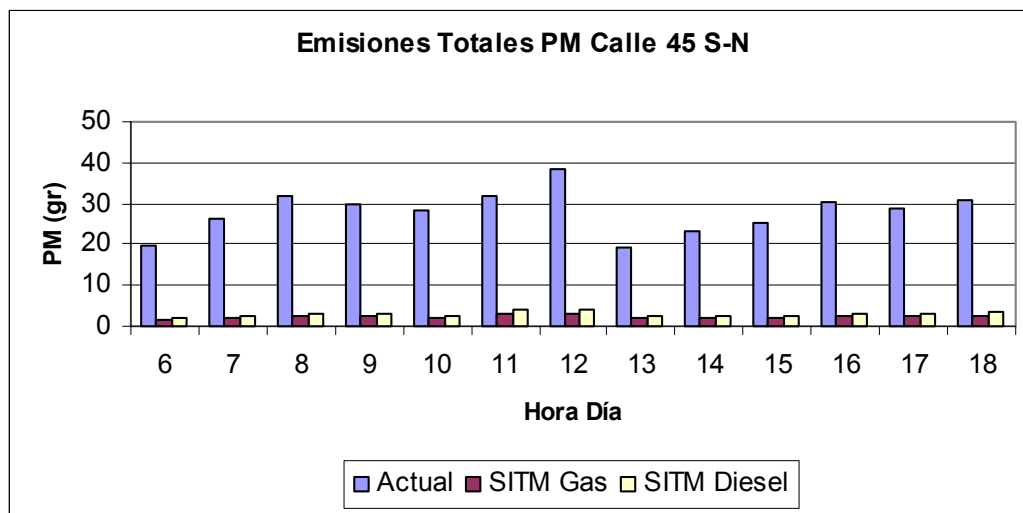


Figura 4-84: Emisiones de PM por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Calle 45, Sentido S-N, para las diferentes alternativas planteadas

Fuente: Autores

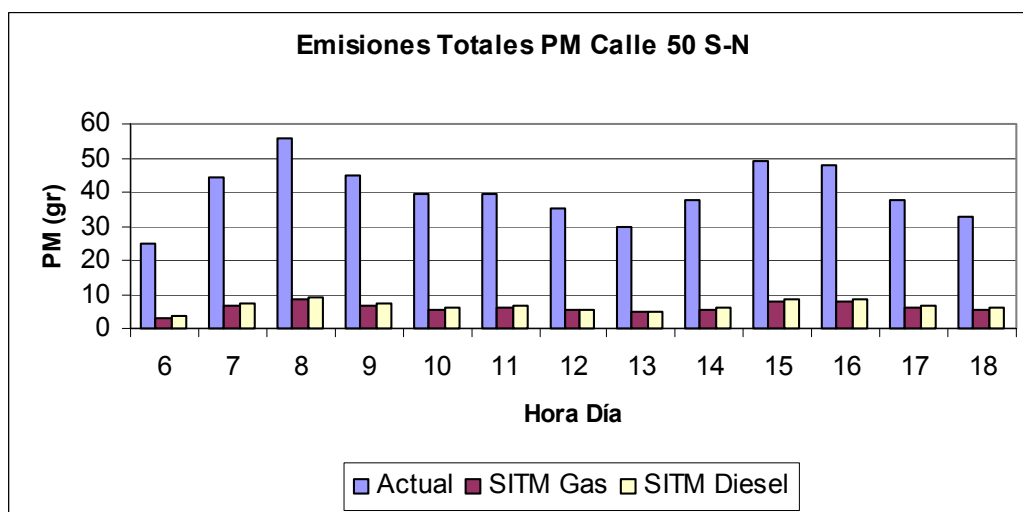


Figura 4-85: Emisiones de PM por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Calle 50, Sentido S-N, para las diferentes alternativas planteadas

Fuente: Autores

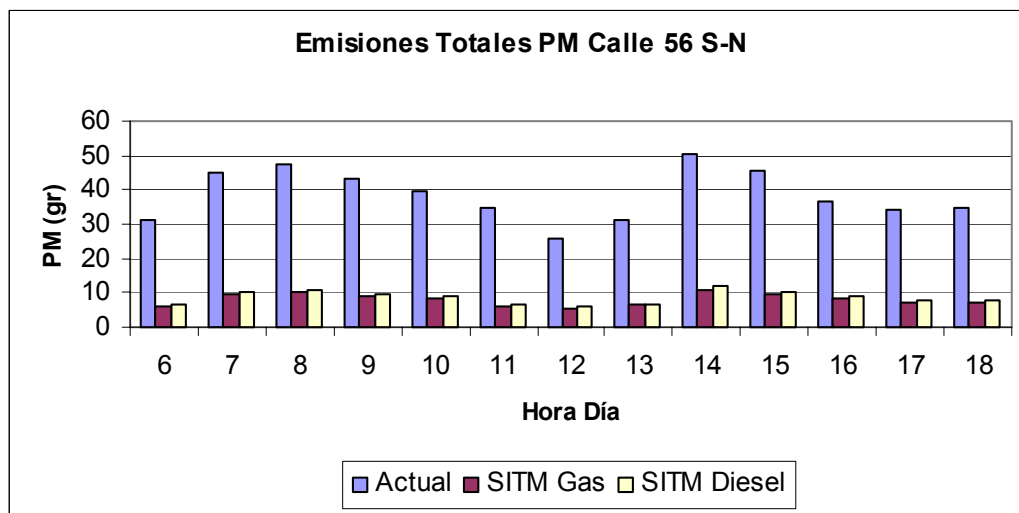


Figura 4-86: Emisiones de PM por Vehículos en movimiento en la Carrera 15 con Calle 56, Sentido S-N, para las diferentes alternativas planteadas

Fuente: Autores

En las anteriores gráficas al igual que para el sentido Norte – Sur, se observa una reducción significativa en la emisiones de PM, con la implementación del SITM.

La intersección que más aporta a la contaminación por material particulado PM<sub>10</sub>, para este sentido de circulación, es la Avenida Quebrada Seca. Los volúmenes de tráfico y emisiones por clase vehicular para las condiciones actuales de operación, para la Quebrada Seca, se describen en la Tabla 4-43 y en las Figura 4-87 y 4-88

En las gráficas se observa la relación existente entre las emisiones y la actividad vehicular representada por los conteos de tráfico, ya que las dos curvas presentan la misma tendencia y el máximo se encuentra a las 8 AM.

Hora	PM_Auto	PM_Taxi	PM_Bus	PM_Busetas	PM_Camión
6	1.02	1.90	17.90	22.23	1.68
7	1.36	2.52	23.74	29.49	2.23
8	1.28	2.48	24.90	30.93	2.33
9	1.31	2.44	22.94	28.49	2.15
10	1.29	2.39	22.53	27.98	2.11
11	1.21	2.33	23.45	29.12	2.20
12	0.99	1.84	17.31	21.49	1.62
13	1.17	2.17	20.39	25.33	1.91
14	1.08	2.01	18.89	23.46	1.77
15	1.14	2.13	20.02	24.86	1.88
16	0.90	1.73	17.41	21.62	1.63
17	1.02	1.97	19.83	24.63	1.86
18	0.85	1.64	16.45	20.43	1.54
<b>Total general</b>	<b>14.61</b>	<b>27.55</b>	<b>265.74</b>	<b>330.06</b>	<b>24.91</b>

Tabla 4-43: Emisiones horarias actuales de PM (gr.), por clase vehicular, en la Carrera 15 con Avenida Quebrada Seca Sentido S-N

Fuente: Autores

#### Emisiones Actuales de PM Qda Seca S-N

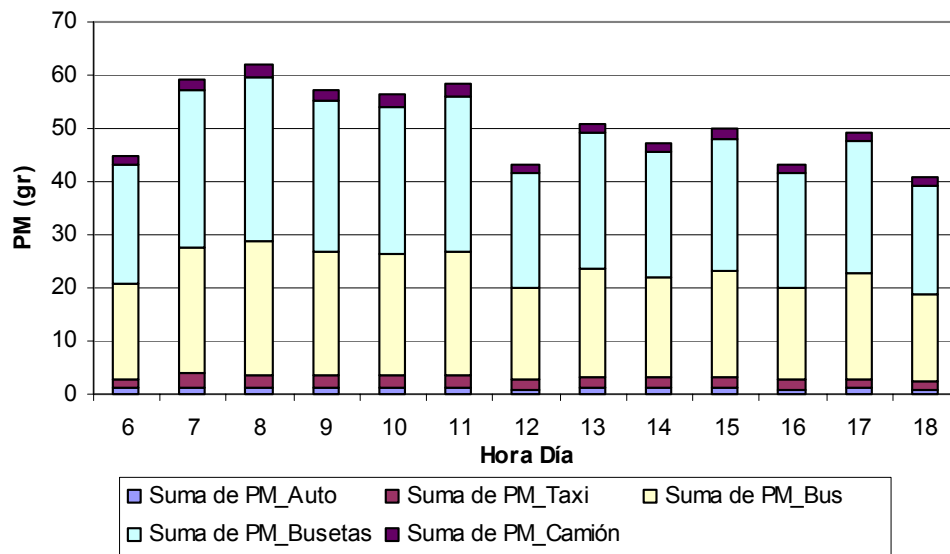
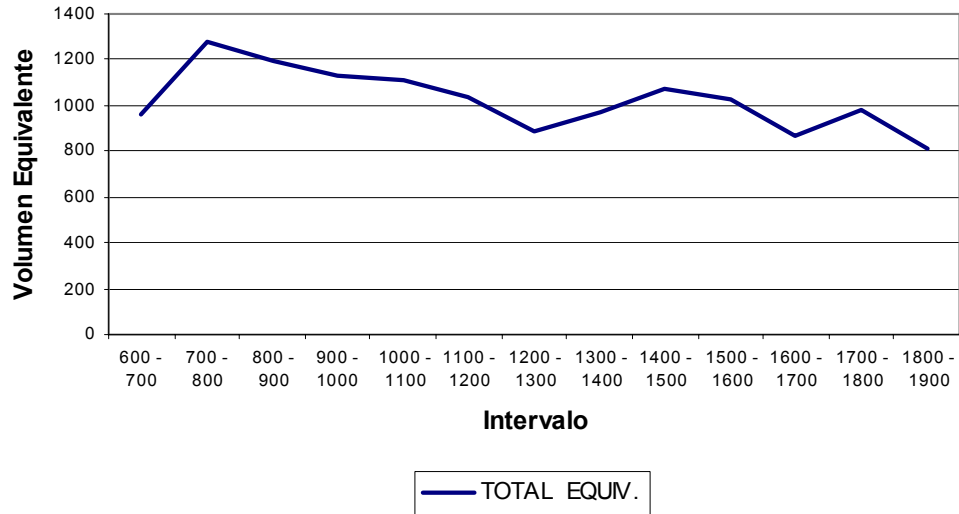


Figura 4-87: Emisiones horarias actuales de PM, por clase vehicular, en la Cra 15 con Avenida Quebrada Seca, Sentido S-N

Fuente: Autores

**Variación del Volumen Horario  
Av. Quebrada Seca Carrera 15 S-N**



*Figura 4-88: Variación del volumen horario, para la Carrera 15 con Calle 56, Sentido S-N  
Fuente: SIEMENS. Abril de 2002.*

**4.3.2 Emisiones de Vehículos en Reposo**

Las emisiones en reposo son indispensable tenerlas en cuenta, ya que en el transcurso del día se presentan eventos en los que los vehículos se encuentran detenidos pero en funcionamiento, como es el caso de las congestiones y los semáforos, para estos las tasas de emisión dejan de depender de la distancia recorrida (gr/km) y se convierten en función del tiempo (gr/min).

Como se expuso anteriormente, las salidas del modelo contienen las tasas de emisión en reposo en gramos por minuto, las cuales se afectan por un factor de 60 con el fin de obtener la tasa de emisión en gr/hora, que son las unidades que se necesitan para modelar la dispersión de estos eventos.

## 5. DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES

### 5.1. METEOROLOGÍA Y DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES<sup>103</sup>

“La meteorología es la ciencia de la atmósfera”, por lo que es indispensable conocer su funcionamiento para la comprensión de todos procesos de dispersión de contaminantes en el aire.

La atmósfera terrestre está compuesta por varias capas con diversas características. La más cercana a la superficie es la troposfera y es en ella en la que ocurren todos los fenómenos de dispersión y transporte de contaminantes que se estudian en este proyecto. En la siguiente Figura 5-1 se puede apreciar la estructura de la atmósfera:

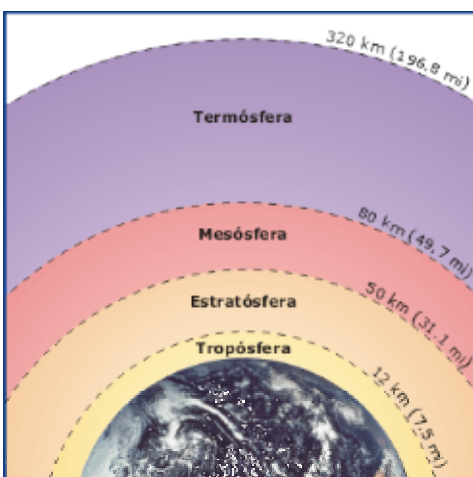


Figura 5-1: Las capas de la atmósfera y su espesor promedio

Fuente: CEPIS/OPS. Conceptos básicos sobre meteorología de la contaminación del aire.

<sup>103</sup> CEPIS/OPS. Conceptos básicos sobre meteorología de la contaminación del aire. [en línea] <http://www.cepis.ops-oms.org>

La dispersión de los contaminantes tiene dos componentes básicos, uno vertical y otro horizontal. La dispersión horizontal está regida principalmente por el régimen de vientos en las zonas más cercanas a la superficie terrestre. La vertical, depende del tipo de estabilidad atmosférica presente. Estos procesos se desarrollan en las capas bajas de la troposfera.

#### 5.1.1. Radiación solar

La energía necesaria para la mayoría de procesos atmosféricos es suministrada por el Sol, siendo transferida a la Tierra por ondas electromagnéticas. Se ha estimado que la energía suministrada por el Sol a la Tierra es igual a  $1.353 \text{ W/m}^2$  (constante solar), aunque gran parte de esta energía es absorbida por partículas de ozono y vapor de agua, y reflejada por las nubes y la propia superficie terrestre. De cada 100 unidades de energía que ingresan en la atmósfera, 51 son absorbidas por la tierra, 19 por la atmósfera y 30 reflejadas nuevamente al espacio.

La cantidad de radiación solar recibida en la Tierra – Atmósfera en un periodo de tiempo determinado se denomina insolación<sup>104</sup> y depende de las características propias de la zona, como lo son la transparencia, la duración de la luz diurna y el ángulo de entrada de los rayos solares. La variabilidad de estas características producen la gran gama de climas entre el trópico y los polos.

Se estima que la cantidad de insolación recibida anualmente en el Ecuador es cuatro veces mayor que la recibida en cualquiera de los polos. Esta diferencia de temperaturas convierte a la Tierra en una especie de motor

---

<sup>104</sup> Proviene del inglés insolation (INcoming SOLar radiATION)

térmico gigante causante de los regímenes de vientos y la mecánica atmosférica en general.

Un fenómeno interesante que ocurre en la superficie de la Tierra es el del calentamiento diferencial, causado por las diferentes tasas de calentamiento y enfriamiento de las superficies terrestres. Por lo general, las superficies secas se calientan y enfrían más rápidamente que las húmedas, por esta razón se producen fenómenos como el de la brisa marina (diferencia de temperatura entre tierra y agua) y el de la isla de calor en las ciudades.

El efecto de la isla de calor es un fenómeno atmosférico producido por el hombre. Algunos materiales como el concreto y el ladrillo son más eficientes absorbiendo el calor que el suelo y la vegetación. En las noches, estas estructuras irradian ese calor y crean un domo de aire caliente sobre la ciudad, que desvía los vientos sobre ésta. (Ver Figura 5-2). Se ha determinado que en Bucaramanga se presenta este fenómeno térmico.<sup>105</sup>

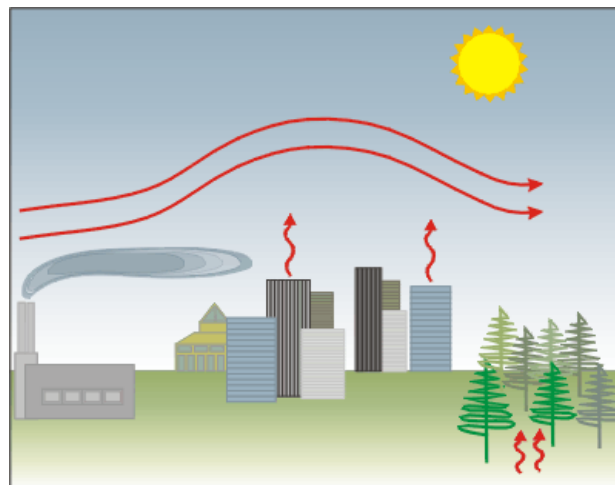


Figura 5-2: Fenómeno de isla de calor.

Fuente: CEPIS/OPS. Conceptos básicos sobre meteorología de la contaminación del aire.

<sup>105</sup>LAZAR, Reinhold y EDER, Josef. Estudio sobre el clima urbano en Bucaramanga. Bucaramanga. 2001

### 5.1.2. Viento

El viento es el elemento básico en la circulación general de la atmósfera. Todos los movimientos del viento, desde ráfagas pequeñas hasta grandes masas de aire, contribuyen al transporte del calor y de otros componentes de la atmósfera alrededor de la Tierra, siendo el elemento básico de la dispersión horizontal.

Existen tres elementos básicos que rigen la dirección y velocidad del viento: la presión, la fuerza de Coriolis y la fricción. Cada una de éstas variables afecta de una forma particular al viento, siendo en ocasiones más importante una de éstas variables que las demás.

La presión atmosférica es causada por el choque de las moléculas del aire entre sí y contra otros objetos. Esta presión es directamente proporcional al peso de la columna de aire y de la temperatura. La mecánica atmosférica señala que el viento siempre se mueve de un sistema de alta presión a uno de baja presión, y estas diferencias son las causantes de los vientos globales.

La fuerza de Coriolis es una fuerza ficticia que parece curvar el viento que se mueve de los polos al ecuador y viceversa. Lo que realmente ocurre es que la rotación de la Tierra mueve el sistema de referencia sobre el que se transporta la masa de aire y causa que un observador ubicado en la superficie del planeta, observe una desviación del viento. En la Figura 5-3 se puede observar la desviación aparente del sistema de vientos.

La fricción tiene influencia sobre el viento hasta alturas entre los 500 y 1000 metros, en lo que se denomina la capa límite planetaria. La influencia de la fricción aumenta a medida que disminuye la altura sobre el suelo, en

proporción directa a la presencia de topografías quebradas o irregulares como los edificios de una zona urbana.

La fricción ejerce gran influencia sobre la dirección y la velocidad del viento, a medida que existen mayores fuerzas friccionales, se empiezan a desprestigiar los efectos de Coriolis y los vientos giran más bruscamente en busca de las zonas de baja presión. Este comportamiento influye significativamente en el transporte de contaminantes en el aire, pues causa la dispersión en direcciones distintas.

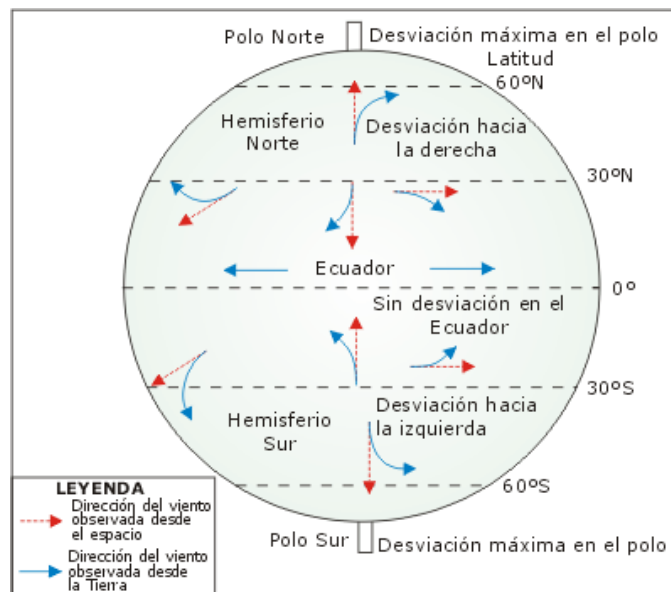


Figura 5-3: La desviación de los vientos de gran escala en los hemisferios norte y sur  
Fuente: CEPIS/OPS. Conceptos básicos sobre meteorología de la contaminación del aire.

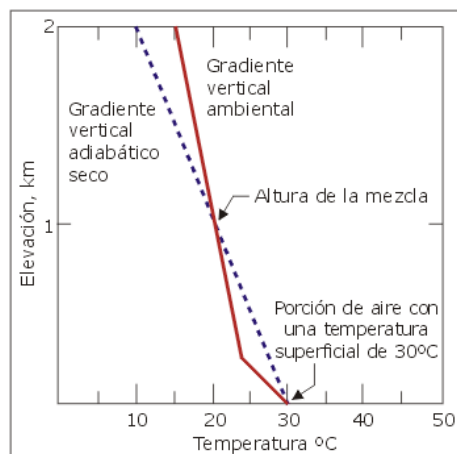
### 5.1.3. Estabilidad atmosférica

El aire no solo se mueve en dirección horizontal, también realiza una circulación vertical, producto de las diferencias de temperatura que se presentan en la atmósfera a diferente altura. En la troposfera existe una

disminución de la temperatura con la altura, lo que se puede explicar por la evolución de la presión vertical y las características de los gases ideales.<sup>106</sup>

Este fenómeno induce el movimiento de porciones de aire caliente desde la superficie de la Tierra. Estas porciones de aire no intercambian calor con el medio circundante y se van enfriando únicamente por efecto en la disminución en la presión. En forma análoga a un globo, el ascenso de estas parcelas de aire solo es posible cuando la temperatura de éstas es menor a la del ambiente.

La rata de disminución de temperatura con la altura para una parcela de aire, recibe el nombre de gradiente vertical de temperatura, el cual es un gradiente adiabático independiente del gradiente de temperatura ambiental. La diferencia entre ambos gradientes determina la altura máxima que puede ascender una partícula, y se denomina altura de mezcla. Este punto se puede observar en la Figura 5-4.



*Figura 5-4: La altura de mezcla es el punto donde la temperatura de la parcela de aire es igual a la temperatura ambiental.*

*Fuente: CEPIS/OPS. Conceptos básicos sobre meteorología de la contaminación del aire*

<sup>106</sup> CLAPPIER Alain. Física de la Atmósfera. En: Modelación de la Calidad del Aire a Escala Urbana (25 – 29 sep. 2003; Bogotá): Memorias. Bogotá: UNIANDES, 2003

El grado de estabilidad atmosférica se determina según la diferencia entre los gradientes verticales de la parcela de aire y el ambiente. En condiciones muy estables, el gradiente ambiental es menor al de la parcela de aire y el movimiento vertical se inhibe. Esta situación ocurre en días muy fríos con poca radiación solar y en las noches.

En cambio, cuando el gradiente de la parcela es menor al del ambiente, el ascenso de esta puede llegar hasta alturas muy superiores. Este fenómeno se denomina inestabilidad atmosférica y suele ocurrir en días soleados con vientos de baja velocidad.

Las condiciones inestables de la atmósfera mejoran notablemente la dispersión de los contaminantes, mientras que las condiciones estables producen un efecto de tapón para los contaminantes, que los mantiene cerca de sus fuentes de emisión.

Un fenómeno atmosférico interesante con respecto a la estabilidad atmosférica es el de las inversiones térmicas. En estas situaciones, la temperatura del aire aumenta con la altura, impidiendo la circulación vertical del aire. Es causado usualmente por un rápido enfriamiento del suelo y se suele presentar en las últimas horas de la tarde hasta la mañana siguiente. Otras causas de la inversión térmica son la presencia de anticiclones y el choque de frentes fríos.

Cuando un fenómeno de inversión atmosférica se mantiene durante varios días se pueden presentar emergencias sanitarias, si las autoridades no toman medidas inmediatas que detengan la tasa de emisiones de automóviles e industrias. Los casos más graves de contaminación del aire a nivel mundial se han producido durante periodos prolongados de inversión.

## 5.2. MODELO DE DISPERSIÓN GAUSSIANO CAL3QHC<sup>107</sup>

El CAL3QHC es un modelo desarrollado para computador, que predice la concentración de monóxido de carbono y otros contaminantes inertes por causa de vehículos automotores en intersecciones viales. El modelo incluye el modelo de dispersión lineal CALINE-3 y un algoritmo de tráfico para estimar la longitud de la cola vehicular en las intersecciones semaforizadas.

El modelo CALINE-3 fue diseñado para predecir concentraciones de contaminantes cerca a autopistas y vías arterias, para vehículos automotores operando bajo condiciones de flujo libre. El CAL3QHC amplía el alcance del CALINE-3 incorporando métodos que estimen las emisiones de los vehículos en reposo. Este modelo permite la estimación de la concentración total de contaminantes tanto de vehículos en movimiento como en reposo.

### 5.2.1. Cálculo de la longitud de cola<sup>108</sup>

El CAL3QHC requiere de los siguientes parámetros para el cálculo de la longitud de cola: volumen de tráfico, ciclo del semáforo, duración de la fase roja, el tiempo no usado en amarillo, la rata de flujo de saturación, el tipo de señal de tráfico y la rata de arribos a la intersección.

Primero, el programa calcula la longitud de la fase verde descontando los tiempos “muertos” y de fase roja, utilizando la ecuación 5.1.

---

<sup>107</sup> OTAQ. User's Guide to CAL3QHC Version 2.0. [en línea]. USA: EPA. 1995. <http://www.epa.gov>

<sup>108</sup> TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Highway Capacity Manual. Washington (USA): Library of Congress, 1985.

$$GAVG = CAVG - RAVG - K1 - YFAC \quad (5.1)$$

Donde:

*GAVG: Duración de la fase verde (s)*

*CAVG: Duración total del ciclo (s)*

*RAVG: Duración de la fase roja (s)*

*K1: Demora por aceleración y arranque del vehículo (2 segundos. No variable)*

*YFAC: Tiempo perdido por despeje en amarillo (s)*

Con éste valor, se calcula la capacidad de la vía señalizada usando la rata de flujo de saturación por carril (ecuación 5.2):

$$C = SFR * (GAVG / CAVG) \quad (5.2)$$

Donde:

*C: Capacidad horaria por carril (veh/h/carril)*

*SFR: Rata de flujo de saturación (veh/hora en verde/carril)*

*(GAVG/CAVG): Proporción de la fase verde en el ciclo total (s verde / s)*

Los vehículos que arriban en la fase roja empiezan a acumularse en fila. Cuando la señal cambia a verde, los vehículos comienzan a moverse uno tras otro y se produce una “onda de choque” hasta el último vehículo. Los vehículos que arriban antes de la disipación de la cola deben detenerse y unirse al final.

El proceso de arribo de vehículos a la intersección puede ser ilustrado en la Figura 5-5, donde se expone la situación especial en la que la rata uniforme de arribos vehiculares es menor que la rata de despeje, y el punto de corte

de ambas gráficas es exactamente el final del ciclo, lo que sería una situación ideal, cercana a las condiciones de saturación.

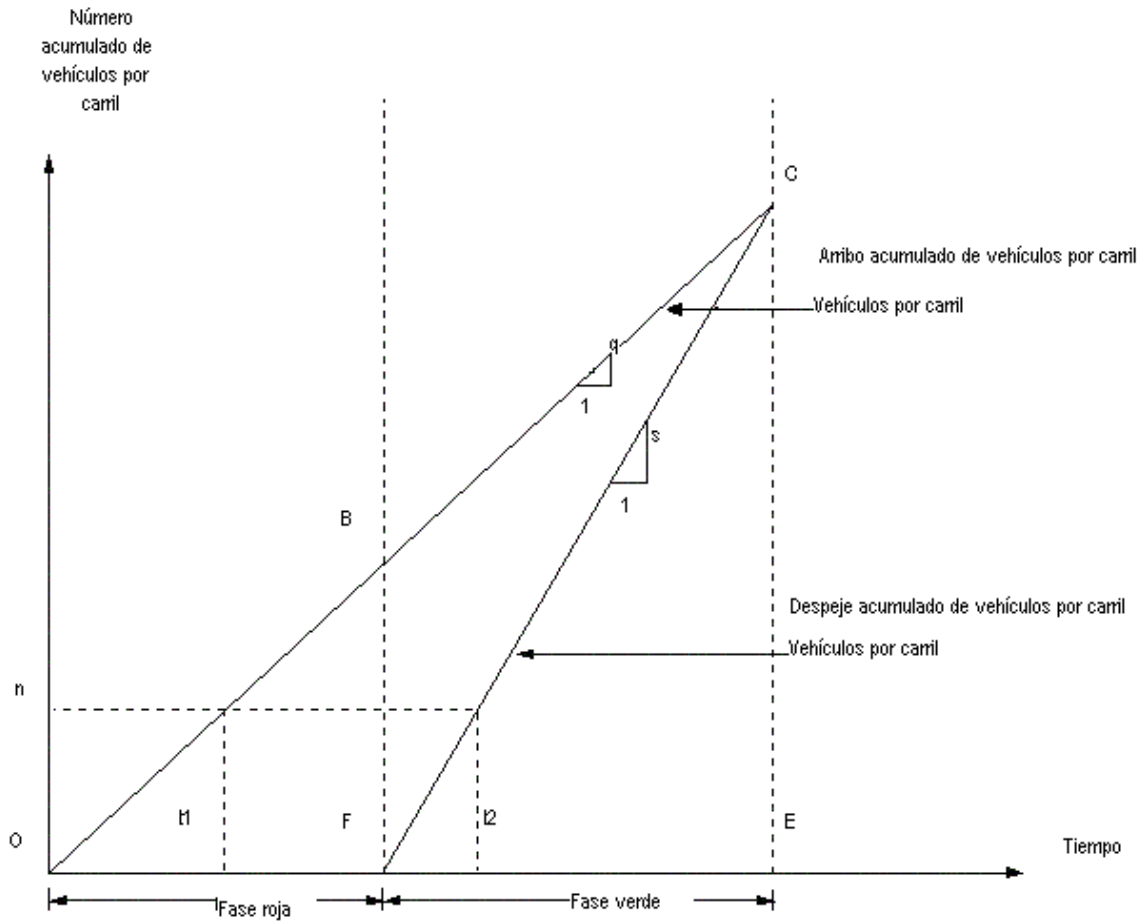


Figura 5-5: Relación de colas y demoras para una intersección señalizada en condiciones cercanas a la saturación.

Fuente: US EPA. User's Guide to CAL3QHC Version 2.0. 1995

En la Figura 5-5 se puede apreciar que la diferencia vertical entre las gráficas es igual al número de vehículos en la cola para un instante  $t$ , mientras que la diferencia horizontal representa la demora que experimenta el  $n$ -ésimo vehículo que llega a la intersección. La demora total por ciclo es igual al área del triángulo OCF.

Si se asume que la fase roja y verde son de igual duración, se puede calcular la demora total por carril  $W$  con la aproximación de la ecuación 5.3:

$$W = FB * OE * \frac{1}{2} = FB * OF \quad (5.3)$$

Dónde según la gráfica:

$W$ : Demora total por carril durante el ciclo (veh \* s / carril)

$FB$ : Número promedio de vehículos encolados por carril en el inicio de la fase verde (veh / carril)

$OE$ : Duración del ciclo (s)

$OF$ : Duración de la fase roja (s)

#### 5.2.1.1. Condiciones no saturadas

Para el cálculo de la cola vehicular bajo condiciones no saturadas ( $Nu$ ), el modelo utiliza el mayor valor obtenido con la ecuación 5.4. Cada una de las partes de la ecuación representa condiciones de tráfico distintas que pueden presentarse en la vía.

$$N_u = FB = (q * D) + (r/2 * q) \quad \text{ó} \quad N_u = FB = q * r \quad (5.4)$$

Donde:

$N_u$ : Es el mayor valor obtenido por cualquiera de las dos ecuaciones. Es igual a la cola por carril al principio de la fase verde bajo condiciones no saturadas (veh/carril)

$q$ : Rata de arribo de vehículos por carril (veh/carril/s)

$D$ : Demora promedio de vehículos acercándose (s/veh)

$r$ : Duración de la fase roja (s)

Para calcular la demora promedio  $D$ , se usa la fórmula expuesta por el Highway Capacity Manual (HCM) de 1985 en el capítulo 9 (ecuación 5.5):

$$D = d * PF * F_c \quad (5.5)$$

Dónde:

$d$  = Demora promedio por vehículo detenido (s/veh)

$PF$  = Factor de ajuste de progresión

$F_c$  = Factor de conversión para la demora de vehículos detenidos a la demora de vehículos acercándose (1.3)<sup>109</sup>

La demora promedio por vehículo ( $d$ ) se calcula para condiciones de arribo aleatorias con la ecuación 5.6, obtenida del HCM:

---

<sup>109</sup> Constante que usa el modelo y que fue obtenida a partir del HCM

$$d = (0.38)(CAVG) \frac{\left[1 - \frac{GAVG}{CAVG}\right]^2}{\left[1 - \left(\frac{GAVG}{CAVG}\right)X\right]} + 173 X^2 \left[ (X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \frac{16X}{C}} \right]$$

(5.6)

Dónde:

*GAVG* = Duración de la fase verde [s]

*CAVG* = Duración del ciclo [s]

*C* = Capacidad horaria por carril [veh/hr/carril]

*X* = Relación volumen por capacidad (V/C)

*V* = Volumen de aproximación horario por carril [veh/hr/lane]

El factor de ajuste por progresión (PF) modifica la demora por vehículo *d*, según las condiciones reales de arribo y el tipo de señal que se tenga en la intersección. Los cálculos de estos factores de progresión se encuentran en el Capítulo 9 y 11 del HCM.

#### 5.2.1.2. Condiciones sobre-saturadas

Se dice que existen condiciones sobre-saturadas en una intersección semaforizada cuando el volumen de arribos supera la capacidad de ésta (relación V/C mayor a 1.0). Para estas situaciones, se considera la cola vehicular dividida en dos componentes, una cuando se encuentra en situación de sobre-saturación y otra cuando está en el punto de saturación (V/C = 1), denominadas  $N_1$  y  $N_2$  respectivamente. En la Figura 5-6 se pueden observar estos valores:

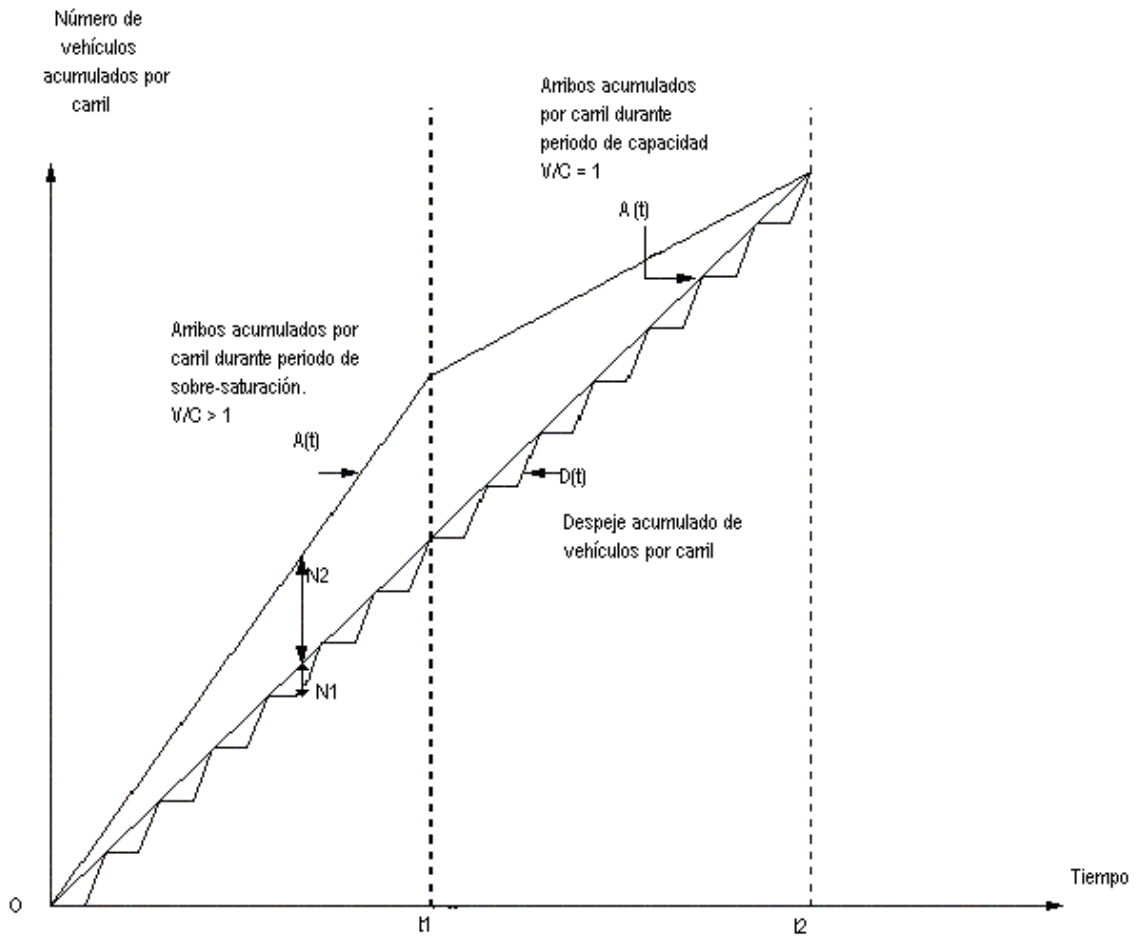


Figura 5-6: Relación de colas y demoras para una intersección sobresaturada.

Fuente: US EPA. User's Guide to CAL3QHC Version 2.0. 1995

Para el valor  $N_1$  se utiliza la ecuación 5.7, la cual es análoga a la ecuación 5.4 para un flujo en condiciones no saturadas:

$$N_1 = \text{Max}[(q' \times D') + (r/2 \times q'); r \times q'] \quad (5.7)$$

Dónde:

$q'$ : Tasa de arribo de vehículos bajo condiciones de saturación ( $V/C = 1$ )

$D'$ : Demora promedio de vehículos para condiciones de saturación ( $V/C = 1$ )

El valor  $N_2$  representa la acola adicional que se presenta por las condiciones de sobresaturación. Para el tiempo  $t_1$  se obtiene la ecuación 5.8:

$$N_2 = \frac{1}{2} \times (V - C) \quad (5.8)$$

Dónde:

$V$  = Volumen horario de vehículos acercándose por carril (veh/carril/h)

$C$  = Capacidad horaria por carril (veh/carril/h)

Luego, se calcula la longitud de la cola promedio al principio de la fase verde bajo condiciones saturadas ( $N_0$ ) con la ecuación 5.9:

$$N_0 = N_1 + N_2 \quad (5.9)$$

Por último, es importante notar que para calcular la longitud de la cola en metros, se hace necesario multiplicar el número de vehículos obtenidos (ya sea para condiciones no saturadas o sobresaturadas) por la distancia media entre vehículos. Este valor es constante para el modelo e igual a 6 metros, incluyendo la longitud del vehículo.

### 5.2.2. Dispersión de los contaminantes<sup>110 111</sup>

La dispersión de los contaminantes en el CAL3QHC se realiza por el módulo CALINE3, el cual es el encargado de distribuir en la zona de estudio los contaminantes emitidos en cada una de las líneas de flujo o links establecidos.

---

<sup>110</sup> OFFICE OF TRANSPORTATION LABORATORY. CALINE3 - A Versatile Dispersion Model for Predicting Air Pollutant Levels Near Highways and Arterial Streets. [en línea]. USA: EPA, 1979. <http://www.epa.gov>

<sup>111</sup>CALTRANS Y UC DAVIS. User's Guide for CL4. [en línea] USA: CALTRANS y UC DAVIS, 1998. <http://aqp.engr.ucdavis.edu>

### 5.2.2.1. Formulación Gaussiana de los elementos

La dispersión de los contaminantes se realiza utilizando la formulación Gaussiana para fuentes lineales finitas (FLS) luego de que se dividan las líneas de flujo o links en elementos lineales de menor longitud.

Cada link, es dividido en elementos rectangulares de ancho fijo y longitud variable para un receptor determinado. A medida que la distancia entre el receptor y el punto medio del link aumenta, también lo hace la longitud de cada elemento. La longitud de un elemento se define con la ecuación 5.10.

$$EL = W \times BASE^{NE-1} \quad (5.10)$$

Dónde:

*EL = Longitud del elemento*

*W = Ancho del link*

*BASE = Factor de crecimiento que depende de la dirección del viento*

*NE = Número del elemento.*

Para cada uno de éstos elementos, se calcula una línea equivalente que funcionará como una “fuente lineal finita”. Cada una de estas líneas es perpendicular a la dirección del viento y su centro coincide con el centro del elemento al que pertenece. A su vez, cada una de estas líneas se divide en cinco zonas, lo cual le da más precisión al modelo.

La distribución de los elementos en un link se puede apreciar en la Figura 5.7.

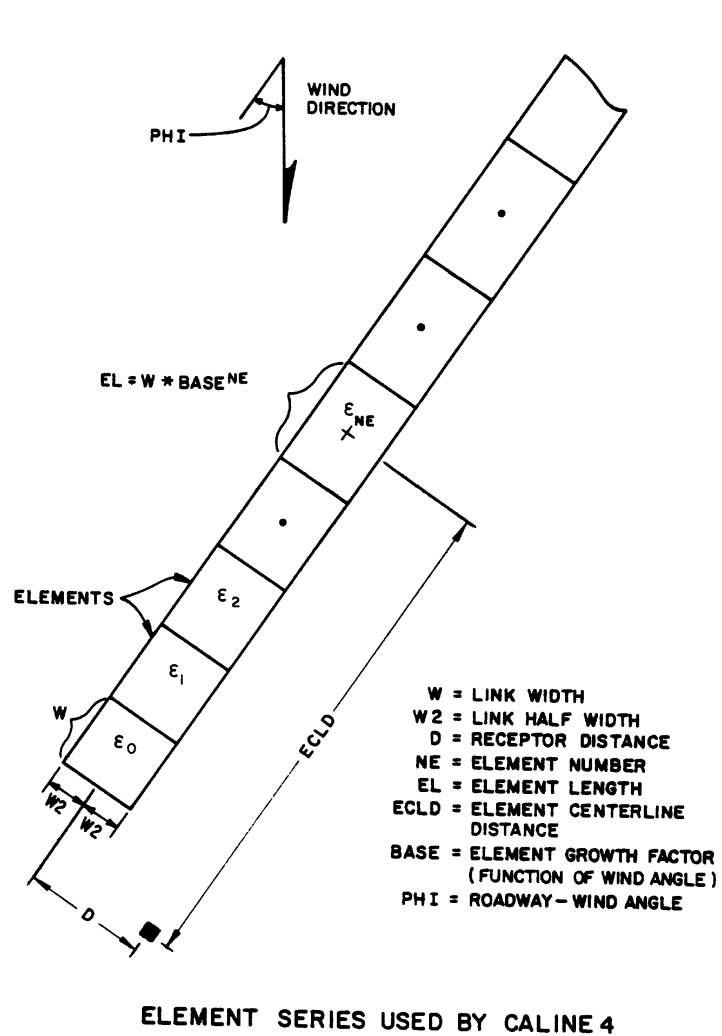


FIGURE 1

9

Figura 5-7: Series de elementos que utiliza el modelo CALINE  
 Fuente: US EPA. CALINE 4 User's Guide. 1989.

La distribución de los contaminantes vientos abajo se realiza entonces, según la distribución de Gauss para el elemento infinitesimal FLS como se puede observar en la Figura 5-8.

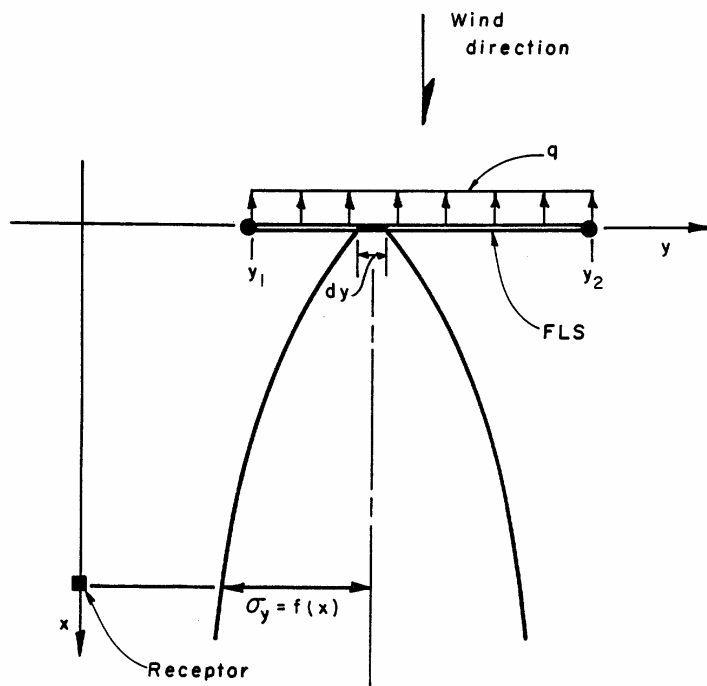


Figura 5-8: Distribución Gaussiana de una FLS (Finite Lineal Source)  
 Fuente: US EPA. CALINE 4 User's Guide. 1989.

La distribución se calcula a partir de la ecuación diferencial 5.11:

$$dC = \frac{qdy}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} * \left[ \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \right] \left\{ \exp\left(\frac{-(Z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(\frac{-(Z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right\} \quad (5.11)$$

Donde:

$dC$  : Diferencial de concentración

$q$  : Carga de la fuente lineal

$u$  : Velocidad del viento

$H$  : Altura de la fuente

$\sigma_y$  y  $\sigma_z$  : Parámetros de dispersión horizontal y vertical.

La solución de ésta ecuación se encuentra en la ecuación 5.12.

$$C = \frac{q}{\sqrt{2\pi u \sigma_z}} * \left\{ \exp\left(\frac{-(Z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(\frac{-(Z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right\} * PD \quad (5.12)$$

$$PD = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int \exp\left(\frac{-P^2}{2}\right) dP \quad \text{Función de densidad de probabilidad normal}^{112}$$

Luego de tener el valor de concentración de contaminantes vientos abajo para cada FLS, el modelo distribuye para cada receptor parte de la carga calculada realizando diversas iteraciones.

#### 5.2.2.2. Modelo de zona de mezcla

El CALINE3 considera la zona inmediatamente superior a la vía, como una zona de emisión y turbulencia constante. Esta se denomina la zona de mezcla, que tiene un ancho igual al de la vía más tres metros a cada lado, por efecto de la turbulencia mecánica que causa el movimiento de los autos y el calor emitido por los motores.<sup>113</sup> Se ha podido demostrar que este ancho de mezcla no varía significativamente para velocidades menores de circulación, pues la menor turbulencia se compensa con el mayor calor emitido.

Para poder ajustar el modelo gaussiano a las condiciones de turbulencia y calor inicial, el modelo calcula un parámetro inicial de dispersión vertical (SGZI) como función del tiempo en que el contaminante se mantiene en la zona de mezcla. Entre mayor sea el tiempo que una parcela de aire se

<sup>112</sup> Se hizo la transformación de  $P = y / dy$

<sup>113</sup> Solo si el flujo es constante. Para links con cola vehicular el ancho de mezcla es igual al de la vía

mantenga en la zona de mezcla, mayor será su dispersión vertical pues estará más caliente.

El tiempo de retención de la parcela de aire en la zona de mezcla es inversamente proporcional a la velocidad del viento y se define por la ecuación 5.13

$$TR = \frac{W_2}{u} \quad (5.13)$$

Dónde:

*TR*: Tiempo de retención del contaminante en la zona de mezcla (s)

*W<sub>2</sub>*: Mitad del ancho de la vía más tres metros (media zona de mezcla) (m)

*u*: Velocidad del viento (m/s)

Este tiempo de retención es independiente de la dirección del viento y de la longitud del elemento. Esencialmente lo que permite es poder hacer compatible el modelo FLS con las características bidimensionales de la vía.

Para relacionar la dispersión inicial con el tiempo de retención, el programa utiliza la ecuación empírica 5.14 obtenida de estudios de la General Motors:

$$SGZI = 1.8 + 0.11 * TR \quad (5.14)$$

Como se puede observa este valor inicial de dispersión no depende de la estabilidad atmosférica ni de la rugosidad superficial.

### 5.2.2.3. Dispersión vertical ( $\sigma_z$ )

La dispersión vertical de los contaminantes se calcula utilizando el sistema de curvas de Pasquill a partir de los datos de dispersión inicial (SGZI) hasta una altura máxima de 10 kilómetros. A partir de esta altura las curvas se vuelven demasiado imprecisas.

Para poder ajustar las curvas de Pasquill, se hace necesario calcular el valor de la dispersión a los 10 kilómetros de altura para las condiciones de rugosidad superficial y tiempo de modelación. Esto se hace con la ecuación 5.15:

$$SZ10_{ATIM,Z_0} = SZ10 * \left(\frac{ATIM}{3}\right)^{0.2} * \left(\frac{Z_0}{10}\right)^{0.07} \quad (5.15)$$

Donde:

$SZ10_{ATIM,Z_0}$  : *Dispersión a los 10 kilómetros para las condiciones reales de rugosidad y tiempo de modelación*

$SZ10$ : *Dispersión pre-establecida por Pasquill a una altura de 10 Km.*

$ATIM$ : *Tiempo promedio de modelación (min)*

$Z_0$ : *Rugosidad superficial (cm)*

Con estos valores ajustados y utilizando las curvas de Pasquill, se determina el parámetro de dispersión vertical ( $\sigma_z$ ) que será usado en la distribución de Gauss.

#### 5.2.2.4. Dispersión horizontal ( $\sigma_y$ )

Para calcular el parámetro gaussiano de dispersión horizontal ( $\sigma_y$ ) se utiliza el método de Draxler expresado en la ecuación 5.16:

$$\sigma_y = \sigma_\theta x f_1 \left( \frac{T}{t_l} \right) \quad (5.16)$$

Donde:

$\sigma_\theta$  : *Angulo horizontal del viento*

$x$  : *Distancia vientos abajo*

$f_1$  : *Función universal del tiempo de difusión*

$t_l$  : *Escala de tiempo Lagrangiano*

$T$  : *Tiempo de difusión*

Y se tiene que:

$$f_1 = \frac{1}{1 + 0.9 \left( \frac{TT}{TI} \right)^{0.5}} \quad (5.17)$$

Dónde:

TT y TI: Valores de tiempo establecidos para fuentes de emisión al nivel del suelo, que pueden variar según la velocidad y dirección del viento. Por lo tanto pueden ser establecidos a partir de las condiciones atmosféricas que se necesitan en el cálculo de la dispersión vertical.

### 5.3. DATOS DE ENTRADA AL CAL3QHC

#### 5.3.1. Variables meteorológicas

##### 5.3.1.1. Velocidad de asentamiento y deposición

La velocidad de asentamiento es definida como: “la rata por la cual una partícula cae con respecto a su medio circundante”, mientras que la velocidad de deposición es la “la tasa a la cual un contaminante es absorbido o asimilado por una superficie”.

Usualmente para un mismo tipo de contaminante se establece una misma velocidad de asentamiento y deposición. Esta variable es importante solamente para el material particulado, pues se ha comprobado que la tasa de deposición para CO es despreciable.<sup>114</sup>

Las partículas en suspensión de menos de 10 micras (PM<sub>10</sub>) se caracterizan por ser lo suficientemente livianas como para ser transportadas por el aire grandes distancias, pero a diferencia de los gases contaminantes, estas partículas son afectadas por la fuerza gravitatoria en suficiente medida como para vencer la resistencia del aire y depositarse en el suelo<sup>115</sup>.

La velocidad de deposición de estas partículas está regida por la Ley de Stokes-Cunningham y es función de su diámetro promedio. El diámetro promedio de las partículas se determina con base a conteos locales de

---

<sup>114</sup> CALTRANS Y UC DAVIS. User's Guide for CL4. [en línea] USA: CALTRANS y UC DAVIS, 1998. <http://aqp.engr.ucdavis.edu>. p. 38

<sup>115</sup> WARK, Kenneth y WARNER, Cecil. Contaminación del aire origen y control. México: Limusa, 2002. p.219-224

partículas que caractericen el material particulado en suspensión. Ante la ausencia de valores locales sobre diámetros promedios se tomaron los valores de una muestra atmosférica típica, expresados en la Tabla 5-1:

Rango de tamaños ( $\mu\text{m}$ )	Tamaño promedio ( $\mu\text{m}$ )	Conteo de partículas	Por ciento en volumen
10 – 30	20	1	27
5 – 10	7.5	112	53
3 – 5	4	167	12
1 – 3	2	555	5
0.5 – 1	0.75	4215	2
0 – 0.5	0.25	56900	1

*Tabla 5-1: Distribución de las partículas por conteo y por ciento en volumen en una muestra atmosférica típica, como una función del tamaño.*

*Fuente: WARK – WARNER. Contaminación del aire. Origen y Control. 2002. Pág. 198*

Como el mayor porcentaje en volumen de partículas se encuentra en el rango de 5 a 10 micras, se tomará el valor promedio de 7.5  $\mu\text{m}$  como el diámetro promedio de las partículas. Con éste diámetro se obtiene una velocidad de deposición aproximada utilizando la Figura 5-9.

La velocidad calculada es de 0.15 cm/s para el diámetro de 7.5  $\mu\text{m}$

VELOCIDAD TERMINAL O DE ASENTAMIENTO

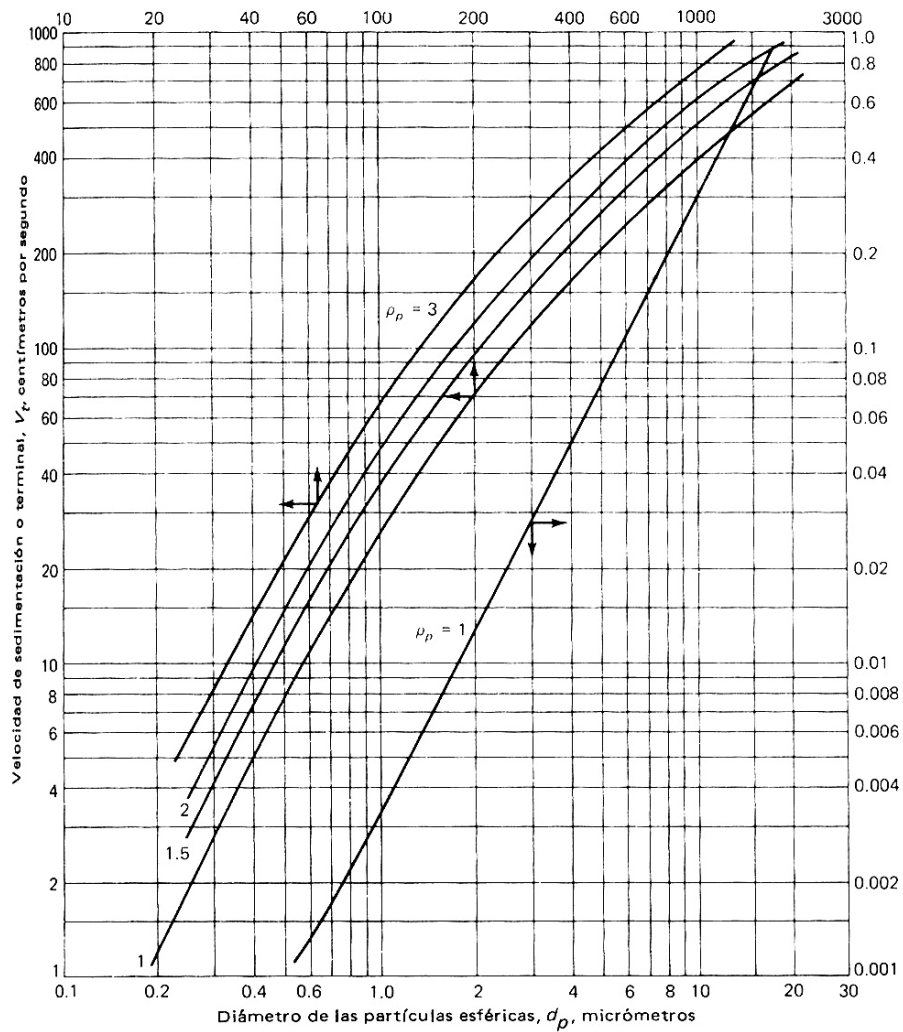


Figura 5-9: Diagrama de cálculo de la velocidad de asentamiento en función del diámetro.

Fuente: WARK – WARNER. Contaminación del aire. Origen y Control. 2002

5.3.1.2. Velocidad y dirección del viento

Los datos de velocidad promedio horaria y dirección del viento, se obtuvieron promediando los datos medidos por la estación meteorológica Centro de la

CDMB (ubicada aproximadamente a 20 metros de altura), para los meses de Abril, Mayo y Junio de 2003, para cada hora del día en el intervalo de 6AM a 7PM.

Para cada hora del día se obtuvo una velocidad del viento horaria promedio y una dirección del viento. Como la estación no registra las variaciones del viento durante la hora, se debe asumir un rango de variación de vientos que permita calcular un máximo de concentración para un régimen de vientos determinado.

Es importante anotar que durante esos meses la Estación de Monitoreo Centro de la CDMB estuvo ubicada a una altura aproximada de 2 metros sobre el nivel de la vía, mientras que la estación meteorológica se encuentra a una altura mayor. Con el fin de poder comparar los valores de concentración medidos por la estación con los arrojados por el modelo se debe ajustar la velocidad del viento a una altura menor.

La fórmula que se utiliza para esta transformación es la ecuación 5.18.<sup>116</sup>

$$V = V_{ref} * \frac{\ln(Z/Z_s)}{\ln(Z_{ref}/Z_s)} \quad (5.18)$$

Dónde:

*V*: Velocidad del viento en el punto deseado (m/s)

*V<sub>ref</sub>*: Velocidad del viento a la altura de referencia (m/s)

*Z*: Altura del viento en el punto deseado (m)

*Z<sub>ref</sub>*: Altura de referencia (m)

*Z<sub>s</sub>*: Rugosidad superficial (m) [Para un *Z<sub>o</sub>* = 300cm, *Z<sub>s</sub>* = 0.3]

---

<sup>116</sup> ASOCIACIÓN DANESA DE LA INDUSTRIA EÓLICA. Emplazamiento [en línea] 2004. <http://www.windpower.org/es/core.htm>

Para las condiciones locales:

$$Z = 2\text{m}$$

$$Z_{\text{ref}} = 24\text{m (aproximado)}$$

$$Z_s = 0.3$$

Entonces se tiene que la ecuación de transformación del viento se simplifica en la ecuación 5.19 para las condiciones dadas.

$$V = V_{\text{medida}} * 0.43 \quad (5.19)$$

La dirección del viento también varía con la altura, en forma proporcional a la cantidad de obstáculos que se encuentren, lo que se representa con el coeficiente de rugosidad. Debido a la cantidad de variables específicas que determinan la dirección del viento a baja altura, no es posible calcular la dirección de esta dirección en forma teórica, a partir de un dato medido a mayor altura.

Para el modelo se introducirán inicialmente las variaciones del viento medidas por la estación, pero este valor se calibrará luego para hacerlo coherente con las concentraciones que está midiendo la Estación Centro.

#### 5.3.1.3. Estabilidad atmosférica

Esta variable se determina clasificando las condiciones de turbulencia según las categorías de Pasquill, que van desde las condiciones de mayor turbulencia (A) a las de mayor calma (F y G)

La estabilidad atmosférica depende esencialmente de dos variables básicas, la velocidad del viento y la radiación solar incidente en la superficie terrestre.

Estas dos variables son medidas por la estación metereológica para cada hora del día, y con ellas se calculó para cada día la estabilidad, procesando el nomograma de la Figura 5-10 en una hoja de cálculo.

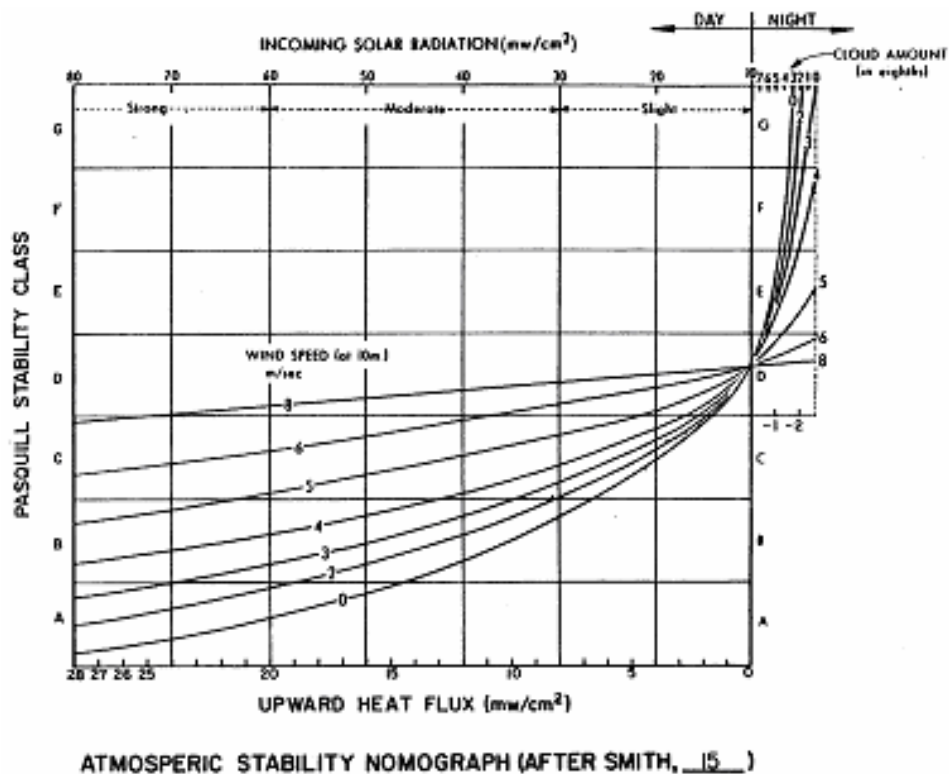


Figura 5-10: Nomograma de Pasquill  
Fuente: US EPA. Caline4 User's Guide

A partir de los valores horarios obtenidos durante los meses de Abril, Mayo y Junio, se determinó la estabilidad atmosférica promedio para cada una de las horas de estudio. La estabilidad que más veces se presentó para la hora determinada se seleccionó como condición promedio, comprobando que esta fuera consistente con los valores de velocidad y radiación solar promedios.

Los valores promedios de estabilidad atmosférica, velocidad y dirección del viento obtenidos de los datos de la estación meteorológica se resumen en la Tabla 5-2.

Hora	Velocidad* m/s	Dirección* Azimuth	Atmosfera TIPO
6	0.8	125	D
7	1.0	125	D
8	1.3	135	D
9	1.5	135	C
10	1.8	140	B
11	2.2	160	B
12	2.9	180	B
13	3.1	190	C
14	3.3	195	C
15	3.4	195	C
16	3.5	200	D
17	3.0	200	D
18	2.5	200	D

\*Valores medidos por la estación sin modificación por altura

*Tabla 5-2: Condiciones atmosféricas promedios horarias para los meses de Abril a Junio utilizadas en el modelo.*

*Fuente: CDMB / Autores*

#### 5.3.1.4. Altura de Mezcla

Es la altura máxima que alcanza la capa de mezcla sobre la superficie del terreno y que determina el punto en que se invierte la temperatura. A esta altura los contaminantes transportados por las corrientes de aire caliente dejan de ascender y se forma una especie de tapón a la mezcla vertical.

La determinación de la altura de mezcla se realiza por medios directos o remotos. La forma más usual de medición directa es el uso de un globo cautivo dotado de un equipo de medición de altura y temperatura. Por efecto del tapón de temperatura a la altura de mezcla, el globo deja de ascender e indica la altura en que lo hizo. Este método tiene el inconveniente de ser costoso y puede representar un peligro para el tráfico aéreo en algunas ciudades.

Otro método más económico y menos intrusivo, es el uso de sensores remotos que emitan señales de baja frecuencia para que choquen con la altura de mezcla y regresen a su punto de origen. Por medio de cálculos matemáticos es posible obtener luego la altura de mezcla.

Actualmente, la ciudad no cuenta con ninguno de éstos equipos de medición de altura de mezcla. Se han realizado investigaciones con globo cautivo en el estudio de las inversiones térmicas y efectos de isla de calor en la ciudad en horas de la noche, pero este valor no es representativo de las horas diurnas.<sup>117</sup>

Existe una formulación teórica (Ecuación 5.20) para la obtención de la altura de mezcla propuesta por Benkley y Schulman<sup>118</sup> que puede ser usada:

$$MIXH = \frac{(0.185 * u * k)}{\ln(Z / Z_z) * f} \quad (5.20)$$

Dónde:

MIXH = Altura de la capa de mezcla (m)

u = Velocidad del viento (m/s)

Z = Altura a la que fue medido el viento (m)

Z<sub>o</sub> = Rugosidad superficial (m)

k = Constante de Von Karman (0.35)

f = Parámetro de Coriolis =  $(1.45 * 10^{-4}) * \cos \theta$

$\theta$  = 90° - Latitud

---

<sup>117</sup> LAZAR Reinhold. Op. cit.

<sup>118</sup> OFFICE OF TRANSPORTATION LABORATORY. CALINE3 - A Versatile Dispersion Model for Predicting Air Pollutant Levels Near Highways and Arterial Streets. [en línea]. USA: EPA, 1979. <http://www.epa.gov>

Para la zona de estudio se tienen velocidades de viento que varían entre los 1 m/s y los 3 m/s aproximadamente, medidos por la estación meteorológica. La rugosidad superficial de la zona fue establecida en 3 metros (ver más adelante) y la latitud de la ciudad es de 7°.

Para estos valores se calculó la altura de mezcla mínima y máxima aproximada:

Para $u = 1$ m/s	MIXH = 1930 m
Para $u = 3$ m/s	MIXH = 5795 m

La EPA recomienda tener recelo con los valores calculados usando esta ecuación y se debe preferir el uso de mediciones directas siempre que sea posible.

De todos modos, estudios de sensibilidad para el CAL3QHC demuestran que el modelo es afectado únicamente por valores muy bajos de altura de mezcla (menores a 100m), por lo que se recomienda en la mayoría de casos usar el valor por defecto del modelo (1000m) a menos que se modelen situaciones especiales en horas nocturnas<sup>119</sup>

#### 5.3.1.5. Concentración de fondo (Background)

Esta se define como la concentración pre-existente en el ambiente para un contaminante dado. Esta concentración puede provenir de fuentes naturales o artificiales que no son consideradas por el modelo. Para considerar este valor, se analizaron las mediciones de la Estación Centro en horas de la madrugada, en las que el flujo vehicular es inexistente.

---

<sup>119</sup> Ibid.

Se determinó usar un valor de 1.0 ppm como valor aproximado a la concentración de fondo para el CO y de  $45 \mu\text{gr}/\text{m}^3$  para el  $\text{PM}_{10}$ . Para obtener un valor más preciso, se debe considerar la dirección del viento cada hora y comparar en horas diurnas el incremento de la pluma de contaminantes transportados, a partir de otras estaciones de medición.

### 5.3.2. Variables espaciales

#### 5.3.2.1. Coeficiente de rugosidad superficial

Es una medida de la cantidad de obstáculos promedio en el terreno a modelar. Representa la altura sobre el suelo en la que la velocidad promedio del viento es igual a cero. Los valores que comprende están entre los 0.03 y 400 cm, desde terrenos completamente planos hasta zonas urbanas de gran densidad con edificaciones a considerable altura.

La EPA ha elaborado una tabla en la que se indican diferentes valores de rugosidad superficial según el uso del suelo en la zona de modelación. Estos factores han sido obtenidos por estudios en túneles de viento y validados en los Estados Unidos. En la Tabla 5-3 aparecen diferentes valores de rugosidad superficial para diversos usos del suelo en los Estados Unidos.

Uso del suelo	Coefficiente de rugosidad $Z_o$ (cm)
RURAL	
Desierto liso	0.03
Pastos (4 cm)	0.14
Pastos (5 a 6 cm)	0.75
Alfalfa (15 cm)	2.72
Pastos (60 a 70 cm)	11.40
Trigo (60 cm)	22.00
Maíz (220 cm)	74.00
Huertos de cítricos	198.00
Bosque coníferas	283.00
URBANO	
Residenciales un solo piso	108.00
Residenciales edificios	370.00
Oficinas	175.00
Zona céntrica comercial	321.00
Parque	127.00

*Tabla 5-3: Coeficientes de rugosidad superficial para diferentes usos del suelo*

*Fuente: US EPA. User's Guide to CAL3QHC Version 2.0. 1995*

La zona a modelar esta compuesta por edificios de diferente altura, aunque predominan las edificaciones de uno a cuatro pisos y es de carácter netamente comercial, por lo que se tomó un valor de 300 cm que es un poco menor al valor para zonas céntricas de los Estados Unidos. De todos modos el modelo es poco sensible a variaciones de rugosidad superficial menores a 100cm.

### 5.3.2.2. Características de las vías de flujo (Links).

Las vías de flujo o links son la base del modelo de dispersión, pues en ellas se generarán las emisiones que serán simuladas. Estas vías deben ser ubicadas espacialmente y caracterizadas según su tipo de flujo.

Se debe determinar un link distinto cada vez que exista un cambio de dirección en la vía, se modifiquen las condiciones geométricas o cambie el volumen vehicular. Además se deben especificar links diferentes para las intersecciones en que existan emisiones por vehículos detenidos por semáforos.

Para el estudio, se modeló la Carrera 15 desde el Bulevar Santander hasta el Intercambiador Puerta del Sol y las cinco principales intersecciones semaforizadas de ésta vía: Avenida Quebrada Seca, Calle 36, Calle 45, Calle 50 / Cra 17 y Calle 56.

El total de links a modelar fue de ochenta (80), en el que se incluyeron tramos de 300m de las calles que interceptan a la Carrera 15. De estos 80 links, 18 correspondieron a vías en las que existían vehículos detenidos por funcionamiento de semáforos (links con colas vehiculares). El número máximo de links que permite entrar el modelo es de 120.

Para cada link se debieron especificar las coordenadas georreferenciadas de inicio y final del tramo, las cuales se obtuvieron en los planos topográficos que elaborara el Área Metropolitana de Bucaramanga en los estudios preliminares del sistema METROLÍNEA.

Para la modelación de transporte masivo, se mantuvieron los mismos links que para la modelación en condiciones actuales, pues aunque se han proyectado modificaciones geométricas en las vías, no es posible estimar las características de operación que tendrían estos nuevos links.

#### 5.3.2.3. Ancho de mezcla

Se define para los tramos a flujo libre como el ancho de la vía más seis metros, debido a la turbulencia causada por el flujo vehicular. Este valor es independiente de la velocidad de circulación y el volumen de vehículos. Para los tramos con cola vehicular el ancho de mezcla es igual al ancho de la vía.

#### 5.3.2.4. Altura de la fuente de emisión

Es la altura respecto al piso en la cual se está emitiendo. En promedio los vehículos a gasolina expulsan los gases de escape a una altura muy cercana al suelo, mientras que los vehículos a diesel lo hacen a una altura mayor. Se tomó como promedio de la flota compuesta una altura de emisión de 0.5 m. Los resultados del modelo son insensibles a diferencias menores a dos metros en esta variable.

#### 5.3.2.5. Ubicación de los receptores

Los receptores son los puntos de la zona de estudio en los que se desea calcular la concentración de cada contaminante. Cada uno de estos puntos se debe referenciar con coordenadas planas y altura con respecto a los links. El número máximo de receptores que permite entrar el modelo es de 60, para poder usar más receptores, debe iniciarse otra sesión del modelo.

Para poder modelar los efectos de la contaminación a nivel de la calle, se asignó una altura para cada receptor igual a 2 metros y se ubicaron 100 receptores a diferentes distancias de las vías, desde 5 metros hasta 100 metros. Para comparar los resultados del modelo con la estación de monitoreo Centro ubicada a nivel de suelo, se definió el receptor TELEB ubicado en las mismas coordenadas que la estación.

Para el sistema de transporte masivo, se mantuvieron las mismas ubicaciones de los receptores para poder realizar comparaciones en la concentración de CO y PM10 en un mismo punto de la zona de estudio.

En las Figuras 5-11 y 5-12 se puede apreciar la ubicación espacial de los links y los receptores.

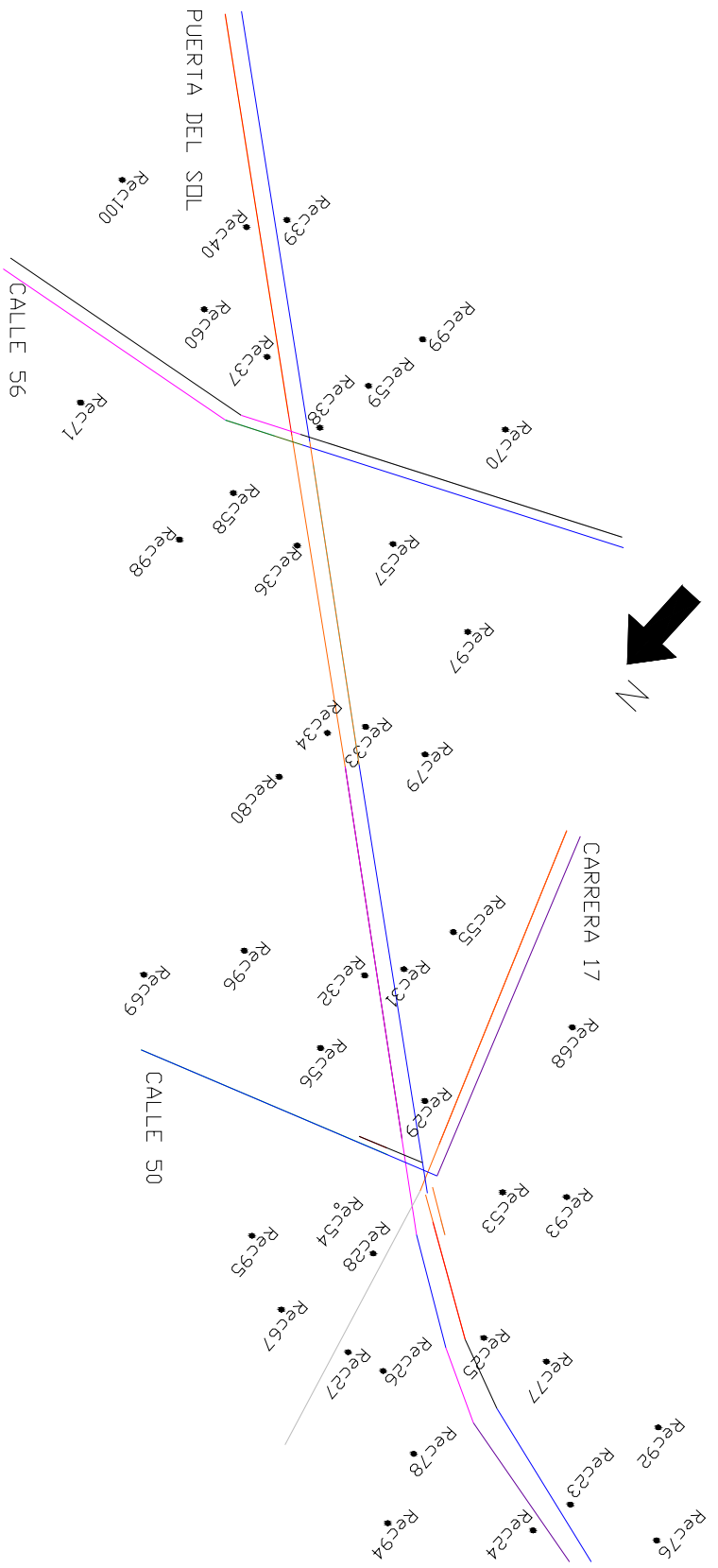


Figura 5-11: Ubicación de los links y receptores establecidos para la modelación (Calle 56 a Calle 45)

Fuente: Autores

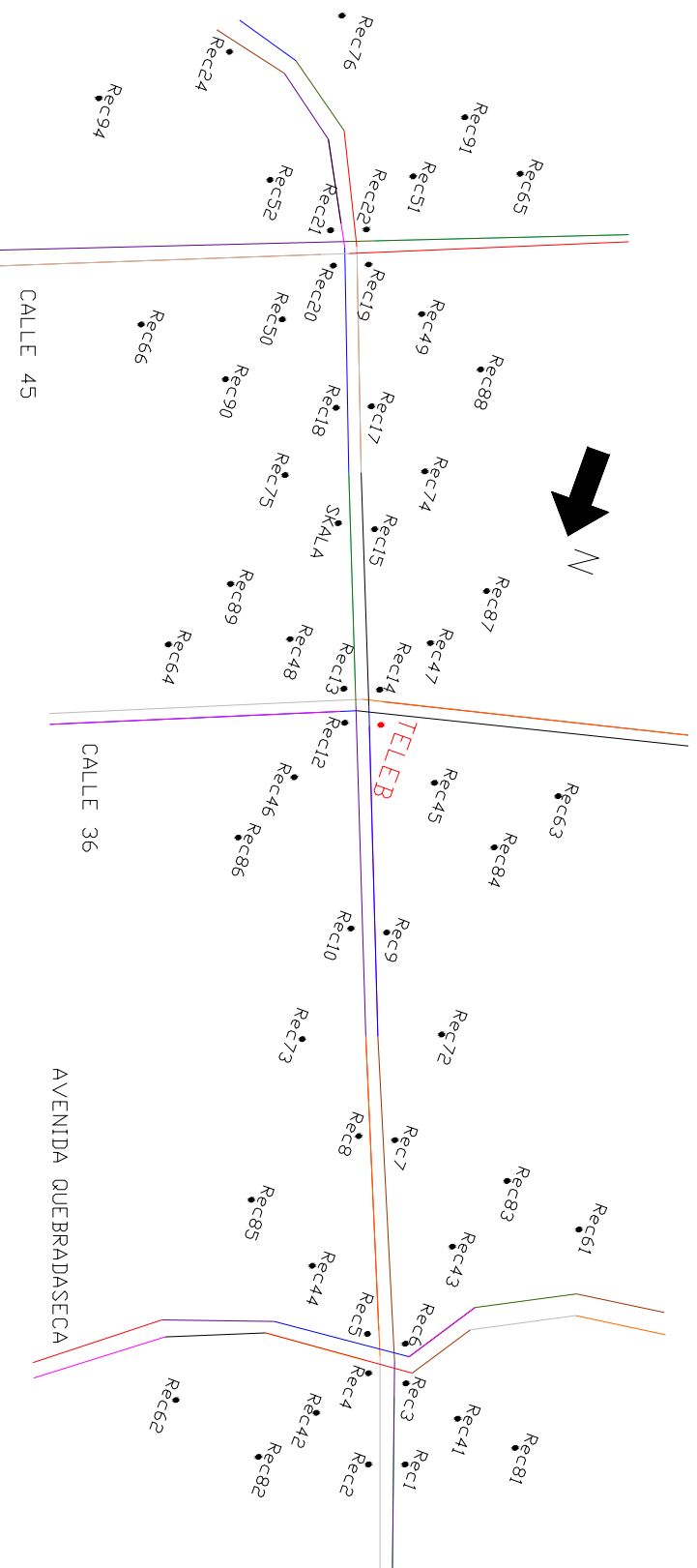


Figura 5-12: Ubicación de los links y receptores establecidos para la modelación (Calle 45 a Quebrada Seca)

Fuente: Autores

### 5.3.3. Variables de tráfico

#### 5.3.3.1. Ciclo y tipo de semáforo

El modelo permite simular las condiciones de funcionamiento de diferentes tipos de señales y para diferentes tiempos de ciclo. Las señales que permite modelar se presentan en la Tabla 5-4.

Tipo de señal	Descripción
Programada (Pre-timed)	La señal sigue una programación establecida con anterioridad.
Automática (Actuated)	La señal cambia su ciclo dependiendo del flujo vehicular
Semi – Automática (Semi – actuated)	Combina los dos tipos anteriores

*Tabla 5-4: Tipos de semáforos que considera el CAL3QHC*  
*Fuente: US EPA. User's Guide to CAL3QHC Version 2.0. 1995*

En las intersecciones a estudiar, los semáforos siguen ciclos programados con anterioridad para las diferentes horas del día. La información de los ciclos de cada intersección fue suministrada por la Dirección de Tránsito de Bucaramanga para cada hora del día, en un día laboral de martes a jueves.

El modelo requiere que para cada intersección se especifique la duración total del ciclo, el tiempo en rojo y el intervalo de amarillo que no es usado por los vehículos. Esta última variable es diferente al tiempo de arranque y depende del tipo de conducción (agresiva o conservadora) pero usualmente es de 2 segundos.

Para la modelación del sistema de transporte masivo se asumieron los mismos ciclos tipos y ciclos de semáforos pues aún no se cuenta con información proyectada de cambios en la semaforización de la zona.

### 5.3.3.2. Rata de arribo a cada intersección

Esta variable describe la manera como el tráfico llega a la intersección. Para éste fin se debe seleccionar una de progresiones del tráfico que define el modelo y que se encuentran en la Tabla 5-5.

Tipo de arribo	Descripción
La peor	Un pelotón denso de vehículos llega al principio de la fase roja
Sobre el promedio	Un pelotón de vehículos entre denso y disperso llega durante la fase roja
Promedio	Llegada de vehículos aleatoria
Debajo del promedio	Un pelotón denso o disperso llega durante la fase verde
La mejor	Un pelotón denso llega al principio de la fase verde

*Tabla 5-5: Clasificación de la rata de llegada a la intersección*

*Fuente: US EPA. User's Guide to CAL3QHC Version 2.0. 1995*

Para determinar esta variable, se hizo un estudio de campo para cada intersección y sentido en horas pico y no pico durante 15 minutos (entre siete y diez ciclos de semáforo), en el que se determinó el tipo de arribo de los vehículos para cada sentido.

Para el sistema de transporte masivo se asumieron los mismos valores de rata de arribo, ante la imposibilidad de determinar esta variable a partir de los estudios de METROLÍNEA actuales.

#### 5.3.3.3. Volúmenes vehiculares

El volumen de vehículos que circula en cada línea de flujo (link) es un factor determinante en el cálculo de las concentraciones de contaminantes. Para obtener ésta variable se recogieron los resultados de varios estudios de conteos de tráfico hechos en la zona durante los últimos dos años.

Para las intersecciones de la Calle 36, Calle 45, Calle 50 / Cra 17 y Calle 56 se utilizó información perteneciente a la Dirección de Tránsito de Bucaramanga y para la Avenida Quebrada Seca se usó información de la Secretaría de Infraestructura de Bucaramanga.

La información de los conteos suministra volúmenes de autos, buses y camiones para 14 horas del día (de 6AM a 8PM) en todos los sentidos en intervalos de 15 minutos. Solo para la Avenida Quebrada Seca se obtuvieron datos de motocicletas, por lo que no se tuvieron en cuenta en la modelación.

Se introdujeron al modelo los volúmenes totales de cada hora en vehículos equivalentes, para cada uno de los sentidos en todas las intersecciones. Para los tramos de la Carrera 15, entre dos intersecciones, se asumieron los mismos volúmenes de la intersección más cercana, despreciando el efecto de los cruces intermedios. Esta suposición no es del todo desacertada pues son muy pocos los vehículos que entran y salen a la Carrera 15 por vías distintas a las de las intersecciones estudiadas.

Para la modelación del sistema de transporte masivo, los volúmenes circulantes por la Carrera 15 fueron modificados tal como se explica en el capítulo de emisión. La metodología utilizada fue reemplazar de los conteos de tráfico, el volumen de buses actual por el volumen calculado de buses del sistema METROLÍNEA que circularán por la misma vía.

#### 5.3.3.4. Flujo de saturación por carril

El flujo de saturación se define como: “la tasa máxima de flujo, en un acceso o grupo de carriles, que puede pasar a través de la intersección bajo las condiciones prevalecientes del tráfico y la calle, suponiendo que dicho acceso o grupo de carriles tiene el 100% del tiempo disponible como verde efectivo.”<sup>120</sup>

Este valor se debe determinar en cada sentido e intersección a partir del tiempo de paso entre vehículos, el cual se define como el tiempo medido entre dos vehículos consecutivos que cruzan por el mismo punto. Este es un valor que se mide directamente en campo. El flujo de saturación se obtiene con la ecuación 5.21:

$$Q_s = \frac{3600}{t_b} \quad (5.21)$$

Dónde:

$Q_s$  = Flujo de saturación en veh/hverde/carril

$t_b$  = Tiempo de paso en segundos

Los conteos suministrados por la Dirección de Tránsito de Bucaramanga incluyen el valor de tiempo de paso calculado en cada intersección y sentido para la mañana, mediodía, tarde y noche. Con esta información se calcularon los valores de flujo de saturación por carril.

Para el sistema de transporte masivo se mantuvieron los mismos valores de flujo de saturación, pues no es posible recalcular este valor en base a los estudios actuales de METROLÍNEA.

---

<sup>120</sup> CAL Y MAYOR, Rafael y CÁRDENAS, James. Ingeniería de Tránsito. México: Alfaomega, 2000. p. 364

#### 5.3.4. Emisiones

##### 5.3.4.1. Factor de emisión en movimiento (Running) [gr/veh-milla]

El factor de emisión en movimiento representa la tasa en la que cada vehículo emite gramos de contaminante por milla recorrida. Este valor es directamente proporcional a los resultados de concentración, por lo que es sin duda la variable de mayor importancia (al igual que el factor de emisión en reposo).

Este factor de emisión se calculó para una flota característica de cada intersección y sentido en vehículos equivalentes, tanto para monóxido de carbono (CO) como para material particulado (PM10) utilizando el modelo IVE.

Las características de la flota circulante son afectadas de manera apreciable al entrar en funcionamiento el SITM, por lo que las emisiones calculadas para CO y PM10 varían entre la modelación en condiciones actuales y con el funcionamiento de METROLÍNEA.

##### 5.3.4.2. Factor de emisión en reposo (Idle) [gr/hora]

El factor de emisión en reposo representa la tasa en la que un vehículo de la flota equivalente emite contaminantes por hora mientras está quieto, en este caso, en un cruce semaforizado. Al igual que para el factor de emisión en movimiento, este se calculó utilizando el modelo de emisión internacional (IVE), tanto para las condiciones actuales como para las del SITM.

#### 5.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El modelo CAL3QHC fue utilizado en la obtención de la concentración de los parámetros de interés (CO y PM<sub>10</sub>) en la atmósfera de la zona de estudio. Para este propósito, se modeló simultáneamente la Carrera 15 / Diagonal 15 (desde el Bulevar Santander hasta el intercambiador la Puerta del Sol) con las cinco intersecciones seleccionadas sobre esta avenida.

El modelo se usó para obtener los resultados de monóxido de carbono (CO) y material particulado (PM10) para cada hora desde las 6:00AM hasta las 7:00PM, tanto para las condiciones de circulación actual como para el escenario futuro de funcionamiento del sistema METROLÍNEA.

En la Tabla 5-6 se presenta el número total de archivos utilizados para las modelaciones del proyecto:

ESCENARIO	ARCHIVOS
Trece horas de modelación	13 archivos
Dos grupos de receptores	x 2
Dos grupos de contaminantes	x 2
Condiciones actuales y futuras	x 2
TOTAL	104 archivos

*Tabla 5-6: Archivos de entrada para las modelaciones de dispersión*

*Fuente: Autores*

Nota: Se modeló el SITM solamente con motores Diesel.

#### 5.4.1. Consideraciones iniciales

La estación de monitoreo Centro hace parte de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire en Bucaramanga y su ubicación en la zona del proyecto, permiten comparar los resultados de la modelación con los valores reales que mide.

La estación suele estar ubicada sobre la Carrera 15 entre las Calles 37 y 41 en el último piso de los parqueaderos SKALA, pero en los meses de Abril, Mayo y Junio de 2003 fue ubicada en la intersección de la Calle 36 con Carrera 15 a nivel de la vía, frente al Edificio de Telebucaramanga. (Ver Figuras 5-13 y 5-14 con planos esquemáticos de la zona)

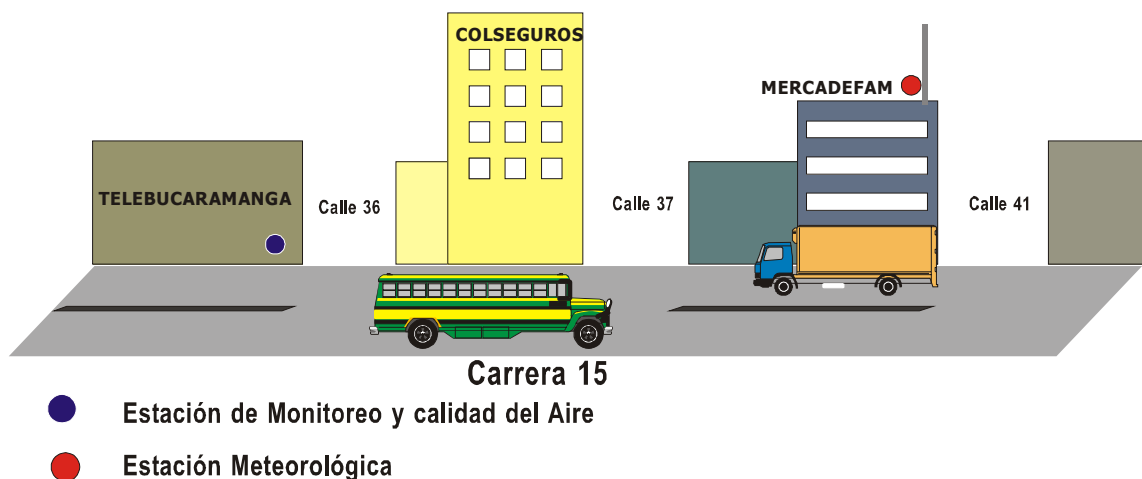
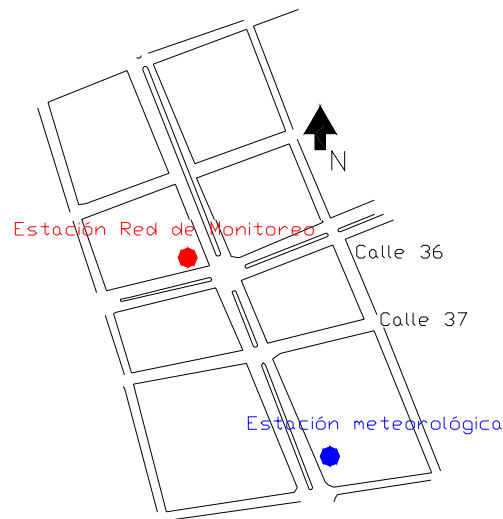


Figura 5-13: Ubicación esquemática de la Estación de Monitoreo y la Estación Meteorológica

Fuente: Autores

Con éste estudio se ha querido estimar las concentraciones a nivel de suelo (2 metros de altura), que es la zona más cercana a las emisiones y donde se encuentra la mayoría de población susceptible a los efectos de los contaminantes. Es por esta razón que el interés del proyecto es comparar los

resultados del modelo con los valores que arrojó la estación Centro mientras estuvo a nivel de vía.



*Figura 5-14: Ubicación en planta de la estación de monitoreo y la estación meteorológica*

*Fuente: Autores*

En la ubicación original de la estación se encuentra una estación meteorológica administrada también por la CDMB, dotada con equipo de medición de velocidades y dirección del viento, temperatura, radiación solar y humedad relativa. Esta estación es la encargada de suministrar los datos meteorológicos usados en el modelo.

Los equipos con los que cuenta la estación meteorológica son:<sup>121</sup>

- Equipo de medición de presión barométrica modelo 091-26/32
- Equipo de medición de temperatura y humedad relativa modelo 083C-1-35
- Equipo de medición de radiación solar (piranómetro) modelo PY26618
- Equipo de medición de Velocidad y dirección del viento integrados

---

<sup>121</sup> Fuente: CDMB

- Equipo de medición de precipitación modelo 372 (8', 0.5mm)
- La estación meteorológica es marca Met One Instruments

Mientras que los equipos de medición de contaminantes de la estación Centro son:<sup>122</sup>

- Analizador de CO modelo API 300
- Monitor de partículas modelo BAM 1020
- Datalogger ESC 8816. (Obtiene los valores en tiempo real)

Debido a la diferencia de altura entre la estación meteorológica y la nueva ubicación de la estación de monitoreo, los valores de velocidad y dirección del viento deben ser tomados con cautela, pues no corresponden a las condiciones reales.

La velocidad y dirección del viento son afectadas a bajas alturas por la fricción. Está demostrado que la velocidad del viento disminuye a medida que disminuye la altura, por acción de la fricción que ejercen los elementos superficiales. Esta disminución es apenas apreciable en superficies totalmente lisas como desiertos y pavimentos, pero en zonas con elementos altos, como en bosques y ciudades, este efecto es mucho mayor.

La dirección del viento también varía apreciablemente, pues las fuerzas de fricción desestabilizan las fuerzas de presión que mueven a las corrientes de aire y pueden presentarse súbitos cambios de dirección en bordes de edificios o en zonas “encañonadas”<sup>123</sup>.

Para estimar la disminución en la velocidad del viento se utilizó la ecuación descrita en los datos de entrada del modelo, para las horas en que se

---

<sup>122</sup> Fuente: CDMB

<sup>123</sup> Se denominan así las zonas que se encuentran rodeadas por edificios altos, análogas a un cañón natural.

consideró necesaria aplicar la disminución, mientras que para estimar la dirección, se seleccionaron las direcciones de viento que proporcionaran mayor coherencia con los valores de la estación.

En la Tabla 5-7, se pueden apreciar las velocidades y rangos de direcciones que se le proporcionaron al modelo:

Hora	Velocidad m/s	Rango Dirección	
		Mínimo	Máximo
6	0.8	85	115
7	1.0	80	110
8	1.3	120	150
9	1.5	80	110
10	1.8	90	120
11	1.0	150	180
12	1.3	130	160
13	1.3	85	115
14	1.4	90	120
15	1.5	90	120
16	1.5	130	160
17	1.3	130	160
18	1.1	130	160

*Tabla 5 -7: Velocidades y rangos de dirección del viento modificado*

*Fuente: Autores*

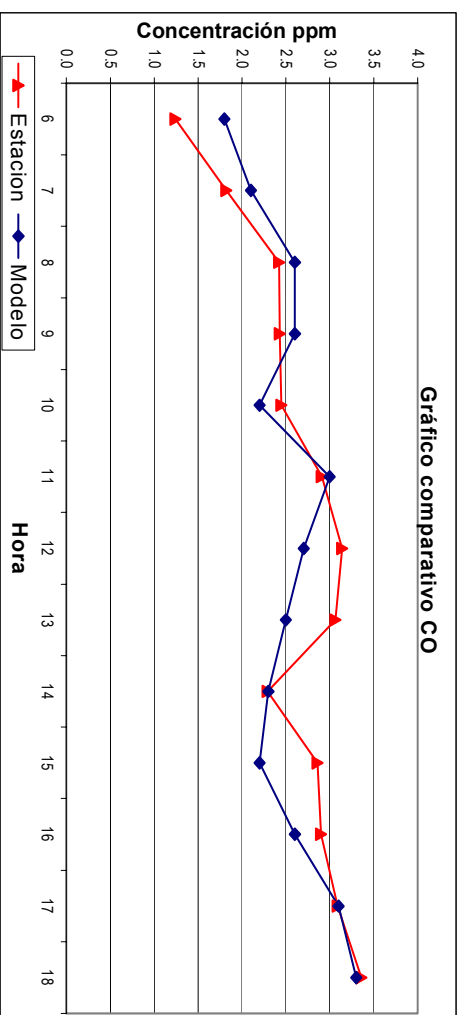
#### 5.4.2. Comparación con la Estación de Monitoreo Centro

El objetivo de este proyecto no es calibrar el modelo de dispersión. El proceso de calibración requiere de una metodología un poco diferente a la utilizada en este trabajo. La intención de comparar las emisiones es brindarle a la modelación un marco de referencia, que permita entender y contextualizar los datos obtenidos.

En el modelo se asignó a uno de los receptores, las coordenadas de la Estación Centro en su ubicación a nivel del suelo. Las comparaciones entre el modelo y la estación se realizaron en ese punto (receptor TELEB).

En la Figura 5-15 se presentan las gráficas de concentración de CO y PM10 para cada una de las horas del día, tanto para las calculadas por el modelo como para las de la estación. Los valores de la estación de monitoreo son los promedios horarios entre el 7 de Abril de 2003 y el 7 de Julio de 2003.

CO (Background = 1.0ppm) Comparación Estación Centro			
Hora	Estación	Modelo	
6	1.2	1.8	
7	1.8	2.1	
8	2.4	2.6	
9	2.4	2.6	
10	2.5	2.2	
11	2.9	3.0	
12	3.1	2.7	
13	3.1	2.5	
14	2.3	2.3	
15	2.9	2.2	
16	2.9	2.6	
17	3.1	3.1	
18	3.4	3.3	



PM10 (Background = 45.0µgr/ m³) Comparación Estación Centro			
Hora	Estación	Modelo	
6	44.5	63.0	
7	64.4	68.0	
8	83.9	69.0	
9	92.8	70.0	
10	84.4	66.0	
11	87.7	64.0	
12	101.7	57.0	
13	111.1	71.0	
14	131.9	64.0	
15	109.7	65.0	
16	115.5	68.0	
17	123.3	79.0	
18	132.3	81.0	

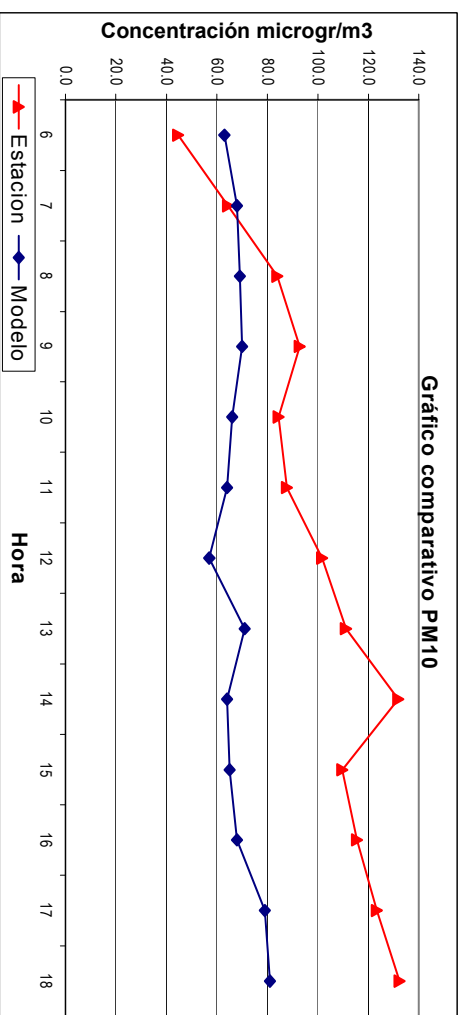


Figura 5-15: Comparación gráfica entre las concentraciones de la Estación Centro y los resultados del modelo (Receptor

TELEB)

Fuente: Autores

#### 5.4.2.1. Análisis de las concentraciones de Monóxido de Carbono (CO)

En la gráfica de concentraciones promedio de CO de la estación, se observan dos picos, uno a las 12 del día y a otro a las 6 de la tarde. Estos valores picos coinciden con la dinámica de transporte de la zona, pues estas son las horas en que la gente sale de sus lugares de trabajo hacia sus hogares, usualmente en el sur de la ciudad.

Las manzanas cercanas a la intersección de la Calle 36 (zona donde esta ubicada la estación) son zonas altamente comerciales, con un flujo de personas y vehículos constante, por esa razón no se observan disminuciones importantes en los datos de concentración a largo del día.

Se observa como la gráfica de concentraciones calculadas con el modelo, sigue adecuadamente la tendencia y orden de magnitudes de la estación, encontrándose las principales diferencias entre los valores entre las 6 y 8 de la mañana, las 11 y 12 del día y las 3 y 4 de la tarde. La mayor diferencia de concentraciones es de 0.6ppm, a las 6AM y a las 12M.

Es importante anotar que algunas variables importantes de emisión no fueron tenidas en cuenta en la modelación, como lo son la contribución de las motocicletas, el aporte de otras vías cercanas y la concentración transportada de otras vías de la ciudad, entre otras variables.

#### 5.4.2.2. Análisis del Material Particulado menor a 10 micras (PM10)

Los datos de PM<sub>10</sub> calculados por la estación muestran un constante incremento a lo largo del día, alcanzando un pico a las 2 de la tarde y a las 6

de la tarde. Estos valores están estrechamente ligados con las características de tráfico y funcionamiento de los buses y busetas de servicio urbano, pues los principales emisores de PM10 son los vehículos de motor diesel. El incremento de los buses en las horas de la tarde, explica este crecimiento de las concentraciones de material particulado (que tienen su pico absoluto a las 7PM)<sup>124</sup>.

La gráfica arrojada por el modelo conserva en buena parte la tendencia de la estación, aunque las diferencias entre la magnitud de las concentraciones es considerable, sobre todo en horas de la tarde, llegando a diferencias hasta de  $68\mu\text{gr}/\text{m}^3$ . Las razones de esta situación son varias:

- En las zonas cercanas a la intersección circulan una buena cantidad de buses que no fueron introducidos en la modelación. En las calles 34 y 37 y la Carrera 17 circulan varias rutas de buses.
- En las horas de la tarde, ocurre en toda la ciudad un aumento de la flota de buses, por lo tanto el efecto sumado de toda esta flota, eleva las concentraciones de material particulado en una mayor proporción.
- Las emisiones calculadas por el modelo de emisión no pueden considerar ciertas variables propias del parque automotor local como son la falta de mantenimiento del vehículo, las repotenciaciones del motor y otras modificaciones en el vehículo. Estas situaciones son comunes en los buses urbanos que circulan en la zona.
- No se consideró en la modelación, el aporte a la contaminación de las motocicletas. Estos vehículos poseen motores de dos tiempos, los cuales

---

<sup>124</sup> Información suministrada por la CDMB

emiten una cantidad considerable de material particulado. Se estima que por el pobre proceso de combustión de estos motores, las emisiones de  $PM_{10}$  son mayores en un 1000% a las de un motor de cuatro tiempos de equivalente potencia.<sup>125</sup>

Todos estos parámetros que influyen en la medición de la concentración del  $PM_{10}$  y que no están ligados con el modelo (o no pudieron ser considerados), influyen en las diferencias entre los datos de la estación y los del modelo.

Para poder realizar la comparación entre las concentraciones actuales y las proyectadas cuando entre en funcionamiento el SITM, debe tenerse en cuenta que los valores arrojados por el modelo no representan la concentración total de  $PM_{10}$  que existe en el aire y por lo tanto los resultados siempre serán menores a la concentración real.

La comparación objetiva entre la situación actual y con el SITM en funcionamiento es posible, pues las mismas limitaciones que influyen en la determinación de la situación actual, influyen a su vez en la determinación de las emisiones con el SITM. Aunque las concentraciones obtenidas para las dos situaciones no son los valores reales en la atmósfera, la proporción de disminución entre las dos situaciones es una medida válida para la evaluación.

Para concluir, se puede afirmar que la concentración calculada para el SITM representa únicamente la concentración causada por el funcionamiento del sistema, y para poder calcular las concentraciones reales que se medirán en la zona, deben estimarse las emisiones provenientes de otras fuentes cercanas.

---

<sup>125</sup> COOPER, C. David y ALLEY, F.C. Air Pollution Control. 2ª ed. USA: Waveland Press, 1994.

### 5.4.3. Comparación entre la situación actual y la proyectada con el funcionamiento del SITM

#### 5.4.3.1. Perfil de concentraciones en la vía

Para cada hora del día, la concentración de contaminantes en cada una de las zonas del área de estudio varía en función del volumen de vehículos que circulan y las condiciones geométricas y de señalización.

Para poder representar la variación de las concentraciones de CO y PM10 a lo largo de la Carrera 15, se agruparon los receptores más cercanos a la vía<sup>126</sup> por zonas. En la Tabla 5-8 describen las zonas seleccionadas:

Número zona	Descripción	Receptores
1	Tramo desde el Blv. Santander hasta la Av. Quebrada Seca	1 – 2
2	Intersección Avenida Quebrada Seca	3 – 4 – 5 – 6
3	Tramo desde la Avenida Quebrada Seca hasta la Calle 36	7 – 8 – 9 – 10
4	Intersección Calle 36	11 – 12 – 13 – 14
5	Tramo desde la Calle 36 hasta la Calle 45	15 – 16 – 17 – 18
6	Intersección Calle 45	19 – 20 – 21 – 22
7	Tramo desde la Calle 45 hasta la Calle 50	23 – 24
8	Intersección Calle 50	25 – 27 – 28 – 29
9	Tramo desde la Calle 50 hasta la Calle 56	31 – 32 – 33 – 34
10	Intersección Calle 56	36 – 37 – 38
11	Tramo desde la Calle 56 hasta la Puerta del Sol	39 – 40

*Tabla 5-8: Descripción de zonas utilizadas en el perfil de concentraciones*

*Fuente: Autores*

---

<sup>126</sup> Estos receptores se encuentran a una distancia de 5 metros del borde de la vía

En las Figuras 5-16 y 5-17 se puede apreciar la variación de las concentraciones en la Carrera 15 a medida que se recorre de Norte a Sur bajo las condiciones actuales y con el funcionamiento del SITM. Se seleccionaron las horas en que se presentan las mayores concentraciones de contaminantes en la zona.

#### 5.4.3.2. Variación horaria de concentraciones en diferentes intersecciones

Las concentraciones de contaminantes en la zona varían cada hora según las características del tráfico y las condiciones atmosféricas predominantes. En cada una de las intersecciones ocurren picos de concentración en diferentes horas, aunque se mantiene una tendencia de concentraciones altas en las primeras horas de la mañana, al mediodía y al final de la tarde, las cuales corresponden a las horas de mayor flujo vehicular.

Para analizar esta variación, se analizó cada una de las intersecciones modeladas, en el periodo de las 6 AM a 7PM. En las Figuras 5-18 a 5-20 se presentan los resultados obtenidos tanto para las condiciones actuales como para las del SITM.

#### 5.4.3.3. Variación de concentraciones a diferentes distancias perpendiculares a la vía

La concentración de contaminantes disminuye a medida que los receptores se alejan de la vía. Esto ocurre por el efecto de dispersión del viento y la turbulencia vertical que permite el ascenso de los contaminantes a medida que son transportados por el viento.

Para el material particulado, esta disminución con la distancia también está ligada con la velocidad de deposición y asentamiento del contaminante, pues entre mayores sean estas velocidades, será menor el tiempo de descenso y por lo tanto recorrerán menores distancias.

Para calcular esta disminución se agruparon los distintos receptores según su distancia de las fuentes de emisión y se calculó un valor promedio para cada uno de los grupos. Esto se puede observar en la Figura 5-21.

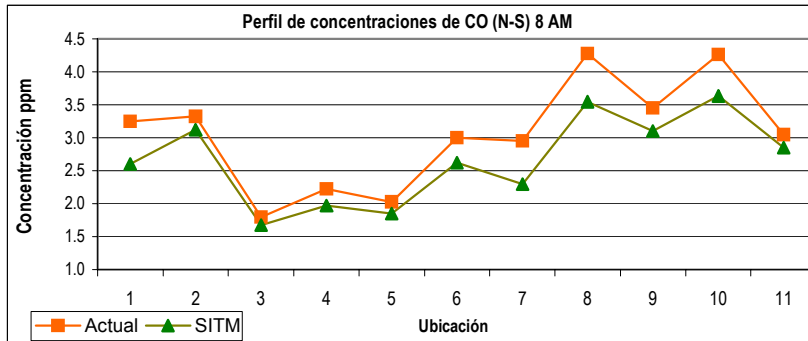
Es importante tener en cuenta que por usarse un valor promedio, solo se busca ilustrar el cambio de concentración con la distancia y no calcular la concentración en cualquier punto a una determinada distancia.

#### 5.4.3.4. Variación horaria de las concentraciones máximas en la zona de estudio

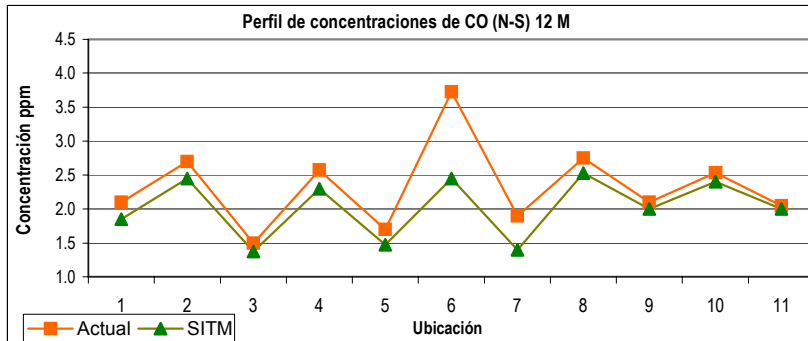
Para determinar las zonas más críticas de contaminación en determinada hora, se han calculado los máximos picos de contaminación para toda la zona de estudio y el receptor en el que se ha calculado este pico.

Estos niveles máximos de concentración de CO y PM10 pueden ser usados como un punto de referencia para determinar zonas más susceptibles a superar los parámetros legislativos de concentraciones máximas. Además, estos datos pueden ser usados como un criterio válido para la ubicación de estaciones de monitoreo ambiental. Esto se puede apreciar en la Figura 5-22.

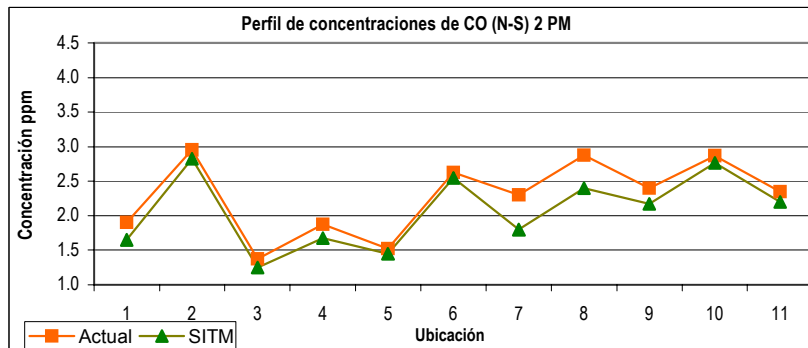
8AM CO		
Zona	Actual	SITM
1	3.3	2.6
2	3.3	3.1
3	1.8	1.7
4	2.2	2.0
5	2.0	1.9
6	3.0	2.6
7	3.0	2.3
8	4.3	3.6
9	3.5	3.1
10	4.3	3.6
11	3.1	2.9



12M CO		
Zona	Actual	SITM
1	2.1	1.9
2	2.7	2.5
3	1.5	1.4
4	2.6	2.3
5	1.7	1.5
6	3.7	2.5
7	1.9	1.4
8	2.8	2.5
9	2.1	2.0
10	2.5	2.4
11	2.1	2.0



2PM CO		
Zona	Actual	SITM
1	1.9	1.7
2	3.0	2.8
3	1.4	1.3
4	1.9	1.7
5	1.5	1.5
6	2.6	2.6
7	2.3	1.8
8	2.9	2.4
9	2.4	2.2
10	2.9	2.8
11	2.4	2.2



6PM CO		
Zona	Actual	SITM
1	3.6	3.2
2	3.7	3.4
3	2.1	1.8
4	2.8	2.5
5	2.8	2.8
6	3.8	3.7
7	2.7	2.6
8	4.4	4.3
9	3.9	3.7
10	4.2	3.9
11	3.1	2.9

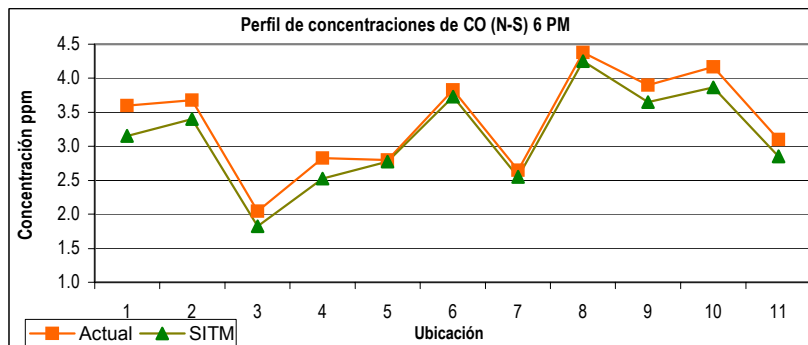
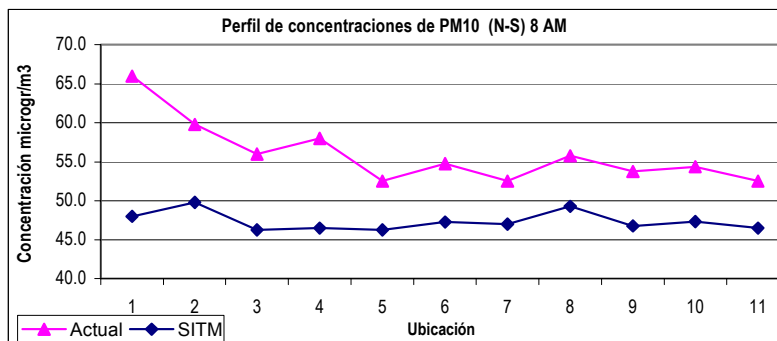


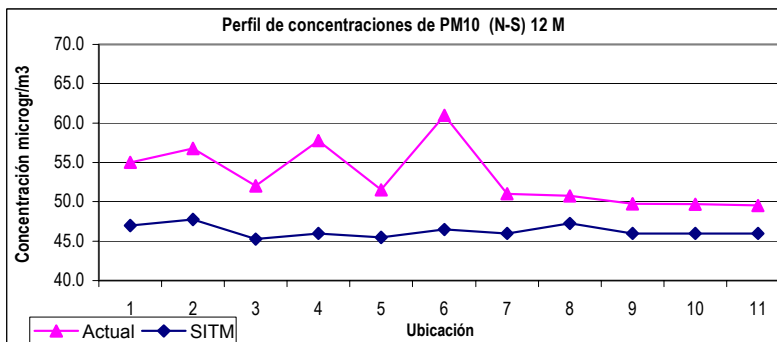
Figura 5-16: Perfil de concentraciones de CO en las diferentes zonas adyacentes a la Carrera 15

Fuente: Autores

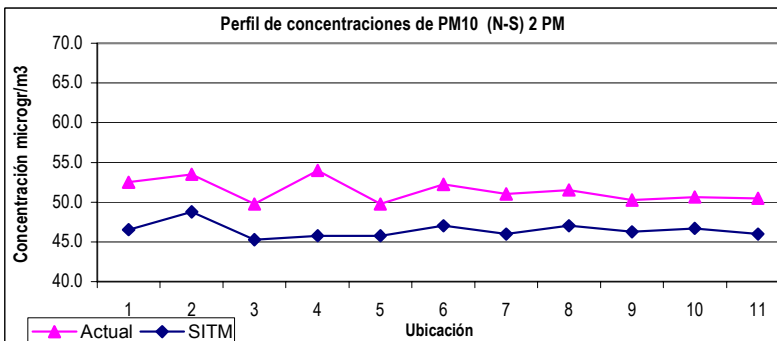
8AM PM10		
Zona	Actual	SITM
1	66.0	48.0
2	59.8	49.8
3	56.0	46.3
4	58.0	46.5
5	52.5	46.3
6	54.8	47.3
7	52.5	47.0
8	55.8	49.3
9	53.8	46.8
10	54.3	47.3
11	52.5	46.5



12M PM10		
Zona	Actual	SITM
1	55.0	47.0
2	56.8	47.8
3	52.0	45.3
4	57.8	46.0
5	51.5	45.5
6	61.0	46.5
7	51.0	46.0
8	50.8	47.3
9	49.8	46.0
10	49.7	46.0
11	49.5	46.0



2PM PM10		
Zona	Actual	SITM
1	52.5	46.5
2	53.5	48.8
3	49.8	45.3
4	54.0	45.8
5	49.8	45.8
6	52.3	47.0
7	51.0	46.0
8	51.5	47.0
9	50.3	46.3
10	50.7	46.7
11	50.5	46.0



6PM PM10		
Zona	Actual	SITM
1	68.5	49.0
2	64.5	50.0
3	62.5	46.3
4	68.0	46.8
5	59.3	47.0
6	62.5	48.3
7	53.5	47.5
8	55.8	50.3
9	55.5	47.5
10	55.3	48.0
11	53.0	47.0

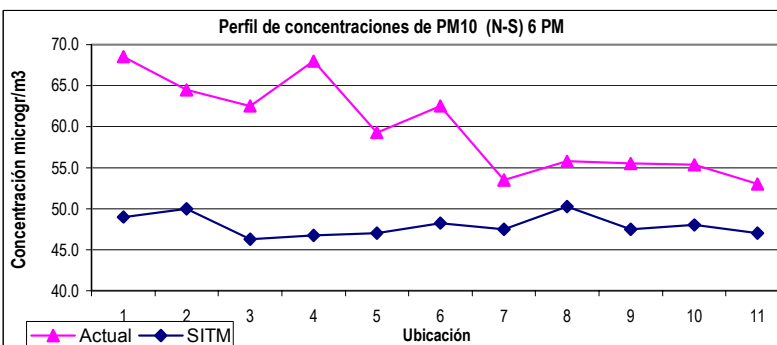
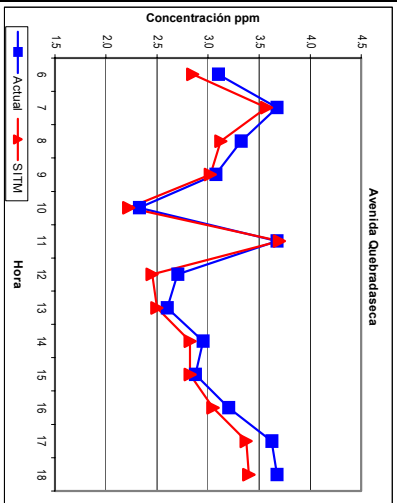


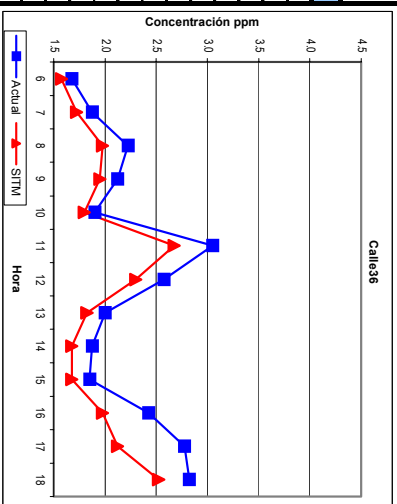
Figura 5-17: Perfil de concentraciones de PM10 en las diferentes zonas adyacentes a la Carrera 15

Fuente: Autores

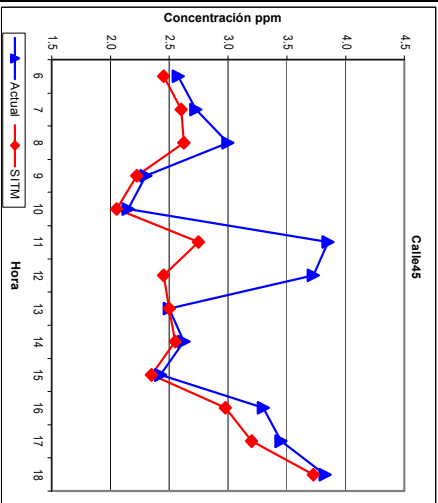
Concentración CO Cra.15 con Av. Osceca		
Hora	Actual	SITM
6	3.1	2.9
7	3.7	3.6
8	3.3	3.1
9	3.1	3.0
10	2.3	2.2
11	3.7	3.7
12	2.7	2.5
13	2.6	2.5
14	3.0	2.8
15	2.9	2.8
16	3.2	3.1
17	3.6	3.4
18	3.7	3.4



Concentración CO Cra 15 con Calle36		
Hora	Actual	SITM
6	1.7	1.6
7	1.9	1.7
8	2.2	2.0
9	2.1	2.0
10	1.9	1.8
11	3.1	2.7
12	2.6	2.3
13	2.0	1.8
14	1.9	1.7
15	1.9	1.7
16	2.4	2.0
17	2.8	2.1
18	2.8	2.5



Concentración CO Cra 15 con Calle45		
Hora	Actual	SITM
6	2.6	2.5
7	2.7	2.6
8	3.0	2.6
9	2.3	2.2
10	2.2	2.1
11	3.9	2.8
12	3.7	2.5
13	2.5	2.5
14	2.6	2.6
15	2.4	2.4
16	3.3	3.0
17	3.5	3.2
18	3.8	3.7



Concentración CO Cra 15 con Calle50		
Hora	Actual	SITM
6	2.6	2.2
7	3.7	2.9
8	4.3	3.6
9	3.1	2.3
10	2.2	1.8
11	3.4	3.2
12	2.8	2.5
13	2.9	2.3
14	2.9	2.4
15	2.4	2.2
16	3.1	3.0
17	3.5	3.5
18	4.4	4.3

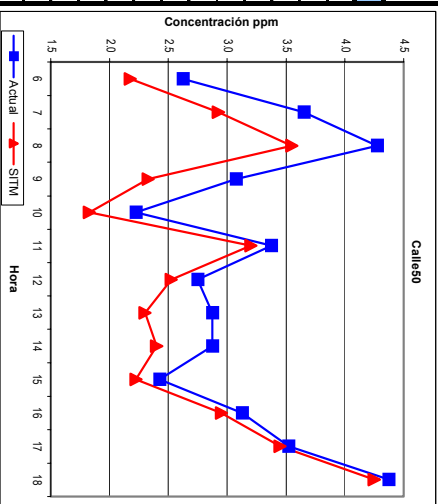
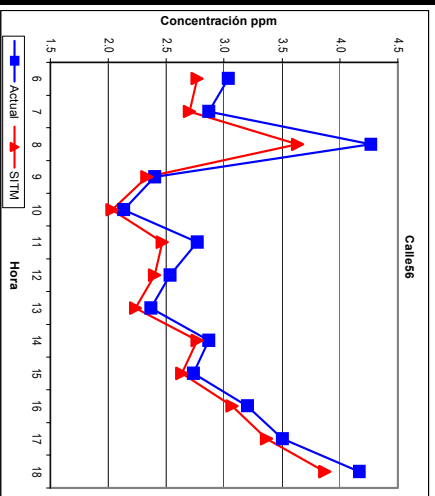
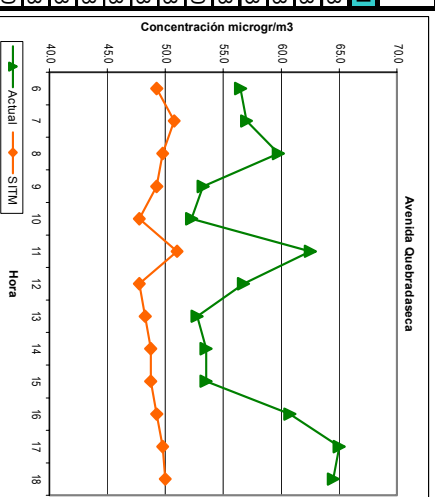


Figura 5-18: Variación horaria de las concentraciones para las diferentes intersecciones (Parte I)  
Fuente: Autores

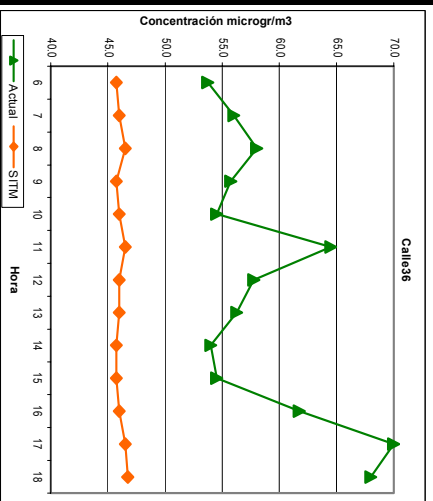
Concentración CO		
Cra 15 con Calle56		
Hora	Actual	SITM
6	3.0	2.8
7	2.9	2.7
8	4.3	3.6
9	2.4	2.3
10	2.1	2.0
11	2.8	2.5
12	2.5	2.4
13	2.4	2.2
14	2.9	2.8
15	2.7	2.6
16	3.2	3.1
17	3.5	3.4
18	4.2	3.9



Concentración PM		
Cra 15 con Av. Osca		
Hora	Actual	SITM
6	56.5	49.3
7	57.0	50.8
8	59.8	49.8
9	53.3	49.3
10	52.3	47.8
11	62.5	51.0
12	56.8	47.8
13	52.8	48.3
14	53.5	48.8
15	53.5	48.8
16	60.8	49.3
17	65.0	49.8
18	64.5	50.0



Concentración PM		
Cra 15 con Calle36		
Hora	Actual	SITM
6	53.8	45.8
7	56.0	46.0
8	58.0	46.5
9	55.8	45.8
10	54.5	46.0
11	64.5	46.5
12	57.8	46.0
13	56.3	46.0
14	54.0	45.8
15	54.5	45.8
16	61.8	46.0
17	70.0	46.5
18	68.0	46.8



Concentración PM		
Cra 15 con Calle45		
Hora	Actual	SITM
6	52.5	46.8
7	52.5	47.0
8	54.8	47.3
9	50.8	46.8
10	49.5	46.5
11	62.0	47.3
12	61.0	46.5
13	52.0	47.0
14	52.3	47.0
15	51.5	46.3
16	58.5	47.0
17	60.8	47.5
18	62.5	48.3

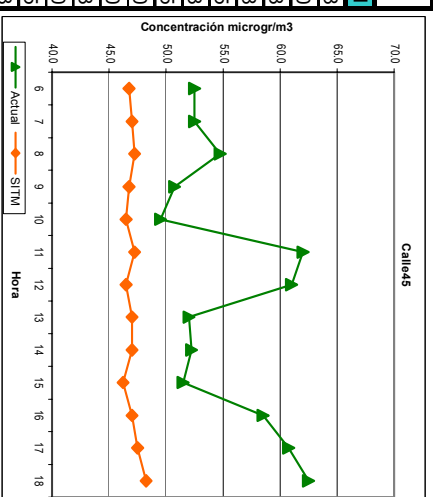
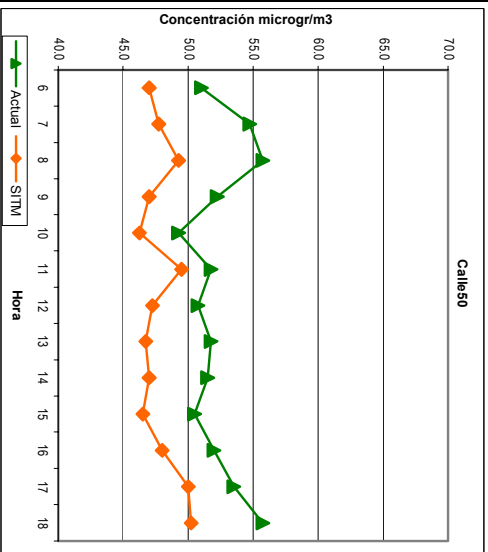


Figura 5-19: Variación horaria de las concentraciones para las diferentes intersecciones (Parte II)  
Fuente: Autores

Concentración PM Cra 15 con Calle50		
Hora	Actual	SITM
6	51.0	47.0
7	54.8	47.8
8	55.8	49.3
9	52.3	47.0
10	49.3	46.3
11	51.8	49.5
12	50.8	47.3
13	51.8	46.8
14	51.5	47.0
15	50.5	46.5
16	52.0	48.0
17	53.5	50.0
18	55.8	50.3



Concentración PM Cra 15 con Calle56		
Hora	Actual	SITM
6	50.3	46.3
7	49.7	46.7
8	54.3	47.3
9	49.0	46.3
10	48.7	46.3
11	50.7	46.3
12	49.7	46.0
13	48.7	46.3
14	50.7	46.7
15	50.0	46.3
16	52.3	47.0
17	53.3	47.3
18	55.3	48.0

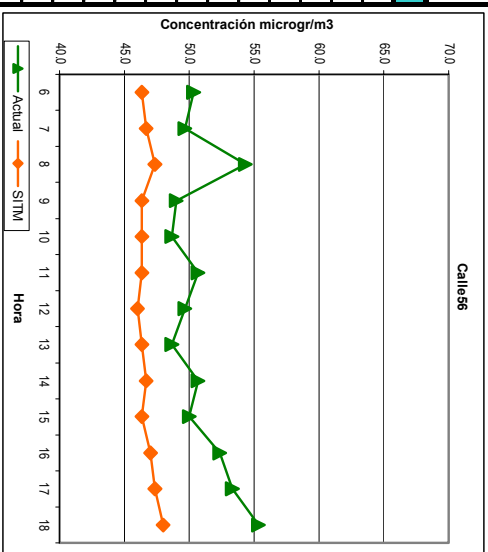
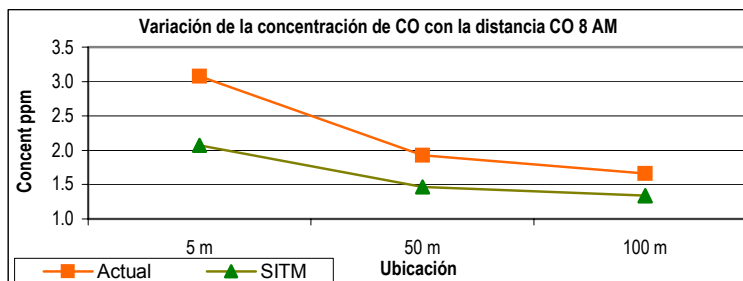


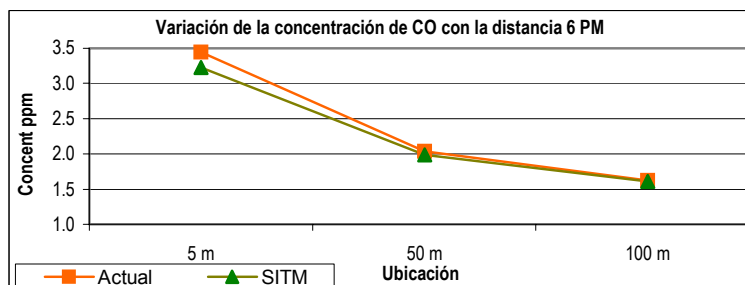
Figura 5-20: Variación horaria de las concentraciones para las diferentes intersecciones (Parte III)

Fuente: Autores

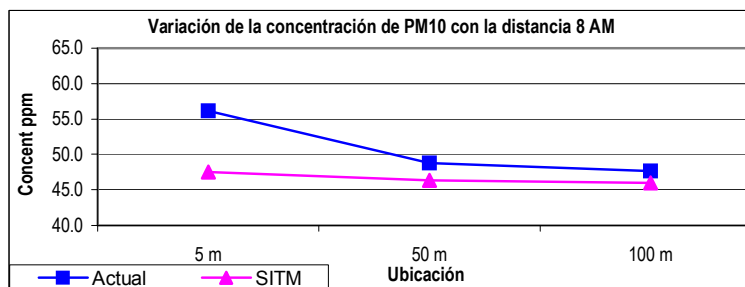
8AM CO		
Zona	Actual	SITM
5 m	3.1	2.1
50 m	1.9	1.5
100 m	1.7	1.3



6PM CO		
Zona	Actual	SITM
5 m	3.4	3.2
50 m	2.0	2.0
100 m	1.6	1.6



8AM PM10		
Zona	Actual	SITM
5 m	56.1	47.5
50 m	48.8	46.3
100 m	47.7	46.0



6PM PM10		
Zona	Actual	SITM
5 m	60.6	48.1
50 m	49.5	46.6
100 m	48.0	46.0

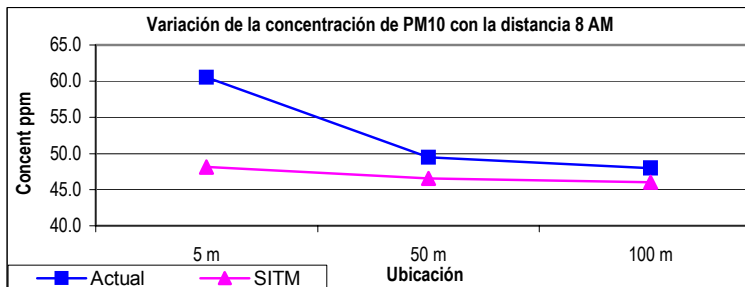
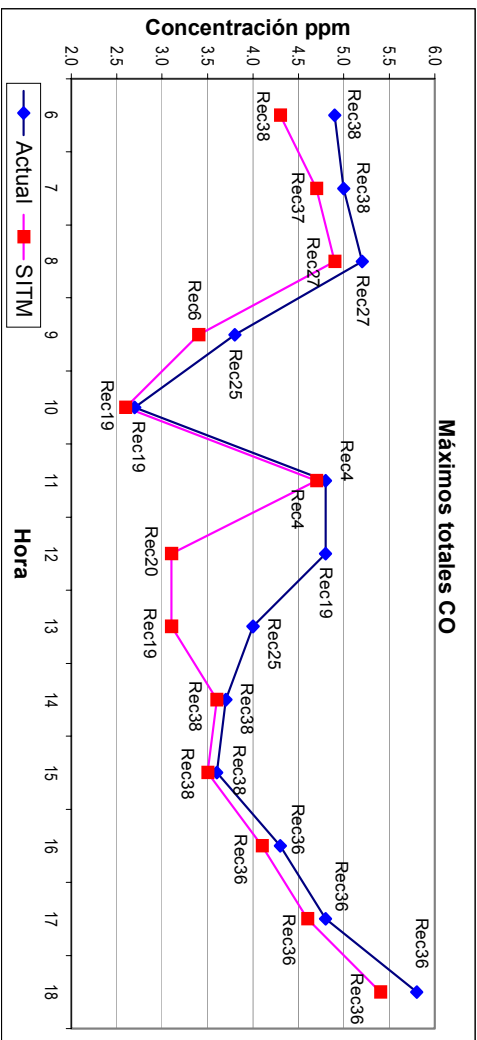


Figura 5-21: Variación de la concentración de contaminantes con la distancia perpendicular a la vía

Fuente: Autores

Máximos horarios de CO		
Toda la zona		
Hora	Actual	SITM
6	4.9	4.3
7	5.0	4.7
8	5.2	4.9
9	3.8	3.4
10	2.7	2.6
11	4.8	4.7
12	4.8	3.1
13	4.0	3.1
14	3.7	3.6
15	3.6	3.5
16	4.3	4.1
17	4.8	4.6
18	5.8	5.4



Máximos horarios de PM10		
Toda la zona		
Hora	Actual	SITM
6	66.0	54.0
7	68.0	56.0
8	80.0	56.0
9	70.0	52.0
10	66.0	49.0
11	72.0	58.0
12	65.0	50.0
13	71.0	51.0
14	64.0	52.0
15	65.0	52.0
16	73.0	54.0
17	79.0	55.0
18	81.0	56.0

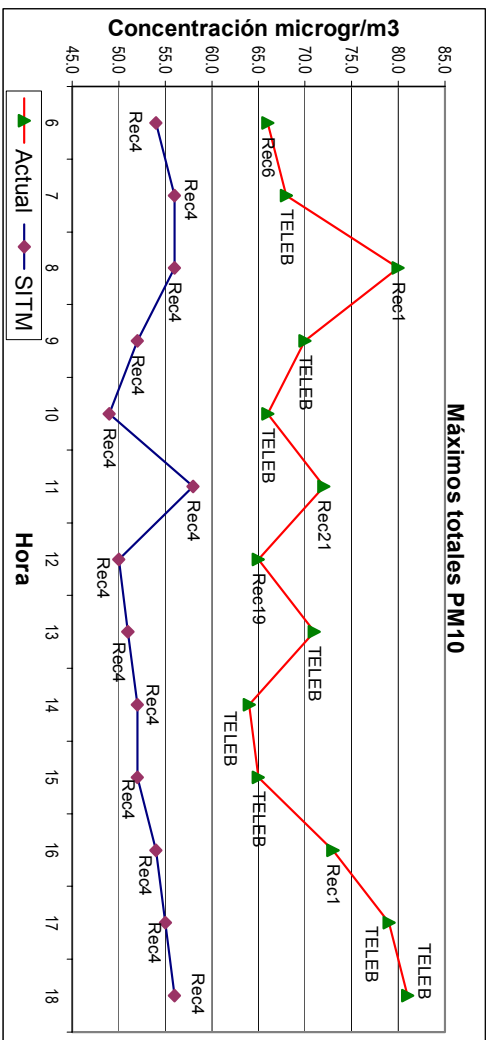


Figura 5-22: Valores máximos horarios de concentración en toda la zona de estudio

Fuente: Autores

#### 5.4.4. Análisis de las comparaciones entre la situación actual y el SITM

##### 5.4.4.1. Perfiles de concentración

Los perfiles de concentración permiten apreciar la evolución de la concentración, a medida que se recorre la Carrera 15 en dirección Norte a Sur. El análisis de éstas gráficas arroja varias lecturas, que son explicables a partir de las características de cada zona.

- Monóxido de Carbono (CO)

Para las horas de la mañana, se analizó el comportamiento de las concentraciones a las 8 AM. Esta hora se caracteriza por presentar elevados flujos vehiculares en la dirección S – N entre la calle 50 y la Puerta del Sol y en la dirección N - S entre el Bulevar Santander y la Calle 36.

En la gráfica se observa la presencia de tres picos en las ubicaciones 2, 8 y 10, las cuales corresponden a las intersecciones de la Avenida Quebrada Seca, la Calle 50 y la Calle 56, respectivamente. Como se explicó anteriormente, en estas intersecciones se presentan los mayores flujos a las 8 AM

Es importante observar el aumento de las concentraciones en las zonas que corresponden a las intersecciones, con respecto a las zonas de flujo libre. Esto se explica por la presencia de flujos vehiculares considerables en las direcciones E – W y W – E y por las emisiones en reposo causadas por las colas vehiculares formadas por los semáforos.

Además, en estas zonas los vehículos permanecen en promedio un tiempo mayor, lo que incrementa aún más estas concentraciones. En las zonas correspondientes a tramos de la Carrera 15 sin intersecciones<sup>127</sup> las concentraciones son menores por el continuo flujo de vehículos.

En el perfil del mediodía, se identifican diversos picos en todas las intersecciones, siendo el mayor el correspondiente al de la ubicación 6 (Calle 45). Esta zona es la más céntrica de la zona por lo que se vuelve el origen de la mayoría de viajes de personas de sus lugares de trabajo hasta sus hogares.

Los flujos vehiculares del mediodía son elevados pues muchas personas regresan a su hogar a esa hora para volver a su trabajo en las primeras horas de la tarde. Esta es una situación característica de las ciudades intermedias en las que el tiempo de viaje entre las zonas de residencia y trabajo son relativamente cortos. En ciudades de mayor tamaño las personas suelen hacer el descanso del mediodía en las cercanías de su lugar de trabajo, lo que hace desaparecer los picos de tráfico a las 12 M y 2 PM.

A las dos de la tarde, muchas personas regresan de sus hogares a sus lugares de trabajo y se vuelven a crear elevados picos de tráfico, en las mismas zonas en las que se producen por la mañana, aunque en menor volumen.

Para el final de la tarde, las personas regresan a sus hogares y se vuelven a presentar altos volúmenes vehiculares en toda la zona, con picos especialmente altos de contaminación en la Calle 50, Avenida Quebrada Seca y Calle 56.

---

<sup>127</sup> Realmente existen algunas intersecciones semaforizadas en éstos tramos con flujos mucho menores, pero no se consideraron en la modelación.

Las condiciones atmosféricas también influyen en los niveles de contaminación. En la mañana es común la presencia de una alta radiación solar y bajas velocidades del viento, lo que beneficia la dispersión vertical de los contaminantes, mientras que en las horas de la tarde la velocidad del viento se incrementa y disminuye la radiación solar, por lo que predomina la dispersión horizontal. En las últimas horas de la tarde, los cambios de temperatura pueden producir cortos periodos de inversión térmica que disminuyen el gradiente de dispersión de los gases.

Un aspecto muy importante es la estrecha relación que existe entre los niveles de emisión de CO con los volúmenes de vehículos a gasolina, principalmente automóviles livianos. Los bajos niveles de CO en la Calle 36 se explican por el gran flujo de buses que circulan en dirección N – S, en la cual existe una restricción para el flujo de automóviles. Los buses usan motores Diesel que emiten bajos niveles de CO y por lo tanto se considera que la emisión de CO es causada en un muy alto porcentaje por los vehículos de gasolina.

Por esta razón, los niveles de CO calculados para la flota actual disminuyen en una muy pequeña proporción al entrar en funcionamiento el SITM, pues con el SITM se reemplazan los buses por vehículos de mejores especificaciones técnicas, pero no se altera el flujo de vehículos livianos (al menos en la simulación que se realizó para este estudio).

Las disminuciones en la concentración de CO con el SITM se deben a las características tecnológicas de los nuevos buses, que disminuyen aún más las emisiones de CO producidas por los vehículos Diesel que circulan en la zona.

- Material Particulado (PM<sub>10</sub>)

Las concentraciones de material particulado se relacionan estrechamente con el flujo de buses de transporte público, pues estos son los vehículos de motores diesel que circulan en mayor proporción en la vía.

Al contrario del CO, los principales emisores de partículas son los motores diesel, mientras que los vehículos a gasolina emiten partículas en una menor proporción. Es por esta razón que las diferencias en la contaminación entre las condiciones actuales y con el SITM son mayores para el material particulado.

En las gráficas se puede apreciar que la concentración de contaminantes en la zona para las condiciones actuales es bastante pareja, con picos importantes a las 8 AM en la Avenida Quebrada Seca, a las 12 M en la Calle 45 y a las 6 PM en la Avenida Quebrada Seca y la Calle 36. Este comportamiento más o menos constante se explica por el continuo flujo de buses en la zona, que usualmente recorren en su totalidad la Carrera 15.

Los picos observados en la Avenida Quebrada Seca y la Calle 45 obedecen no solo al alto flujo de buses que circulan por la Carrera 15, sino también a la presencia de buses en las direcciones Este – Oeste y Oeste – Este que son considerados en la modelación.

En éstas gráficas se aprecia claramente la importante reducción en las concentraciones con el uso del SITM. La mayor disminución se observa a las 6PM entre las ubicaciones 1 y 7 (entre el Bulevar Santander y la Calle 50). A esta hora se observa un gran flujo de buses en dirección N – S, que supera la demanda de pasajeros en una gran proporción.

El SITM METROLÍNEA plantea una considerable disminución en el número de buses para hacerlos más acordes a la demanda real. Esta disminución en el tráfico de buses, se observa con la reducción de las concentraciones en todas las horas e intersecciones. Las zonas que presentan la mayor sobreoferta actual de transporte público son las que registran mayores disminuciones en la contaminación.

#### 5.4.4.2. Análisis de las intersecciones

El objetivo de estudiar la variación horaria de la concentración de contaminantes en cada una de las intersecciones, es determinar las horas picos de contaminación en las diferentes intersecciones. Ya se ha identificado que en estas zonas las concentraciones son mayores que en los tramos de flujo libre.

Para poder realizar este análisis, se promediaron las concentraciones horarias de los receptores más cercanos a cada intersección (ver Tabla 5-8). Se decidió promediar entre varios receptores, para evitar que la dirección del viento influyera en el valor obtenido. Si solo se analizara un receptor, su ubicación vientos abajo o vientos arriba de la fuente emisora sería determinante en la concentración.

- Monóxido de Carbono (CO)

Para la Avenida Quebrada Seca se observan tres picos de contaminación por CO, a las 7AM, 11AM y 6PM. Estas horas coinciden con los mayores flujos de tráfico que se presentan en la zona. La mayor concentración en las condiciones actuales es de 3.7ppm para las horas indicadas. Para el SITM los valores son muy similares.

Las magnitudes de concentración en la Calle 36 son inferiores a las demás intersecciones por las restricciones al tráfico liviano en el sentido N – S que ya se han explicado. Como en esta intersección una mayor proporción de las concentraciones es debida a los buses, la reducción en la concentración de CO por el SITM es más significativa.

La intersección de la Calle 45 presenta dos importantes picos de concentración al mediodía y a las seis de la tarde, con un valor máximo de 3.9ppm. Al mediodía las reducciones por funcionamiento del SITM son considerables, lo que indica una clara sobreoferta de transporte público en la zona.

En la intersección de la Calle 50 se observa una concentración promedio de 4.3ppm y 4.4ppm a las 8 AM y 6PM respectivamente. Estas altas concentraciones son causadas por el alto volumen de vehículos livianos que llegan a la intersección. Es significativo tener en cuenta que ésta intersección es un poco compleja, por cuanto reúne tres vías de importante tráfico y los ciclos de los semáforos son un poco más largos.

La intersección de la Calle 56 presenta también unos niveles elevados de concentración en las horas críticas de las 8 AM (4.3ppm) y las 6 PM (4.2ppm), por las mismas razones que la intersección de la Calle 50. Además esta intersección se vuelve un paso obligado de muchos autos provenientes de diferentes zonas de la ciudad, pues la configuración actual causa que la mayoría de las avenidas confluyan en la Puerta del Sol, en cercanías de ésta intersección.

En la Tabla 5-9 se puede observar el porcentaje de reducción de CO para cada una de las intersecciones.

Cra 15 con Av. Qseca					Cra 15 con Calle36					Cra 15 con Calle45				
Hora	Actual	SITM	Reducción	Reducción	Hora	Actual	SITM	Reducción	Reducción	Hora	Actual	SITM	Reducción	Reducción
			Directa	Aire				Directa	Aire				Directa	Aire
6	3.1	2.9	8.1%	6.1%	6	1.7	1.6	6.0%	3.7%	6	2.6	2.5	4.9%	3.5%
7	3.7	3.6	2.7%	2.1%	7	1.9	1.7	8.0%	5.2%	7	2.7	2.6	4.6%	3.4%
8	3.3	3.1	6.0%	4.6%	8	2.2	2.0	11.2%	7.8%	8	3.0	2.6	12.5%	9.4%
9	3.1	3.0	1.6%	1.2%	9	2.1	2.0	8.2%	5.6%	9	2.3	2.2	3.3%	2.3%
10	2.3	2.2	4.3%	3.0%	10	1.9	1.8	5.3%	3.4%	10	2.2	2.1	4.7%	3.2%
11	3.7	3.7	0.0%	0.0%	11	3.1	2.7	12.3%	9.3%	11	3.9	2.8	28.6%	22.7%
12	2.7	2.5	9.3%	6.8%	12	2.6	2.3	10.7%	7.7%	12	3.7	2.5	34.2%	27.0%
13	2.6	2.5	3.8%	2.8%	13	2.0	1.8	8.8%	5.8%	13	2.5	2.5	0.0%	0.0%
14	3.0	2.8	4.2%	3.2%	14	1.9	1.7	10.7%	7.0%	14	2.6	2.6	2.9%	2.1%
15	2.9	2.8	1.7%	1.3%	15	1.9	1.7	9.5%	6.1%	15	2.4	2.4	3.1%	2.2%
16	3.2	3.1	4.7%	3.6%	16	2.4	2.0	18.6%	13.1%	16	3.3	3.0	9.8%	7.6%
17	3.6	3.4	6.9%	5.4%	17	2.8	2.1	23.4%	17.2%	17	3.5	3.2	7.2%	5.6%
18	3.7	3.4	7.5%	5.9%	18	2.8	2.5	10.6%	7.8%	18	3.8	3.7	2.6%	2.1%

Cra 15 con Calle50					Cra 15 con Calle56				
Hora	Actual	SITM	Reducción	Reducción	Hora	Actual	SITM	Reducción	Reducción
			Directa	Aire				Directa	Aire
6	2.6	2.2	17.1%	12.4%	6	3.0	2.8	8.8%	6.6%
7	3.7	2.9	19.9%	15.6%	7	2.9	2.7	5.8%	4.3%
8	4.3	3.6	17.0%	13.7%	8	4.3	3.6	14.8%	12.0%
9	3.1	2.3	24.4%	18.4%	9	2.4	2.3	2.8%	2.0%
10	2.2	1.8	18.0%	12.4%	10	2.1	2.0	4.7%	3.2%
11	3.4	3.2	5.2%	4.0%	11	2.8	2.5	10.8%	8.0%
12	2.8	2.5	8.2%	6.0%	12	2.5	2.4	5.3%	3.8%
13	2.9	2.3	20.0%	14.8%	13	2.4	2.2	5.6%	4.0%
14	2.9	2.4	16.5%	12.3%	14	2.9	2.8	3.5%	2.6%
15	2.4	2.2	8.2%	5.8%	15	2.7	2.6	3.7%	2.7%
16	3.1	3.0	5.6%	4.2%	16	3.2	3.1	4.2%	3.2%
17	3.5	3.5	2.1%	1.7%	17	3.5	3.4	3.8%	3.0%
18	4.4	4.3	2.9%	2.3%	18	4.2	3.9	7.2%	5.8%

Tabla 5-9: Reducción del CO por el funcionamiento del SITM en las diferentes intersecciones

Fuente: Autores

- Material Particulado (PM<sub>10</sub>)

Al observar las gráficas de PM<sub>10</sub>, se observa que mantienen las mismas tendencias que las de CO, presentándose los picos de cada contaminante a las mismas horas. Esto ocurre debido a que los buses aumentan sus frecuencias de circulación en las horas picos, por lo que crece en igual proporción que los automóviles en las horas más críticas.

Otra característica para resaltar es que los valores de cada intersección para cada hora no varían mucho entre sí, lo que indica una presencia constante de buses en todas las intersecciones. Esto ocurre por la organización de las rutas en la ciudad, como se explicó anteriormente.

En las gráficas se puede apreciar claramente la drástica disminución de las concentraciones de PM<sub>10</sub> con el funcionamiento del SITM. La menor tasa de emisión de los nuevos buses y los menores volúmenes de circulación son los causantes de la disminución en la contaminación.

A continuación se presentan los porcentajes de disminución en los niveles de PM<sub>10</sub> por acción del SITM en cada intersección:

Cra 15 con Av. Qseca					Cra 15 con Calle36					Cra 15 con Calle45				
Hora	Actual	SITM	Reducción	Reducción	Hora	Actual	SITM	Reducción	Reducción	Hora	Actual	SITM	Reducción	Reducción
			Directa	Aire				Directa	Aire				Directa	Aire
6	56.5	49.3	63.0%	12.8%	6	53.8	45.8	91.4%	14.9%	6	52.5	46.8	76.7%	11.0%
7	57.0	50.8	52.1%	11.0%	7	56.0	46.0	90.9%	17.9%	7	52.5	47.0	73.3%	10.5%
8	59.8	49.8	67.8%	16.7%	8	58.0	46.5	88.5%	19.8%	8	54.8	47.3	76.9%	13.7%
9	53.3	49.3	48.5%	7.5%	9	55.8	45.8	93.0%	17.9%	9	50.8	46.8	69.6%	7.9%
10	52.3	47.8	62.1%	8.6%	10	54.5	46.0	89.5%	15.6%	10	49.5	46.5	66.7%	6.1%
11	62.5	51.0	65.7%	18.4%	11	64.5	46.5	92.3%	27.9%	11	62.0	47.3	86.8%	23.8%
12	56.8	47.8	76.6%	15.9%	12	57.8	46.0	92.2%	20.3%	12	61.0	46.5	90.6%	23.8%
13	52.8	48.3	58.1%	8.5%	13	56.3	46.0	91.1%	18.2%	13	52.0	47.0	71.4%	9.6%
14	53.5	48.8	55.9%	8.9%	14	54.0	45.8	91.7%	15.3%	14	52.3	47.0	72.4%	10.0%
15	53.5	48.8	55.9%	8.9%	15	54.5	45.8	92.1%	16.1%	15	51.5	46.3	80.8%	10.2%
16	60.8	49.3	73.0%	18.9%	16	61.8	46.0	94.0%	25.5%	16	58.5	47.0	85.2%	19.7%
17	65.0	49.8	76.3%	23.5%	17	70.0	46.5	94.0%	33.6%	17	60.8	47.5	84.1%	21.8%
18	64.5	50.0	74.4%	22.5%	18	68.0	46.8	92.4%	31.3%	18	62.5	48.3	81.4%	22.8%

Cra 15 con Calle50					Cra 15 con Calle56				
Hora	Actual	SITM	Reducción	Reducción	Hora	Actual	SITM	Reducción	Reducción
			Directa	Aire				Directa	Aire
6	51.0	47.0	66.7%	7.8%	6	50.3	46.3	75.0%	7.9%
7	54.8	47.8	71.8%	12.8%	7	49.7	46.7	64.3%	6.0%
8	55.8	49.3	60.5%	11.7%	8	54.3	47.3	75.0%	12.9%
9	52.3	47.0	72.4%	10.0%	9	49.0	46.3	66.7%	5.4%
10	49.3	46.3	70.6%	6.1%	10	48.7	46.3	63.6%	4.8%
11	51.8	49.5	33.3%	4.3%	11	50.7	46.3	76.5%	8.6%
12	50.8	47.3	60.9%	6.9%	12	49.7	46.0	78.6%	7.4%
13	51.8	46.8	74.1%	9.7%	13	48.7	46.3	63.6%	4.8%
14	51.5	47.0	69.2%	8.7%	14	50.7	46.7	70.6%	7.9%
15	50.5	46.5	72.7%	7.9%	15	50.0	46.3	73.3%	7.3%
16	52.0	48.0	57.1%	7.7%	16	52.3	47.0	72.7%	10.2%
17	53.5	50.0	41.2%	6.5%	17	53.3	47.3	72.0%	11.3%
18	55.8	50.3	51.2%	9.9%	18	55.3	48.0	71.0%	13.3%

Tabla 5-10: Reducción del PM<sub>10</sub> por el funcionamiento del SITM en las diferentes intersecciones

Fuente: Autores

#### 5.4.4.3. Distancia perpendicular de los receptores

La concentración de contaminantes va disminuyendo con la distancia en función de la concentración inicial, la velocidad del viento, el tipo de atmósfera y las características propias del contaminante.

Esta disminución suele ser mayor en los primeros metros y después va acercándose a una asíntota horizontal, que equivale al remanente de contaminación que se mantiene en el ambiente.

El comportamiento de todas las gráficas es muy similar y es importante resaltar en las gráficas de  $PM_{10}$  la importante disminución en la concentración ocurrida en los primeros metros para las condiciones actuales. Esto se explica por la deposición ocurrida a las partículas, que son transportadas a distancias menores en función de la velocidad de deposición.

#### 5.4.4.4. Niveles máximos de concentración

Las gráficas de máximos de concentración permiten apreciar el valor pico de concentración que se presenta en la zona de estudio para cada hora. Estos valores ocurren en diferentes receptores, según las condiciones de cada zona.

Para el CO, en la mañana, los picos absolutos de concentración ocurren en las intersecciones de la Calle 56 y la Calle 50 (Rec38 y Rec27), llegando hasta valores de 5.2ppm a las 8 AM. Estos valores corresponden a los altos niveles de tráfico en estas intersecciones para ese período

Al mediodía, los mayores niveles de CO son leídos en la Calle 45 (Rec19), con un valor máximo de 4.8ppm y a las 6 PM el pico ocurre en la intersección de la Calle 56 (Rec36) con el valor puntual más alto calculado para todo el estudio: 5.8ppm. Como ya se explicó en otros puntos, el comportamiento del tráfico en la ciudad se incrementa a esas horas en estas zonas.

Es importante tener en cuenta que la dirección del viento y las condiciones atmosféricas son determinantes para la obtención de estos valores. Si un receptor se encuentra vientos abajo de una gran fuente emisora, en condiciones de atmósfera estable, es muy probable que se eleven en gran proporción las concentraciones del punto.

En la Tabla 5-11 se puede observar el porcentaje de reducción de los picos de CO en toda la zona, para cada hora.

Máximos horarios de CO				
Hora	Actual	SITM	Reducción	Reducción
			Directa	Aire
6	4.9	4.3	12.2%	10.2%
7	5.0	4.7	6.0%	5.0%
8	5.2	4.9	5.8%	4.8%
9	3.8	3.4	10.5%	8.3%
10	2.7	2.6	3.7%	2.7%
11	4.8	4.7	2.1%	1.7%
12	4.8	3.1	35.4%	29.3%
13	4.0	3.1	22.5%	18.0%
14	3.7	3.6	2.7%	2.1%
15	3.6	3.5	2.8%	2.2%
16	4.3	4.1	4.7%	3.8%
17	4.8	4.6	4.2%	3.4%
18	5.8	5.4	6.9%	5.9%

Tabla 5-11: Reducción de los niveles máximos de CO por el funcionamiento del SITM

Fuente: Autores

Para el PM<sub>10</sub> se presenta una situación de máximos más estable, obtenidos usualmente en la estación TELEB, que corresponde a la ubicación de la Estación de Monitoreo en los meses de Abril a Junio de 2003. La estación está localizada en la intersección de la Calle 36 y su estratégica ubicación al lado del tramo dónde más buses circulan, le permite medir los picos de material particulado.

Para la situación en que funcione el SITM, la cantidad de buses circulante en la dirección N – S disminuye sustancialmente, por lo que los picos dejan de presentarse en la estación, para hacerlo en la misma intersección pero al otro lado de la calzada de la Carrera 15 (Rec4). A continuación se describen los porcentajes de disminución de picos de PM<sub>10</sub> por acción del SITM

Máximos horarios de PM10				
Hora	Actual	SITM	Reducción Directa	Reducción Aire
6	66.0	54.0	57.1%	18.2%
7	68.0	56.0	52.2%	17.6%
8	80.0	56.0	68.6%	30.0%
9	70.0	52.0	72.0%	25.7%
10	66.0	49.0	81.0%	25.8%
11	72.0	58.0	51.9%	19.4%
12	65.0	50.0	75.0%	23.1%
13	71.0	51.0	76.9%	28.2%
14	64.0	52.0	63.2%	18.8%
15	65.0	52.0	65.0%	20.0%
16	73.0	54.0	67.9%	26.0%
17	79.0	55.0	70.6%	30.4%
18	81.0	56.0	69.4%	30.9%

Tabla 5-12: Reducción de los niveles máximos de PM<sub>10</sub> por el funcionamiento del SITM

Fuente: Autores

#### 5.4.5. Comparación porcentual entre la situación actual y el SITM

En la Tabla 5-13 se describen los porcentajes de reducción de concentración para el CO para cada hora del día. En esta se expone el porcentaje de reducción máximo y promedio (para las estaciones más cercanas a la vía) con la implementación del SITM para cada hora del día.

En cada una de las tablas, se discriminan las disminuciones en las concentraciones entre “reducciones directas” y “reducciones en el aire”. Las reducciones directas no tienen en cuenta la concentración de fondo, por lo

tanto representan la disminución en la contaminación que se atribuye a la flota vehicular. La “reducción en el aire” expresa la disminución efectiva que se va a observar en el aire de la zona, por efecto del SITM. Para esta última situación se toma en cuenta la concentración de fondo o background.

En la Tabla 5-14, se realiza la misma descripción que para el CO, con los porcentajes de PM<sub>10</sub> en toda la zona.

Por último, en las Tablas 5-15 y 5-16, se exponen los valores de reducción máximo y promedio de contaminantes para cada una de las intersecciones, para las 13 horas modeladas. También se considera la reducción directa (sin background) y la del aire (con el background).

<b>NIVELES DE CO EN TODA LA ZONA (5 M)</b>					
<b>Hora</b>	<b>Máxima reducción directa</b>	<b>Promedio reducción directa</b>	<b>Máxima reducción aire</b>	<b>Promedio Reducción Aire</b>	<b>Zona máximo</b>
6	12.2%	19.1%	10.2%	10.9%	C56
7	6.0%	15.6%	5.0%	9.5%	C56
8	5.8%	18.0%	4.8%	12.1%	C50
9	10.5%	17.9%	8.3%	9.9%	Qseca
10	3.7%	15.6%	2.7%	7.2%	C45
11	2.1%	18.5%	1.7%	11.9%	Qseca
12	35.4%	23.1%	29.3%	13.5%	C45
13	22.5%	15.4%	18.0%	8.2%	C45
14	2.7%	15.1%	2.1%	8.6%	C56
15	2.8%	11.6%	2.2%	6.4%	C56
16	4.7%	12.2%	3.8%	7.8%	C56
17	4.2%	13.3%	3.4%	9.1%	C56
18	6.9%	8.7%	5.9%	6.2%	C56

Tabla 5-13: Reducción de los niveles máximos y promedios de CO para toda la zona

Fuente: Autores

<b>NIVELES DE PM10 EN TODA LA ZONA (5 M)</b>					
<b>Hora</b>	<b>Máxima reducción directa</b>	<b>Promedio reducción directa</b>	<b>Máxima reducción aire</b>	<b>Promedio Reducción Aire</b>	<b>Zona máximo</b>
6	57.1%	78.2%	18.2%	10.5%	Qseca
7	52.2%	74.3%	17.6%	10.8%	C36
8	68.6%	77.7%	30.0%	15.4%	Qseca
9	72.0%	77.8%	25.7%	9.8%	C36
10	81.0%	79.6%	25.8%	8.4%	C36
11	51.9%	79.9%	19.4%	16.5%	C45
12	75.0%	84.1%	23.1%	13.6%	C45
13	76.9%	78.6%	28.2%	9.7%	C36
14	63.2%	76.4%	18.8%	9.8%	C36
15	65.0%	79.8%	20.0%	10.1%	C36
16	67.9%	82.4%	26.0%	17.2%	Qseca
17	70.6%	82.7%	30.4%	21.1%	C36
18	69.4%	80.0%	30.9%	20.6%	C36

Tabla 5-14: Reducción de los niveles máximos y promedios de PM<sub>10</sub> para toda la zona

Fuente: Autores

<b>NIVELES DE CO EN CADA INTERSECCIÓN</b>					
<b>Intersección</b>	<b>Máxima reducción directa</b>	<b>Promedio reducción directa</b>	<b>Máxima reducción aire</b>	<b>Promedio Reducción Aire</b>	<b>Hora máximo</b>
Qseca	9.3%	4.7%	6.8%	3.5%	12:00 AM
C36	23.4%	11.0%	17.2%	7.7%	5:00 PM
C45	34.2%	9.1%	27.0%	7.0%	12:00 AM
C50	24.4%	12.7%	18.4%	9.5%	9:00 AM
C56	14.8%	6.2%	12.0%	4.7%	8:00 AM

Tabla 5-15: Reducción de los niveles máximos y promedios de CO para todas las horas

Fuente: Autores

<b>NIVELES DE PM10 EN CADA INTERSECCIÓN</b>					
<b>Intersección</b>	<b>Máxima reducción directa</b>	<b>Promedio reducción directa</b>	<b>Máxima reducción aire</b>	<b>Promedio Reducción Aire</b>	<b>Hora máximo</b>
Qseca	76.6%	63.8%	23.5%	14.0%	5:00 PM
C36	94.0%	91.8%	33.6%	21.1%	5:00 PM
C45	90.6%	78.1%	23.8%	14.7%	12:00 AM
C50	74.1%	61.7%	12.8%	8.5%	7:00 AM
C56	78.6%	71.0%	13.3%	8.3%	6:00 PM

Tabla 5-16: Reducción de los niveles máximos y promedios de PM<sub>10</sub> para todas las horas

Fuente: Autores

## CONCLUSIONES

- La implementación del SITM METROLÍNEA representa una reducción directa en las emisiones de CO en un 10% y en un 75% para PM<sub>10</sub> en comparación con las condiciones actuales
- Los principales emisores de CO son los vehículos livianos como los son los automóviles, camionetas, camperos y taxis. Por esta razón, la reducción en la emisión de esta contaminante con el funcionamiento del SITM no es muy representativa.
- Para el PM, los principales contribuyentes son los vehículos de transporte público colectivo como los buses y busetas. Razón por la cual, las reducciones estimadas de este contaminante con el SITM es de mayor magnitud, ya que esta flota es la directamente afectada por el nuevo sistema.
- En la zona de estudio se observan reducciones aproximadas de un 15% en la concentración de material particulado en el aire. La reducción directa, que es debida solamente a la flota circulante es cercana al 80%. Para el CO, los porcentajes de reducción son del 10% total en el aire, causadas por una disminución del 18% en la flota.
- Las zonas que registran los mayores niveles de concentración de CO son la intersección de la Calle 50 y la Calle 56, y las horas críticas son las 8:00 AM y las 6:00 PM. Para el PM<sub>10</sub> las zonas de mayor concentración son la Avenida Quebrada Seca y la Calle 36, y las horas críticas son las 11:00 AM y las 5:00 PM

- La máxima reducción de concentración de PM<sub>10</sub> por funcionamiento del SITM se produce en la Calle 36 (92% en promedio) mientras que para el CO la máxima reducción se registra en la Calle 50 (13% en promedio).
- La reducción observada en las emisiones y por lo tanto en las concentraciones, se fundamenta en que la oferta ofrecida por el nuevo sistema, está más acorde con la demanda de la zona, lo que se traduce en una disminución de los volúmenes vehiculares para la Carrera 15.
- Las dos principales causas en la disminución de emisiones y concentraciones, son la renovación tecnológica de la flota y la menor cantidad de vehículos de transporte público colectivo circulantes.
- Al comparar las dos alternativas planteadas entre ellas, se observa que las emisiones de la flota que usa Gas Natural, son mucho menores que las emisiones de la flota a Diesel, pero sin embargo al compararlas con las emisiones totales, la diferencia entre estas dos no es apreciable. La implementación del SITM con cualquiera de las alternativas hace que las emisiones de los otros tipos de vehículos pesen más en la contaminación total.
- Al comparar las concentraciones modeladas con los valores de la Estación Centro, se observa un ajuste satisfactorio para el monóxido de carbono, mientras que para el material particulado se conserva la tendencia, pero con diferente orden de magnitud. Esto se debe a que no se consideraron para el modelo el aporte de motocicletas y vías cercanas con altos volúmenes de buses.<sup>128</sup>

---

<sup>128</sup> Ver Capítulo 5. Análisis de resultados.

- Los modelos utilizados en la investigación son muy versátiles y permiten considerar las características propias de la zona y la flota vehicular, permitiendo simular las condiciones de diferentes escenarios.
- La metodología utilizada es aplicable en ciudades intermedias donde se realicen estudios similares de calidad del aire a pequeña escala. La precisión en los resultados, dependerá de la calidad de la información disponible
- Con la información obtenida en esta investigación es posible evaluar diferentes medidas de control de transporte para la zona. Por ejemplo, la implementación de un programa de pico y placa, que reduzca los volúmenes de vehículos en la ciudad.

## RECOMENDACIONES

- Desde el panorama ambiental, y en forma puntual para los contaminantes analizados, se recomienda la implementación del SITM METROLÍNEA, debido a que presenta una reducción en los niveles de contaminación de la zona.
- Al implementar el SITM, las medidas de control ambiental se deben enfocar al resto de vehículos, ya que las emisiones de este sistema representarían una pequeña parte del total.
- Para posteriores estudios de este tipo, se recomienda complementar la información necesaria para alimentar los modelos, con el fin de representar con mayor precisión las condiciones locales. Por ejemplo, realizar una fase de caracterización tecnológica de la flota vehicular en la que se exponga su estado real.
- En el momento de analizar la dispersión de los contaminantes, es indispensable conocer las condiciones micrometeorológicas de la zona, ya que estas determinan el comportamiento de los contaminantes a baja altura.
- Se recomienda realizar pruebas químicas de los combustibles, con el fin de obtener la composición real de cada uno.

- Utilizar el programa de inspección y mantenimiento local para obtener mayor información de los vehículos, como el kilometraje acumulado, los sistemas de control de emisiones, entre otros.
- Para estudios que dispongan de mayores recursos económicos, tecnológicos y humanos, se plantea la metodología propuesta en el Anexo A.
- La metodología propuesta es aplicable a programas de inventario de emisiones de fuentes móviles para ciudades enteras. Los inventarios de emisiones permiten conocer el estado actual de la flota y permiten evaluar a través del tiempo el efecto de los programas implementados para el control de emisiones.
- Es de gran utilidad para los estudios posteriores en la ciudad, adelantar el proceso de calibración de los diferentes modelos empleados. La importancia de tener un modelo calibrado, radica en poder analizar con mayor confiabilidad, diferentes escenarios y condiciones de operación que permitan evaluar diferentes estrategias de control de contaminación y tráfico.
- Integrar y automatizar los procesos de cálculo y salidas del modelo, con el fin de agilizar la obtención de resultados y tomar decisiones oportunas. El objetivo que se pretende, es concentrar los esfuerzos en la obtención de las variables de entrada y evitar el procesamiento manual de éstas, con lo que se reduce el error por causas humanas.
- Integrar en una plataforma SIG un modelo de calidad del aire que permita visualizar de forma fácil y amigable, los niveles de concentración de contaminantes en la zona.

- En futuros estudios en los que se estudie el material particulado, es conveniente incluir la flota de motocicletas, ya que estas son una de las principales fuentes de este contaminante. Para este fin, se sugiere levantar la mayor información posible referente a esta categoría de vehículos.
- La ubicación actual de la Estación de Monitoreo Centro en los alrededores de la Calle 36 es adecuada para la medición de los niveles máximos de  $PM_{10}$ , aunque sería interesante realizar mediciones en zonas aledañas a la Calle 50 y Carrera 17. Los resultados de la modelación indicaron altos niveles de CO en este cruce, y aunque no se llegó a niveles peligrosos, puede ocurrir que la concentración de otros contaminantes si lo sea.

## BIBLIOGRAFÍA

ALCALDÍA DE BUCARAMANGA. Información. [en línea] 2004.  
<http://www.bucaramanga.gov.co>

AMAYA, Manuel y MARTIN, Andrés. Evaluación de tres modelos de dispersión Gaussiana para la simulación de contaminación por monóxido de carbono en Bucaramanga. Bucaramanga. 1998

ARRIBAS-MONZON Federico y otros. Efectos de la contaminación atmosférica sobre la mortalidad diaria en la ciudad de Zaragoza. En: Salud Pública de México [en línea] Vol. 43 (no.4), 2001.  
[http://www.insp.mx/salud/43/434\\_3.pdf](http://www.insp.mx/salud/43/434_3.pdf)

ASOCIACIÓN DANESA DE LA INDUSTRIA EÓLICA. Emplazamiento [en línea] 2004. <http://www.windpower.org/es/core.htm>

BALLESTER DÍEZ Ferrán, y otros. Efectos de la contaminación atmosférica en la salud: una introducción. En: Revista Española de Salud Pública. [en línea]. Vol. 73 (no.2), 1999. <http://www.msc.es>

BARONE, G. y otros. Evaluation of the impact of emission reduction strategies in the Naple area. [en línea] Italia. 2001.  
[http://people.web.psi.ch/keller\\_j/kj.html](http://people.web.psi.ch/keller_j/kj.html)

BERENSON, Mark L. y LEVINE, David N. Estadística Básica en Administración. México: Prentice Hall, 1992 p. 344

CAL Y MAYOR, Rafael y CÁRDENAS, James. Ingeniería de Tránsito. México: Alfaomega, 2000.

CALTRANS Y UC DAVIS. User's Guide for CL4. [en línea] USA: CALTRANS y UC DAVIS, 1998. <http://aqp.engr.ucdavis.edu>

CDMB. Diagnóstico de la calidad del aire en Bucaramanga. Bucaramanga. 11/2003

CE - CERT. Comprehensive modal emissions model (CMEM) - User's Guide. [en línea]. USA: CE-CERT, 2000. <http://www.cert.ucr.edu>

CEPIS/OPS. Conceptos básicos sobre meteorología de la contaminación del aire. [en línea] <http://www.cepis.ops-oms.org>

CERC. Comparison of ADMS-Roads, CALINE4 and UK DMRB Model Predictions for Roads. [en línea]. Italia. 2001. <http://www.cerc.co.uk>

CLAPPIER Alain. Física de la Atmósfera. En: Modelación de la Calidad del Aire a Escala Urbana (25 – 29 sep. 2003: Bogotá): Memorias. Bogotá: UNIANDES, 2003

COOPER, C. David y ALLEY, F.C. Air Pollution Control. 2ª ed. USA: Waveland Press, 1994.

CORPLAN. Bucaramanga Tecnópolis - Estrategia de competitividad para el Área Metropolitana de Bucaramanga. [CD – ROM] Bucaramanga. 2002

DAMA. Cartilla Control de Emisión de Gases. Bogotá.

EEA. Ambient air quality, pollutant dispersion and transport models - Appendix A5 [en línea]. 1996. <http://reports.eea.eu.int/92-9167-028-6/en/page001.html>

ENVIRON International Corporation y Pollack Allison K. MOBILE6 Validation Studies. [en línea] San Diego (USA). 2003. <http://www.epa.gov>

ERG y RADIAN INTERNATIONAL. MOBILE5-MEXICO Documentation and User's Guide. [en línea]. México. 2000. <http://www.epa.gov>

GEOTÉCNICA. Transporte Masivo Para el Área Metropolitana de Bucaramanga. - Estudio para el Diseño Conceptual y Prediseño Técnico. – Tomo I. Bucaramanga. 2000.

GSSR, EPA y CE-CERT. International Vehicle Emission Model. (Brochure). [en línea] USA. 2003. <http://www.gssr.net/ive>.

HUNTER, L.J., JONSON, G.T. y WATSON, I.D. A Investigation of three dimensional characteristics of flow regimes within the urban canyon. (1992).

IAL-CAL. Información [en línea]. 2004. <http://www.cleanairnet.org/lac/>

JACOBSON, Mark Z. Fundamentals of Atmospheric Modeling. Stanford University. 2002.

KIM, J. y BAIK, J. Urban street canyons flow with bottom heating. (2001).

KUHNS Hampden y otros. Remote sensing of gaseous and particle emissions from onroad vehicles in Clark County, Nevada. [en línea]. 2002. <http://www.co.clark.nv.us>

LAZAR, Reinhold y EDER, Josef. Estudio sobre el clima urbano en Bucaramanga. Bucaramanga. 2001

LEWYCKYJ N. y otros. MIMOSA: the coupling of a road emission model with a traffic flow model. [en línea] Göteborg (Suecia). 2002. <http://www.validationworkshop.ivl.se>

MANZI, Verónica. Selección y aplicación de una metodología para la estimación de los factores de emisión de las fuentes móviles vehiculares de la ciudad de Bogotá. En: Modelación de la Calidad del Aire a Escala Urbana (25 – 29 ago. 2003: Bogotá): Memorias. Bogotá: UNIANDES, 2003

MARCANO, Jose E. Los Recursos naturales – La contaminación atmosférica. [en línea] 2003. <http://www.jmarcano.com/index.html>

NTZIACHRISTOS, Leonidas y SAMARAS, Zissis. COPERT III Computer programme to calculate emissions from road transport - User's manual (Version 2.1). [en línea] Copenhagen (Dinamarca): EEA, 2000. <http://vergina.eng.auth.gr>

OFFICE OF TRANSPORTATION LABORATORY. CALINE3 - A Versatile Dispersion Model for Predicting Air Pollutant Levels Near Highways and Arterial Streets. [en línea]. USA: EPA, 1979. <http://www.epa.gov>

OMS. Taller sobre contaminación atmosférica causada por vehículos automotores - Guía del instructor. [en línea] 1997. <http://www.ba.uca.edu.ar>

OPPELANDER, Joseph C. y VOX, Paul C. Manual de estudios de Ingeniería de Tránsito. México: Representaciones y Servicios de Ingeniería S.A, 1985. p. 98 - 110

OSSES Mauricio y otros. Modelo de emisión de contaminantes atmosféricos producidos por transporte urbano: el caso de Santiago de Chile. En: Ciencia Abierta [en línea]. Vol.15, 1997. <http://cabierta.uchile.cl>

OTAQ. Draft user's guide to PART5: a program for calculating particle emissions from motor vehicles. [en línea]. USA: EPA. 1995. <http://www.epa.gov>

OTAQ. User's Guide to Mobile 6.1 and Mobile 6.2. Mobile Source Emission Factor Model [en línea] USA: EPA. 2002. <http://www.epa.gov/otaq>

OTAQ. User's Guide to CAL3QHC Version 2.0. [en línea]. USA: EPA. 1995. <http://www.epa.gov>

PATEL Irfan. Sensitivity Analysis, Evaluation and Design of Graphical User Interface of CAL3QHC Road Intersection Model. [en línea]. USA. 2001. <http://www.utoledo.edu/~aprg/theses/theses.html>

PIMA COUNTY DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL QUALITY AIR INFO NOW WEB SITE. [en línea] Arizona. 2004. <http://www.airinfnow.com/index.asp>

RADIAN INTERNACIONAL LLC. Mexico emissions inventory program manuals. [en línea] Mexico: 1997. <http://www.ine.gob.mx>

RIAIN, C.M.N., FISHER, B., MARTIN, C.J. y LITTLER, J. Flow field and pollutand dispersion in a central London street. (1998).

SAIP Ltda. Estudio de complementación y actualización del diseño operacional del sistema integrado de transporte masivo de Bucaramanga. Bogotá. 2004

SANTA CRUZ, Alejandro. Difusión de contaminantes en la atmósfera. [en línea] Rosario (Argentina). 2000. <http://www.modeloingenieria.edu.ar>.

SIEMENS. Actualización, implementación y puesta en funcionamiento del planeamiento de tráfico en función del tiempo y del tráfico para la ciudad de Bucaramanga. Bucaramanga. 2002. Código: INFBU0301.301

SINI, J., ANQUETIN, S. y MESTAYER, P.G. Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons. (1996).

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Highway Capacity Manual. Washington (USA): Library of Congress, 1985.

UNFCCC. Protocol of Kyoto. [en línea]. 2003. <http://unfccc.int>

UNIVERSITY OF CALIFORNIA AT RIVERSIDE y GSSR. IVE Model User's Manual Version 1.0.3. [en línea] USA. 2003. <http://www.gssr.net/ive>

UNIVERSITY OF CALIFORNIA AT RIVERSIDE y GSSR. Pune Vehicle Activity Study. [en línea] USA. 2003. <http://www.gssr.net/ive>

VARDOULAKIS, S., GONZÁLEZ-FLESCA, N. y FISHER, B.E.A. Assessment of traffic-related air pollution in two Street canyons in Paris: implication for exposure studies. (2002)

WARK, Kenneth y WARNER, Cecil. Contaminación del aire origen y control. México: Limusa, 2002.

WINTROBE, Maxwell y otros. Harrison: Medicina Interna. Tomo II. 4ª. ed. México: Mc. Graw – Hill, 1973. p. 1493 – 1496

WORLD RESOURCES INSTITUTE. World Resorces 2002 – 2004. [en línea]. Washington. 2003. <http://www.wri.org>

YU MENG. A New Statistical Framework for Estimating Carbon Monoxide Impacts at Intersections. [en línea]. USA: University of California Davis, 1998. <http://aqp.engr.ucdavis.edu>

ZARATE, Erika. Modelación de la calidad del aire para Bogotá. En: Modelación de la Calidad del Aire a Escala Urbana (25 – 29 sep. 2003: Bogotá): Memorias. Bogotá: UNIANDES, 2003

## ANEXO A METODOLOGÍA PROPUESTA

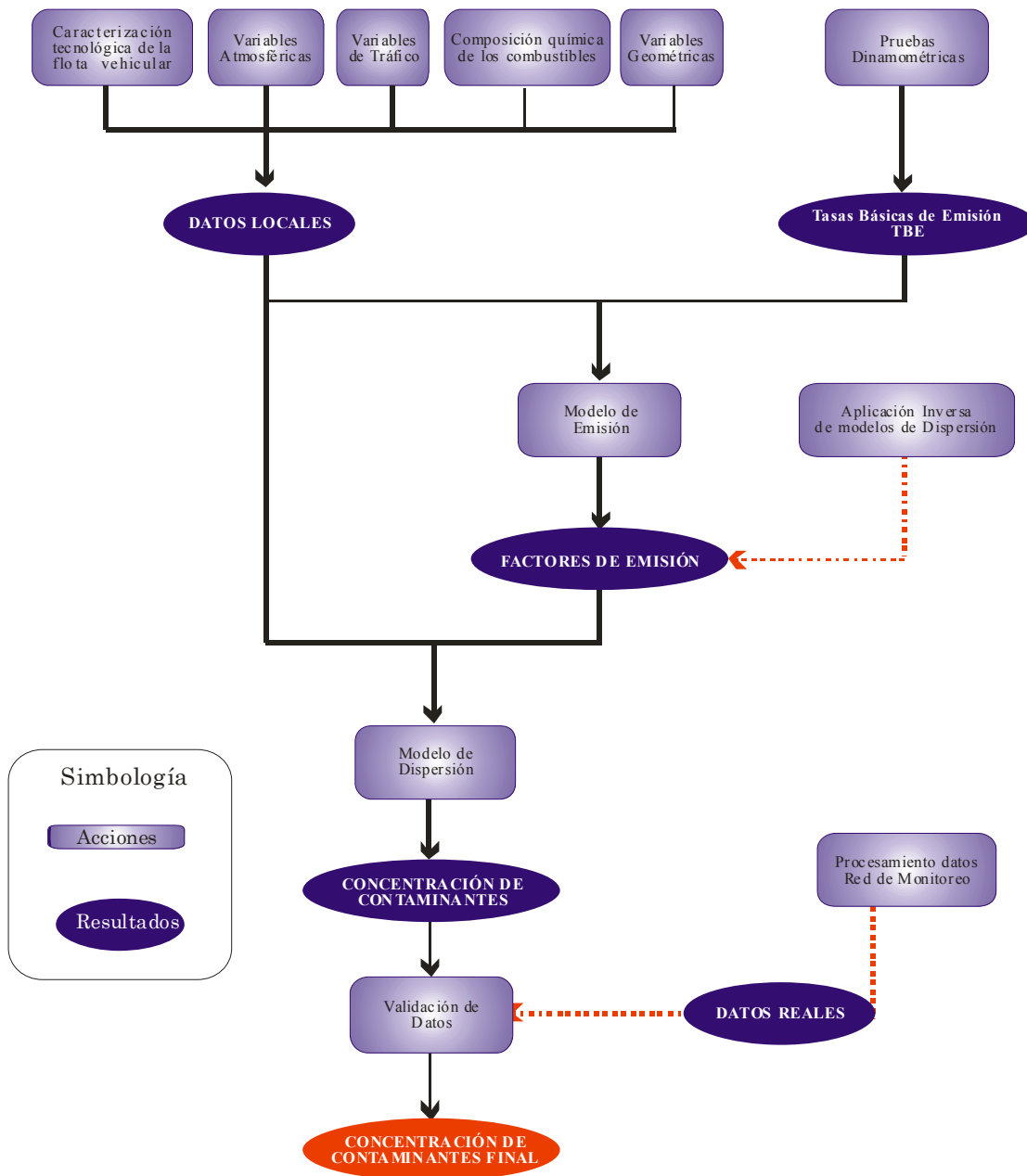


Figura A1 Diagrama para la metodología propuesta

Fuente: Autores

**ANEXO B**  
**RESUMEN ESTUDIOS DE VELOCIDAD**

Sentido	Hora	Calle 36		Calle 45		Calle 50		Calle 56		Quebrada Seca	
		Vr	Vm	Vr	Vm	Vr	Vm	Vr	Vm	Vr	Vm
E-W	6	25.3	25.3	46.3	46.3	7.2	27.5	36.7	36.7	14.8	39.1
	7	16.9	25.6	34.6	34.6	10.3	26.2	15.2	26.6	14.5	38.1
	8	10.6	19.4	33.0	33.0	8.4	23.5	12.4	23.8	13.9	31.9
	9	18.2	21.9	14.8	38.8	15.1	23.9	8.9	21.5	14.0	34.4
	10	14.3	24.0	27.6	27.6	9.1	30.1	9.5	27.2	12.3	21.9
	11	13.3	21.9	29.9	29.9	11.3	25.4	8.6	26.0	9.5	30.1
	12	11.1	22.9	31.2	33.0	8.7	24.7	7.9	19.6	12.1	27.0
	13	19.8	26.5	31.9	36.3	10.3	29.4	22.2	28.1	20.2	34.7
	14	11.2	22.1	11.6	19.6	9.0	24.6	14.0	23.3	14.1	29.3
	15	7.4	20.5	13.2	25.2	8.2	29.4	9.8	26.0	13.9	30.1
	16	15.4	22.9	10.0	17.5	10.9	19.5	13.6	20.7	14.3	29.5
	17	5.2	18.7	27.2	27.2	9.8	21.8	7.0	14.7	17.2	26.6
18	16.2	24.4	17.9	24.0	8.9	19.6	5.0	14.0	30.4	30.4	
W-E	6	49.3	49.3	15.9	35.0	12.3	24.3	25.0	25.0	18.8	30.8
	7	33.0	33.0	16.2	34.2	11.2	23.2	26.7	26.7	26.0	30.8
	8	15.8	34.0	16.5	31.3	9.7	27.5	30.7	30.7	14.1	31.8
	9	13.7	25.9	17.1	34.2	10.4	31.3	29.7	29.7	13.6	26.8
	10	12.6	24.0	16.3	29.9	10.8	38.1	24.0	24.0	14.5	32.1
	11	6.6	18.9	15.8	30.5	6.9	20.3	27.9	27.9	9.0	26.8
	12	8.2	18.0	13.2	27.3	12.9	34.4	33.3	33.3	23.2	26.1
	13	27.4	32.8	18.6	39.2	18.3	26.2	29.1	29.1	19.1	29.1
	14	14.5	25.3	16.0	27.4	11.4	26.8	25.5	25.5	17.5	29.3
	15	7.3	20.5	14.8	28.7	11.4	30.7	26.0	26.0	18.1	29.5
	16	9.5	18.2	8.0	20.5	11.5	30.1	23.5	23.5	13.1	29.5
	17	8.7	18.9	10.7	23.2	9.1	26.2	24.3	24.3	16.5	29.0
18	10.1	18.4	13.8	24.2	16.0	29.5	21.2	21.2	20.0	29.2	
N-S	6	19.8	37.4	24.1	43.3	16.3	23.6	27.2	34.3	25.3	41.3
	7	21.4	38.2	27.9	51.8	25.8	30.6	25.5	34.4	30.1	36.1
	8	18.2	31.3	25.4	48.8	29.0	33.4	22.3	33.8	15.4	27.1
	9	14.4	29.1	23.9	42.6	17.5	30.9	22.5	31.1	23.4	30.0
	10	7.8	19.9	17.6	37.8	11.9	25.6	21.7	30.9	18.0	32.4
	11	6.8	22.9	20.5	35.3	17.0	30.1	34.9	36.2	15.2	29.6
	12	7.5	16.8	20.3	35.7	12.7	24.4	33.7	33.7	14.3	25.9
	13	14.6	30.0	24.9	42.8	29.8	33.8	27.1	35.6	34.4	34.4
	14	13.8	21.5	19.3	33.8	17.8	27.6	24.1	29.3	18.1	33.2
	15	9.2	21.8	21.2	40.8	16.0	21.9	22.7	29.0	16.9	28.1
	16	9.2	21.8	21.2	40.8	16.0	21.9	22.7	29.0	16.9	28.1
	17	4.0	16.5	9.6	23.8	15.4	21.5	33.7	33.7	9.8	25.3
18	5.9	25.1	6.3	23.4	7.9	16.2	14.8	25.2	21.2	26.3	
S-N	6	30.8	30.8	22.5	34.4	37.9	39.5	27.2	34.3	25.3	41.3
	7	23.7	30.9	24.1	37.4	27.8	36.8	25.5	34.4	30.1	36.1
	8	17.4	26.6	26.0	39.3	27.9	32.1	22.3	33.8	15.4	27.1
	9	14.5	25.7	29.4	39.4	38.7	38.7	22.5	31.1	23.4	30.0
	10	13.9	28.1	29.9	42.4	28.7	41.3	21.7	30.9	18.0	32.4
	11	15.2	26.4	23.4	30.9	30.8	37.4	34.9	36.2	15.2	29.6
	12	16.6	28.7	22.9	30.1	25.8	40.1	33.7	33.7	14.3	25.9
	13	14.4	26.4	19.1	38.7	34.2	37.7	27.1	35.6	34.4	34.4
	14	8.4	22.5	29.6	35.0	38.0	38.0	24.1	29.3	18.1	33.2
	15	11.2	20.2	25.3	36.0	24.8	30.1	22.7	29.0	16.9	28.1
	16	11.2	20.2	25.3	36.0	24.8	30.1	22.7	29.0	16.9	28.1
	17	13.4	26.1	17.8	28.7	32.8	41.7	33.7	33.7	9.8	25.3
18	12.3	28.6	16.9	25.5	29.6	40.3	14.8	25.2	21.2	26.3	

Tabla B1 Resumen Velocidad (kph) de los Vehículos Ligeros (Autos, Taxis, Camperos y Camionetas)

Fuente: Autores

Sentido	Hora	Calle 36		Calle 45		Calle 50		Calle 56		Quebrada Seca	
		Vr	Vm	Vr	Vm	Vr	Vm	Vr	Vm	Vr	Vm
N-S	6	14.4	26.1	18.5	26.4	12.0	21.2	19.5	22.5	18.4	20.2
	7	13.8	19.2	19.1	28.0	19.6	23.0	23.0	23.5	18.4	25.8
	8	11.8	21.4	19.6	28.9	19.2	24.4	21.3	25.2	17.4	24.5
	9	8.8	17.2	19.9	29.2	23.6	23.6	24.7	24.7	16.9	25.3
	10	9.8	19.4	19.2	25.9	13.5	18.3	20.5	25.4	13.7	23.5
	11	5.5	14.2	9.9	24.1	18.3	24.0	19.8	19.8	11.7	17.4
	12	6.4	18.7	11.4	28.8	10.0	18.2	29.5	29.5	14.0	28.6
	13	8.8	18.1	15.5	25.5	16.1	26.4	22.8	28.0	15.0	19.7
	14	7.3	18.6	12.8	25.9	21.3	25.0	22.4	23.8	19.1	29.4
	15	7.3	18.6	12.8	25.9	21.3	25.0	22.4	23.8	19.1	29.4
S-N	6	13.9	20.9	21.9	30.6	29.3	32.3	19.5	22.5	18.4	20.2
	7	12.8	20.2	20.0	32.9	18.8	27.8	23.0	23.5	18.4	25.8
	8	14.1	21.6	19.7	28.8	21.3	27.0	21.3	25.2	17.4	24.5
	9	13.9	22.8	18.7	30.1	16.7	27.8	24.7	24.7	16.9	25.3
	10	12.9	19.9	14.7	26.6	31.9	31.9	20.5	25.4	13.7	23.5
	11	4.2	15.9	39.3	39.3	33.3	33.3	19.8	19.8	11.7	17.4
	12	11.6	21.7	16.4	25.2	22.5	29.3	29.5	29.5	14.0	28.6
	13	10.4	18.1	33.7	36.6	15.8	31.5	22.8	28.0	15.0	19.7
	14	5.9	13.4	18.5	31.9	20.0	27.7	22.4	23.8	19.1	29.4
	15	5.9	13.4	18.5	31.9	20.0	27.7	22.4	23.8	19.1	29.4
16	6.9	15.4	15.8	33.8	26.1	26.1	17.3	28.5	17.4	24.4	
17	4.1	11.4	12.1	23.2	28.5	28.5	28.5	28.5	14.0	25.9	
18	5.6	14.7	20.7	29.6	24.5	31.1	32.2	32.2	13.2	24.6	

Tabla B2 Resumen Velocidad (kph) de los Vehículos Pesados (Buses, Busetas y Camiones)

Fuente: Autores

**ANEXO C**  
**FACTORES DE EMISIÓN**

**Vehículos en Movimiento (gr/mi), Condiciones SITM**

Sentido	Hora	Calle 36		Calle 45		Calle 50		Calle 56		Quebrada Seca	
		CO	PM	CO	PM	CO	PM	CO	PM	CO	PM
E-W	6	43.54	0.02	26.18	0.02	42.50	0.05	30.59	0.05	26.30	0.05
	7	41.30	0.02	32.90	0.03	37.73	0.04	41.87	0.06	28.53	0.06
	8	56.11	0.03	36.78	0.03	42.09	0.05	39.30	0.06	33.15	0.06
	9	49.58	0.03	31.67	0.03	41.64	0.05	43.81	0.07	31.39	0.06
	10	45.63	0.02	45.95	0.04	38.70	0.04	40.20	0.06	40.76	0.09
	11	49.45	0.03	40.51	0.03	39.79	0.05	36.09	0.06	35.74	0.07
	12	47.52	0.02	37.65	0.03	40.55	0.05	48.48	0.08	39.51	0.08
	13	41.14	0.02	33.95	0.03	40.15	0.04	40.28	0.06	29.36	0.06
	14	49.59	0.03	53.60	0.05	40.97	0.05	40.89	0.07	35.46	0.07
	15	52.91	0.03	42.07	0.04	40.69	0.04	36.66	0.06	34.64	0.07
	16	47.13	0.02	59.08	0.05	52.20	0.06	45.12	0.07	36.30	0.07
	17	58.80	0.03	45.67	0.04	47.23	0.05	64.77	0.11	39.20	0.08
18	45.12	0.02	43.34	0.04	53.08	0.06	69.29	0.11	34.52	0.07	
W-E	6	24.37	0.01	32.55	0.04	34.97	0.07	41.87	0.03	36.03	0.06
	7	39.78	0.02	32.99	0.04	38.60	0.08	46.71	0.03	35.27	0.06
	8	37.92	0.02	37.07	0.05	39.77	0.07	40.99	0.03	33.95	0.06
	9	42.40	0.02	33.55	0.04	34.59	0.06	41.65	0.03	41.26	0.07
	10	44.87	0.02	38.85	0.05	28.28	0.05	43.89	0.03	34.19	0.06
	11	57.56	0.03	38.01	0.05	44.77	0.09	45.24	0.03	41.63	0.07
	12	60.82	0.03	42.11	0.05	31.62	0.06	38.10	0.03	36.71	0.07
	13	39.91	0.02	28.77	0.04	34.19	0.07	43.28	0.03	36.48	0.06
	14	42.68	0.02	42.17	0.05	39.58	0.07	41.65	0.03	37.41	0.06
	15	52.09	0.03	40.12	0.05	34.97	0.06	40.84	0.03	37.05	0.06
	16	60.02	0.03	48.10	0.07	35.90	0.06	44.76	0.03	37.88	0.06
	17	57.95	0.03	42.75	0.06	34.47	0.07	42.96	0.03	38.01	0.06
18	59.17	0.03	41.08	0.06	37.05	0.07	50.34	0.04	38.61	0.06	
N-S	6	6.28	0.25	20.44	0.12	28.00	0.11	27.36	0.11	17.79	0.17
	7	8.55	0.35	18.06	0.10	29.81	0.11	27.10	0.11	18.85	0.16
	8	7.67	0.31	18.12	0.10	28.02	0.10	27.02	0.11	18.69	0.17
	9	9.54	0.39	18.41	0.11	30.26	0.11	28.76	0.12	21.20	0.18
	10	8.44	0.34	21.28	0.12	31.47	0.13	28.72	0.12	21.48	0.18
	11	11.56	0.47	23.67	0.14	30.82	0.11	28.45	0.12	22.47	0.21
	12	8.78	0.36	21.50	0.12	33.75	0.14	27.02	0.11	20.60	0.18
	13	9.03	0.37	21.16	0.12	28.23	0.10	25.34	0.10	19.48	0.18
	14	8.80	0.36	24.24	0.14	33.36	0.12	30.43	0.12	18.57	0.16
	15	8.79	0.36	21.67	0.13	31.95	0.13	30.86	0.13	20.04	0.17
	16	10.91	0.44	25.49	0.15	38.02	0.15	29.05	0.12	19.39	0.18
	17	16.96	0.69	30.35	0.19	34.13	0.14	26.95	0.11	19.68	0.18
18	8.95	0.36	24.76	0.16	42.53	0.17	30.91	0.13	19.72	0.18	
S-N	6	24.55	0.13	21.14	0.12	22.99	0.07	30.63	0.09	23.63	0.13
	7	24.93	0.14	19.75	0.11	27.05	0.09	30.78	0.09	23.71	0.13
	8	26.66	0.14	21.46	0.12	29.92	0.09	30.79	0.09	24.07	0.15
	9	27.11	0.15	20.90	0.11	26.18	0.08	32.60	0.09	25.94	0.15
	10	26.83	0.15	21.04	0.12	23.82	0.08	31.75	0.09	25.84	0.15
	11	30.34	0.17	21.18	0.12	25.39	0.08	30.32	0.09	25.99	0.16
	12	25.46	0.14	26.75	0.15	24.90	0.08	28.27	0.08	24.80	0.14
	13	28.58	0.16	20.13	0.11	25.14	0.08	28.18	0.08	26.62	0.15
	14	35.05	0.19	20.71	0.11	26.27	0.08	34.81	0.10	22.28	0.13
	15	37.59	0.20	20.82	0.11	31.43	0.10	34.47	0.10	24.81	0.14
	16	35.85	0.20	20.33	0.11	32.59	0.10	33.11	0.10	23.10	0.14
	17	33.92	0.18	23.84	0.14	24.76	0.08	29.36	0.09	23.22	0.14
18	29.58	0.16	25.76	0.14	25.22	0.08	33.56	0.10	23.23	0.14	

Tabla C1 FE Vehículos en Movimiento (gr/mi), Condiciones Actuales

Fuente: Autores

### Vehículos en Movimiento (gr/mi), Condiciones SITM

Sentido	Hora	Calle 36		Calle 45		Calle 50		Calle 56		Quebrada Seca	
		CO	PM	CO	PM	CO	PM	CO	PM	CO	PM
E-W	6	43.54	0.02	26.18	0.02	42.50	0.05	30.59	0.05	26.30	0.05
	7	41.30	0.02	32.90	0.03	37.73	0.04	41.87	0.06	28.53	0.06
	8	56.11	0.03	36.78	0.03	42.09	0.05	39.30	0.06	33.15	0.06
	9	49.58	0.03	31.67	0.03	41.64	0.05	43.81	0.07	31.39	0.06
	10	45.63	0.02	45.95	0.04	38.70	0.04	40.20	0.06	40.76	0.09
	11	49.45	0.03	40.51	0.03	39.79	0.05	36.09	0.06	35.74	0.07
	12	47.52	0.02	37.65	0.03	40.55	0.05	48.48	0.08	39.51	0.08
	13	41.14	0.02	33.95	0.03	40.15	0.04	40.28	0.06	29.36	0.06
	14	49.59	0.03	53.60	0.05	40.97	0.05	40.89	0.07	35.46	0.07
	15	52.91	0.03	42.07	0.04	40.69	0.04	36.66	0.06	34.64	0.07
	16	47.13	0.02	59.08	0.05	52.20	0.06	45.12	0.07	36.30	0.07
17	58.80	0.03	45.67	0.04	47.23	0.05	64.77	0.11	39.20	0.08	
18	45.12	0.02	43.34	0.04	53.08	0.06	69.29	0.11	34.52	0.07	
W-E	6	24.37	0.01	32.55	0.04	34.97	0.07	41.87	0.03	36.03	0.06
	7	39.78	0.02	32.99	0.04	38.60	0.08	46.71	0.03	35.27	0.06
	8	37.92	0.02	37.07	0.05	39.77	0.07	40.99	0.03	33.95	0.06
	9	42.40	0.02	33.55	0.04	34.59	0.06	41.65	0.03	41.26	0.07
	10	44.87	0.02	38.85	0.05	28.28	0.05	43.89	0.03	34.19	0.06
	11	57.56	0.03	38.01	0.05	44.77	0.09	45.24	0.03	41.63	0.07
	12	60.82	0.03	42.11	0.05	31.62	0.06	38.10	0.03	36.71	0.07
	13	39.91	0.02	28.77	0.04	34.19	0.07	43.28	0.03	36.48	0.06
	14	42.68	0.02	42.17	0.05	39.58	0.07	41.65	0.03	37.41	0.06
	15	52.09	0.03	40.12	0.05	34.97	0.06	40.84	0.03	37.05	0.06
	16	60.02	0.03	48.10	0.07	35.90	0.06	44.76	0.03	37.88	0.06
17	57.95	0.03	42.75	0.06	34.47	0.07	42.96	0.03	38.01	0.06	
18	59.17	0.03	41.08	0.06	37.05	0.07	50.34	0.04	38.61	0.06	
N-S	6	10.70	0.05	27.94	0.02	39.04	0.03	34.77	0.03	27.64	0.04
	7	10.84	0.05	24.10	0.02	39.41	0.03	34.86	0.03	30.24	0.04
	8	10.82	0.05	25.33	0.02	36.70	0.03	35.67	0.03	32.04	0.05
	9	10.91	0.05	28.16	0.02	39.50	0.03	38.37	0.03	35.34	0.05
	10	10.85	0.05	31.04	0.02	39.15	0.03	37.80	0.03	33.31	0.04
	11	11.08	0.05	33.25	0.02	39.83	0.03	33.72	0.03	35.73	0.05
	12	10.86	0.05	31.91	0.02	41.23	0.03	35.61	0.03	31.95	0.05
	13	11.02	0.05	28.45	0.02	36.68	0.03	33.81	0.03	31.70	0.04
	14	10.90	0.05	35.72	0.02	45.41	0.03	40.90	0.03	32.62	0.04
	15	10.93	0.05	29.87	0.02	46.40	0.03	41.00	0.03	36.63	0.05
	16	10.98	0.05	30.00	0.02	46.57	0.03	40.41	0.03	37.37	0.05
17	11.03	0.05	40.07	0.03	46.41	0.03	35.65	0.03	33.59	0.05	
18	10.90	0.05	38.58	0.03	58.02	0.04	37.71	0.03	31.11	0.05	
S-N	6	37.83	0.02	33.46	0.02	31.79	0.02	36.13	0.03	29.76	0.02
	7	37.78	0.02	31.39	0.02	34.15	0.02	36.22	0.03	33.65	0.02
	8	36.47	0.02	30.84	0.02	38.94	0.02	36.76	0.03	43.12	0.03
	9	38.55	0.03	30.69	0.02	32.65	0.02	39.61	0.03	39.71	0.03
	10	42.35	0.03	28.74	0.02	30.62	0.02	39.33	0.03	36.99	0.03
	11	38.11	0.03	38.49	0.03	33.74	0.02	34.50	0.02	40.43	0.03
	12	40.97	0.03	39.12	0.03	31.23	0.02	36.24	0.03	36.71	0.03
	13	36.78	0.02	30.58	0.02	32.65	0.02	34.60	0.02	35.04	0.03
	14	42.25	0.03	33.60	0.02	32.71	0.02	42.03	0.03	35.69	0.03
	15	45.75	0.03	32.96	0.02	40.73	0.02	41.88	0.03	41.40	0.03
	16	47.03	0.03	32.75	0.02	41.37	0.02	42.28	0.03	41.06	0.03
17	37.12	0.02	39.71	0.03	30.26	0.02	36.43	0.03	37.73	0.03	
18	40.67	0.03	36.40	0.03	31.20	0.02	39.78	0.03	35.76	0.03	

Tabla C2 FE Vehículos en Movimiento (gr/mi), Condiciones SITM

Fuente: Autores

### Vehículos en Reposo (gr/min), Condiciones Actuales

Sentido	Hora	Calle 36		Calle 45		Calle 50		Calle 56		Quebrada Seca	
		CO	PM	CO	PM	CO	PM	CO	PM	CO	PM
E-W	6	5.65	0.004	5.59	0.007	5.56	0.009	5.43	0.012	5.37	0.016
	7	5.65	0.004	5.59	0.007	5.56	0.009	5.43	0.012	5.37	0.016
	8	5.65	0.004	5.59	0.007	5.56	0.009	5.43	0.012	5.37	0.016
	9	5.65	0.004	5.59	0.007	5.56	0.009	5.43	0.012	5.37	0.016
	10	5.63	0.004	5.58	0.007	5.54	0.009	5.41	0.012	5.35	0.016
	11	5.63	0.004	5.58	0.007	5.54	0.009	5.41	0.012	5.35	0.016
	12	5.63	0.004	5.58	0.007	5.54	0.009	5.41	0.012	5.35	0.016
	13	5.63	0.004	5.58	0.007	5.54	0.009	5.41	0.012	5.35	0.016
	14	5.63	0.004	5.58	0.007	5.54	0.009	5.41	0.012	5.35	0.016
	15	5.63	0.004	5.58	0.007	5.54	0.009	5.41	0.012	5.35	0.016
	16	5.63	0.004	5.58	0.007	5.54	0.009	5.41	0.012	5.35	0.016
17	5.63	0.004	5.58	0.007	5.54	0.009	5.41	0.012	5.35	0.016	
18	5.65	0.004	5.59	0.007	5.56	0.009	5.43	0.012	5.37	0.016	
W-E	6	5.66	0.004	5.48	0.011	5.34	0.015	5.62	0.006	5.46	0.014
	7	5.66	0.004	5.48	0.011	5.34	0.015	5.62	0.006	5.46	0.014
	8	5.66	0.004	5.48	0.011	5.34	0.015	5.62	0.006	5.46	0.014
	9	5.66	0.004	5.48	0.011	5.34	0.015	5.62	0.006	5.46	0.014
	10	5.64	0.004	5.47	0.011	5.32	0.015	5.61	0.006	5.44	0.014
	11	5.64	0.004	5.47	0.011	5.32	0.015	5.61	0.006	5.44	0.014
	12	5.64	0.004	5.47	0.011	5.32	0.015	5.61	0.006	5.44	0.014
	13	5.64	0.004	5.47	0.011	5.32	0.015	5.61	0.006	5.44	0.014
	14	5.64	0.004	5.47	0.011	5.32	0.015	5.61	0.006	5.44	0.014
	15	5.64	0.004	5.47	0.011	5.32	0.015	5.61	0.006	5.44	0.014
	16	5.64	0.004	5.47	0.011	5.32	0.015	5.61	0.006	5.44	0.014
17	5.64	0.004	5.47	0.011	5.32	0.015	5.61	0.006	5.44	0.014	
18	5.66	0.004	5.48	0.011	5.34	0.015	5.62	0.006	5.46	0.014	
N-S	6	2.58	0.104	4.53	0.040	4.92	0.028	4.84	0.031	4.17	0.053
	7	2.58	0.104	4.53	0.040	4.92	0.028	4.84	0.031	4.17	0.053
	8	2.58	0.104	4.53	0.040	4.92	0.028	4.84	0.031	4.17	0.053
	9	2.58	0.104	4.53	0.040	4.92	0.028	4.84	0.031	4.17	0.053
	10	2.58	0.104	4.51	0.040	4.90	0.028	4.83	0.031	4.16	0.053
	11	2.58	0.104	4.51	0.040	4.90	0.028	4.83	0.031	4.16	0.053
	12	2.58	0.104	4.51	0.040	4.90	0.028	4.83	0.031	4.16	0.053
	13	2.58	0.104	4.51	0.040	4.90	0.028	4.83	0.031	4.16	0.053
	14	2.58	0.104	4.51	0.040	4.90	0.028	4.83	0.031	4.16	0.053
	15	2.58	0.104	4.51	0.040	4.90	0.028	4.83	0.031	4.16	0.053
	16	2.58	0.104	4.51	0.040	4.90	0.028	4.83	0.031	4.16	0.053
17	2.58	0.104	4.51	0.040	4.90	0.028	4.83	0.031	4.16	0.053	
18	2.58	0.104	4.53	0.040	4.92	0.028	4.84	0.031	4.17	0.053	
S-N	6	4.67	0.036	4.58	0.039	5.02	0.025	5.09	0.023	4.57	0.039
	7	4.67	0.036	4.58	0.039	5.02	0.025	5.09	0.023	4.57	0.039
	8	4.67	0.036	4.58	0.039	5.02	0.025	5.09	0.023	4.57	0.039
	9	4.67	0.036	4.58	0.039	5.02	0.025	5.09	0.023	4.57	0.039
	10	4.66	0.036	4.57	0.039	5.00	0.025	5.08	0.023	4.55	0.039
	11	4.66	0.036	4.57	0.039	5.00	0.025	5.08	0.023	4.55	0.039
	12	4.66	0.036	4.57	0.039	5.00	0.025	5.08	0.023	4.55	0.039
	13	4.66	0.036	4.57	0.039	5.00	0.025	5.08	0.023	4.55	0.039
	14	4.66	0.036	4.57	0.039	5.00	0.025	5.08	0.023	4.55	0.039
	15	4.66	0.036	4.57	0.039	5.00	0.025	5.08	0.023	4.55	0.039
	16	4.66	0.036	4.57	0.039	5.00	0.025	5.08	0.023	4.55	0.039
17	4.66	0.036	4.57	0.039	5.00	0.025	5.08	0.023	4.55	0.039	
18	4.67	0.036	4.58	0.039	5.02	0.025	5.09	0.023	4.57	0.039	

Tabla C3 FE Vehículos en Reposo (gr/min), Condiciones Actuales

Fuente: Autores

### Vehículos en Reposo (gr/min), Condiciones SITM

Sentido	Hora	Calle 36		Calle 45		Calle 50		Calle 56		Quebrada Seca	
		CO	PM	CO	PM	CO	PM	CO	PM	CO	PM
E-W	6	5.65	0.004	5.59	0.007	5.56	0.009	5.43	0.012	5.37	0.016
	7	5.65	0.004	5.59	0.007	5.56	0.009	5.43	0.012	5.37	0.016
	8	5.65	0.004	5.59	0.007	5.56	0.009	5.43	0.012	5.37	0.016
	9	5.65	0.004	5.59	0.007	5.56	0.009	5.43	0.012	5.37	0.016
	10	5.63	0.004	5.58	0.007	5.54	0.009	5.41	0.012	5.35	0.016
	11	5.63	0.004	5.58	0.007	5.54	0.009	5.41	0.012	5.35	0.016
	12	5.63	0.004	5.58	0.007	5.54	0.009	5.41	0.012	5.35	0.016
	13	5.63	0.004	5.58	0.007	5.54	0.009	5.41	0.012	5.35	0.016
	14	5.63	0.004	5.58	0.007	5.54	0.009	5.41	0.012	5.35	0.016
	15	5.63	0.004	5.58	0.007	5.54	0.009	5.41	0.012	5.35	0.016
	16	5.63	0.004	5.58	0.007	5.54	0.009	5.41	0.012	5.35	0.016
17	5.63	0.004	5.58	0.007	5.54	0.009	5.41	0.012	5.35	0.016	
18	5.65	0.004	5.59	0.007	5.56	0.009	5.43	0.012	5.37	0.016	
W-E	6	5.66	0.004	5.48	0.011	5.34	0.015	5.62	0.006	5.46	0.014
	7	5.66	0.004	5.48	0.011	5.34	0.015	5.62	0.006	5.46	0.014
	8	5.66	0.004	5.48	0.011	5.34	0.015	5.62	0.006	5.46	0.014
	9	5.66	0.004	5.48	0.011	5.34	0.015	5.62	0.006	5.46	0.014
	10	5.64	0.004	5.47	0.011	5.32	0.015	5.61	0.006	5.44	0.014
	11	5.64	0.004	5.47	0.011	5.32	0.015	5.61	0.006	5.44	0.014
	12	5.64	0.004	5.47	0.011	5.32	0.015	5.61	0.006	5.44	0.014
	13	5.64	0.004	5.47	0.011	5.32	0.015	5.61	0.006	5.44	0.014
	14	5.64	0.004	5.47	0.011	5.32	0.015	5.61	0.006	5.44	0.014
	15	5.64	0.004	5.47	0.011	5.32	0.015	5.61	0.006	5.44	0.014
	16	5.64	0.004	5.47	0.011	5.32	0.015	5.61	0.006	5.44	0.014
17	5.64	0.004	5.47	0.011	5.32	0.015	5.61	0.006	5.44	0.014	
18	5.66	0.004	5.48	0.011	5.34	0.015	5.62	0.006	5.46	0.014	
N-S	6	4.25	0.020	5.54	0.005	5.59	0.005	5.55	0.006	5.39	0.011
	7	4.25	0.020	5.54	0.005	5.59	0.005	5.55	0.006	5.39	0.011
	8	4.25	0.020	5.54	0.005	5.59	0.005	5.55	0.006	5.39	0.011
	9	4.25	0.020	5.54	0.005	5.59	0.005	5.55	0.006	5.39	0.011
	10	4.25	0.020	5.52	0.005	5.57	0.005	5.54	0.006	5.38	0.011
	11	4.25	0.020	5.52	0.005	5.57	0.005	5.54	0.006	5.38	0.011
	12	4.25	0.020	5.52	0.005	5.57	0.005	5.54	0.006	5.38	0.011
	13	4.25	0.020	5.52	0.005	5.57	0.005	5.54	0.006	5.38	0.011
	14	4.25	0.020	5.52	0.005	5.57	0.005	5.54	0.006	5.38	0.011
	15	4.25	0.020	5.52	0.005	5.57	0.005	5.54	0.006	5.38	0.011
	16	4.25	0.020	5.52	0.005	5.57	0.005	5.54	0.006	5.38	0.011
17	4.25	0.020	5.52	0.005	5.57	0.005	5.54	0.006	5.38	0.011	
18	4.25	0.020	5.54	0.005	5.59	0.005	5.55	0.006	5.39	0.011	
S-N	6	5.55	0.005	5.54	0.005	5.61	0.004	5.60	0.005	5.54	0.006
	7	5.55	0.005	5.54	0.005	5.61	0.004	5.60	0.005	5.54	0.006
	8	5.55	0.005	5.54	0.005	5.61	0.004	5.60	0.005	5.54	0.006
	9	5.55	0.005	5.54	0.005	5.61	0.004	5.60	0.005	5.54	0.006
	10	5.53	0.005	5.52	0.005	5.59	0.004	5.58	0.005	5.52	0.006
	11	5.53	0.005	5.52	0.005	5.59	0.004	5.58	0.005	5.52	0.006
	12	5.53	0.005	5.52	0.005	5.59	0.004	5.58	0.005	5.52	0.006
	13	5.53	0.005	5.52	0.005	5.59	0.004	5.58	0.005	5.52	0.006
	14	5.53	0.005	5.52	0.005	5.59	0.004	5.58	0.005	5.52	0.006
	15	5.53	0.005	5.52	0.005	5.59	0.004	5.58	0.005	5.52	0.006
	16	5.53	0.005	5.52	0.005	5.59	0.004	5.58	0.005	5.52	0.006
17	5.53	0.005	5.52	0.005	5.59	0.004	5.58	0.005	5.52	0.006	
18	5.55	0.005	5.54	0.005	5.61	0.004	5.60	0.005	5.54	0.006	

Tabla C4 FE Vehículos en Reposo (gr/min), Condiciones SITM

Fuente: Autores

## ANEXO D

### EMISIONES TOTALES HORARIAS

Emisión horaria de CO (gr), por tipo de vehículo, Condiciones Actuales

Hora	Tipo de Vehículo					Total
	Auto	Taxi	Bus	Buseta	Camión	
6	38221	41659	935	6225	641	87681
7	55253	59305	1254	8418	897	125126
8	64960	68843	1378	9256	1060	145498
9	65179	69804	1426	9550	1110	147069
10	67606	72271	1445	9633	1143	152098
11	73788	79753	1663	11093	1287	167583
12	68055	72285	1476	9832	1157	152804
13	54598	58963	1311	8736	883	124492
14	68706	71766	1432	9533	1118	152554
15	69121	72978	1566	10434	1153	155253
16	75311	77208	1636	10881	1263	166299
17	71853	74479	1804	12001	1277	161414
18	74890	77376	1651	10922	1262	166101
<b>Total</b>	<b>847540</b>	<b>896690</b>	<b>18978</b>	<b>126513</b>	<b>14250</b>	<b>1903971</b>

Tabla D1 Emisión Horaria de CO (gr.), por tipo de Vehículo, condiciones Actuales

Fuente: Autores

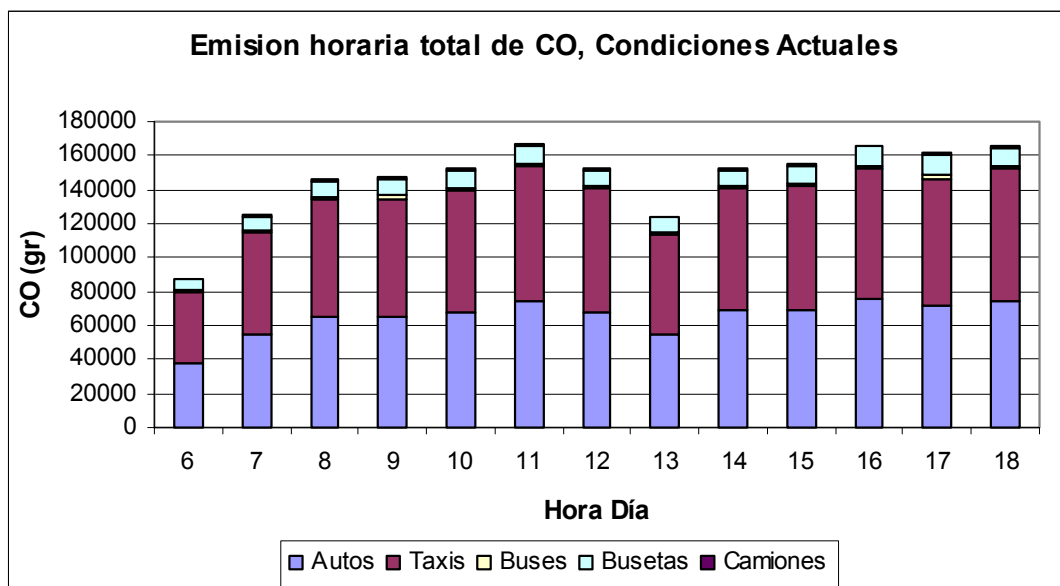


Figura D1 Emisión horaria total de CO (gr.), por tipo de Vehículo, condiciones Actuales

Fuente: Autores

**Emisión horaria de CO (gr), por tipo de vehículo, SITM Gas**

Hora	Tipo de Vehículo						Total
	Auto	Taxi	Bus	Buseta	Metrolínea	Camión	
6	33236	35869	54	379	796	551	70886
7	51253	55058	88	622	1099	823	108943
8	62068	66196	111	782	1162	1006	131326
9	61508	65848	100	706	1225	1056	130443
10	63914	68284	100	704	1191	1090	135282
11	70637	77081	136	960	1346	1223	151383
12	66876	71862	106	749	1230	1154	141978
13	52031	56436	82	580	1078	829	111036
14	65662	68511	103	728	1155	1070	137229
15	67864	72182	96	673	1276	1134	143225
16	74098	76751	117	826	1300	1241	154333
17	71806	75488	115	811	1308	1270	150798
18	76497	81129	110	772	1538	1335	161381
<b>Total</b>	<b>817450</b>	<b>870694</b>	<b>1320</b>	<b>9290</b>	<b>15704</b>	<b>13783</b>	<b>1728241</b>

Tabla D2 Emisión Horaria de CO (gr.), por tipo de Vehículo, SITM GAS

Fuente: Autores

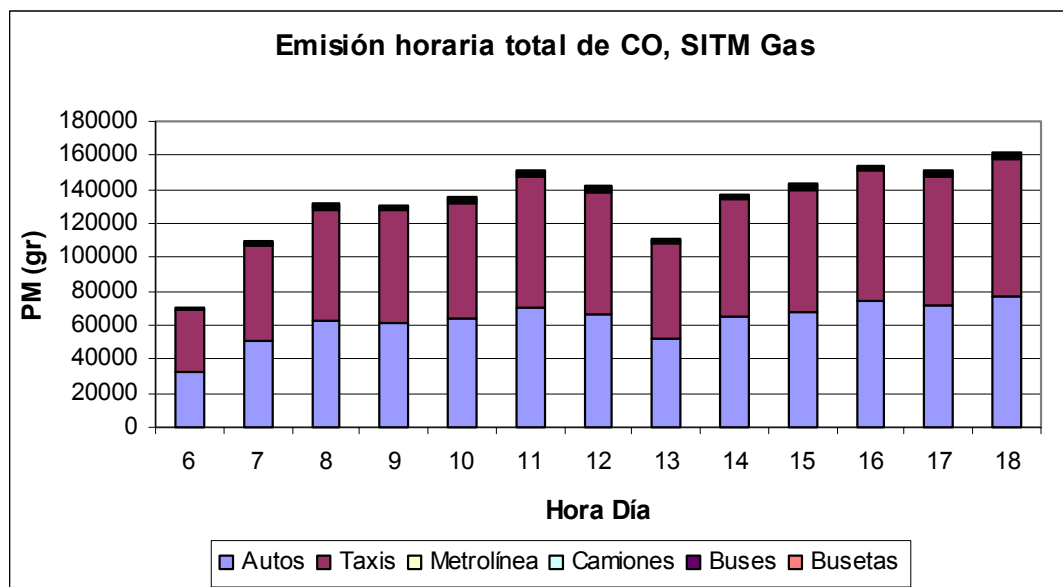


Figura D2 Emisión horaria total de CO (gr.), por tipo de Vehículo, SITM GAS

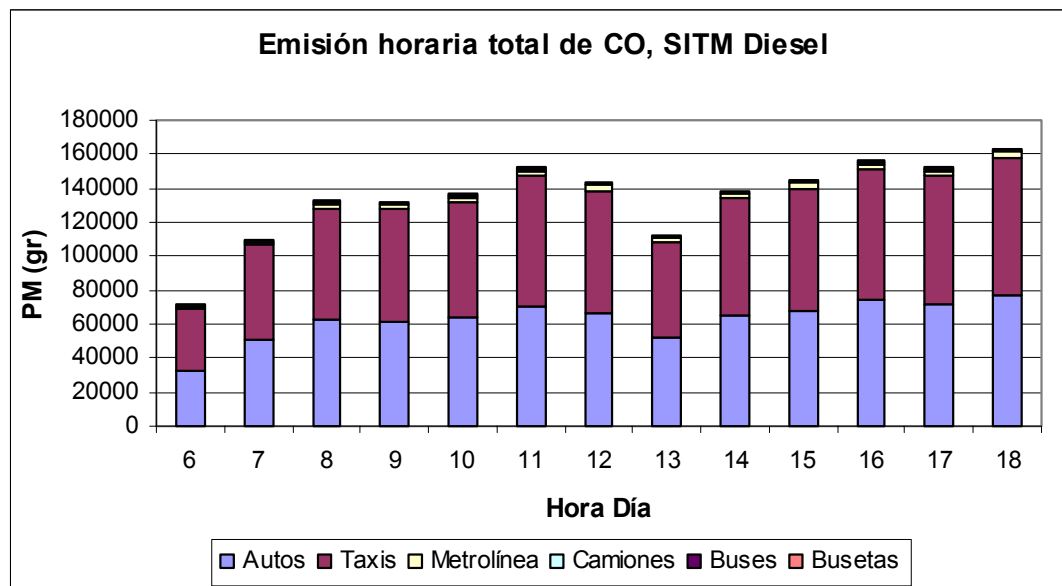
Fuente: Autores

**Emisión horaria de CO (gr), por tipo de vehículo, SITM Diesel**

Hora	Tipo de Vehículo						Total
	Auto	Taxi	Bus	Buseta	Metrolínea	Camión	
6	33236	35869	54	379	1646	551	71735
7	51253	55058	88	622	2192	823	110036
8	62068	66196	111	782	2412	1006	132576
9	61508	65848	100	706	2497	1056	131716
10	63914	68284	100	704	2593	1090	136683
11	70637	77081	136	960	2918	1223	152955
12	66876	71862	106	749	2860	1154	143607
13	52031	56436	82	580	2335	829	112293
14	65662	68511	103	728	2441	1070	138515
15	67864	72182	96	673	2814	1134	144763
16	74098	76751	117	826	2879	1241	155912
17	71806	75488	115	811	3194	1270	152685
18	76497	81129	110	772	3783	1335	163625
<b>Total</b>	<b>817450</b>	<b>870694</b>	<b>1320</b>	<b>9290</b>	<b>34564</b>	<b>13783</b>	<b>1747101</b>

*Tabla D3 Emisión Horaria de CO (gr.), por tipo de Vehículo, SITM DIESEL*

*Fuente: Autores*



*Figura D3 Emisión horaria total de CO (gr.), por tipo de Vehículo, SITM DIESEL*

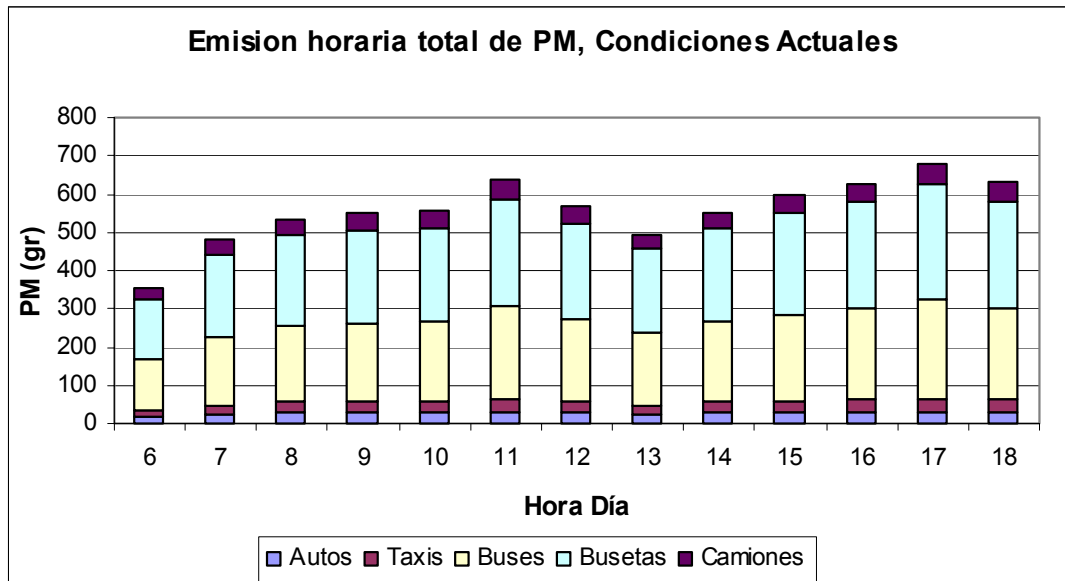
*Fuente: Autores*

**Emisión horaria de PM (gr), por tipo de vehículo, Condiciones Actuales**

Hora	Emisión de PM en gr					
	Auto	Taxi	Bus	Buseta	Camion	Total
6	16	18	134	159	26	352
7	22	26	180	214	36	479
8	26	30	198	236	42	533
9	26	30	205	243	44	549
10	27	32	208	245	45	558
11	30	35	239	282	51	638
12	28	32	212	250	46	568
13	22	26	189	222	35	494
14	28	32	206	243	44	553
15	28	32	225	266	46	597
16	31	34	235	277	50	628
17	29	33	259	306	51	679
18	30	35	237	278	50	631
<b>Total</b>	<b>344</b>	<b>396</b>	<b>2729</b>	<b>3221</b>	<b>567</b>	<b>7258</b>

*Tabla D4 Emisión Horaria de PM (gr.), por tipo de Vehículo, Condiciones Actuales*

*Fuente: Autores*



*Figura D4 Emisión horaria total de PM (gr.), por tipo de Vehículo, Condiciones Actuales*

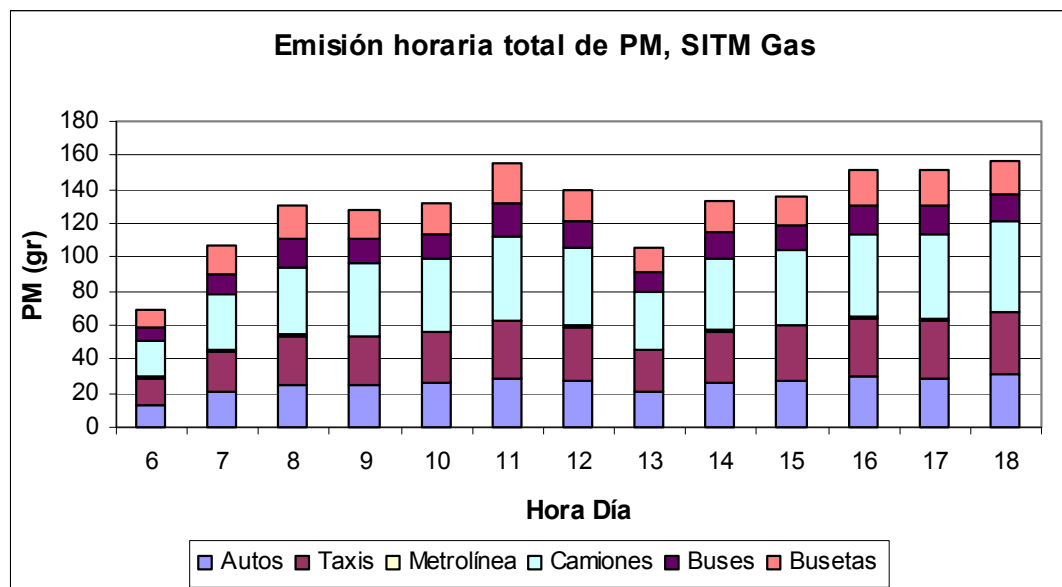
*Fuente: Autores*

**Emisión horaria de PM (gr), por tipo de vehículo, SITM Gas**

Hora	Emision de PM en gr						Total
	Auto	Taxi	Bus	Buseta	Metrolínea	Camion	
6	13	16	8	10	0	22	69
7	21	24	13	16	0	33	106
8	25	29	16	20	0	40	130
9	25	29	14	18	0	42	128
10	26	30	14	18	0	43	132
11	29	34	20	24	0	49	156
12	27	32	15	19	0	46	140
13	21	25	12	15	0	33	106
14	27	30	15	19	0	43	133
15	28	32	14	17	0	45	136
16	30	34	17	21	0	49	152
17	29	34	17	21	0	51	151
18	31	37	16	20	1	53	157
<b>Total</b>	<b>332</b>	<b>384</b>	<b>190</b>	<b>236</b>	<b>5</b>	<b>548</b>	<b>1696</b>

*Tabla D5 Emisión Horaria de PM (gr.), por tipo de Vehículo, SITM GAS*

*Fuente: Autores*



*Figura D5 Emisión horaria total de PM (gr.), por tipo de Vehículo, SITM GAS*

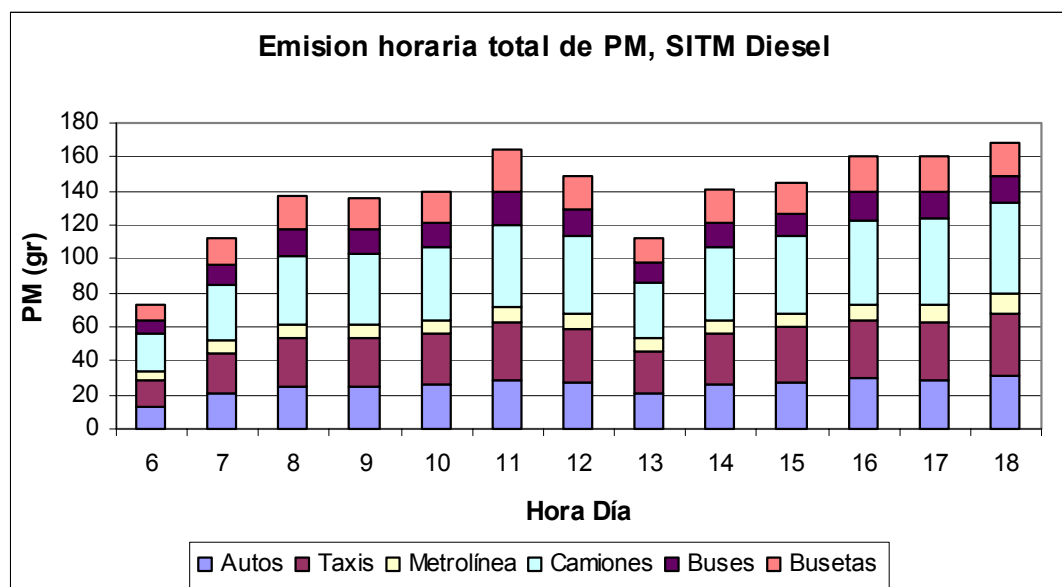
*Fuente: Autores*

**Emisión horaria de PM (gr), por tipo de vehículo, SITM Diesel**

Hora	Emision de PM en gr						Total
	Auto	Taxi	Bus	Buseta	Metrolinea	Camion	
6	13	16	8	10	5	22	74
7	21	24	13	16	7	33	113
8	25	29	16	20	7	40	137
9	25	29	14	18	8	42	136
10	26	30	14	18	8	43	140
11	29	34	20	24	9	49	164
12	27	32	15	19	9	46	148
13	21	25	12	15	7	33	113
14	27	30	15	19	8	43	140
15	28	32	14	17	9	45	144
16	30	34	17	21	9	49	160
17	29	34	17	21	10	51	161
18	31	37	16	20	12	53	168
<b>Total</b>	<b>332</b>	<b>384</b>	<b>190</b>	<b>236</b>	<b>107</b>	<b>548</b>	<b>1798</b>

*Tabla D6 Emisión Horaria de PM (gr.), por tipo de Vehículo, SITM DIESEL*

*Fuente: Autores*



*Figura D6 Emisión horaria total de PM (gr.), por tipo de Vehículo, SITM DIESEL*

*Fuente: Autores*

## ANEXO E

### EMISIONES TOTALES POR INTERSECCIÓN Y TIPO DE VEHÍCULO

Emisión de CO (gr) por intersección y tipo de vehículo, Condiciones Actuales

Interseccion	Sentido	Emision de CO en gr					Total
		Auto	Taxi	Bus	Buseta	Camión	
Calle 36	E-W	7929	20591	0	0	59	28579
	N-S	0	0	2802	19269	345	22415
	S-N	25144	41918	1178	8280	199	76718
	W-E	5470	10912	0	0	31	16414
Calle 45	E-W	42787	29866	69	486	288	73497
	N-S	22619	38455	1274	7794	195	70337
	S-N	20830	36368	1033	7232	167	65630
	W-E	47761	30687	173	1210	439	80269
Calle 50	15 N-S	111427	122415	2701	17692	1463	255698
	15 S-N	74400	77821	1358	9480	455	163513
	17 S-N	64638	69075	530	3713	808	138764
	50 E-W	55639	35104	94	661	894	92392
Calle 56	E-W	26070	19527	133	936	309	46974
	N-S	79502	93042	2133	13037	1419	189133
	S-N	85692	76295	1214	8508	1028	172737
	W-E	15436	13113	15	109	114	28788
Qda Seca	E-W	44205	31838	198	1400	1503	79144
	N-S	23543	40135	2118	12969	1413	80178
	S-N	35898	62231	1848	12962	628	113568
	W-E	58548	47296	109	774	2495	109222
<b>Total</b>							<b>1903971</b>

Tabla E1 Emisión de CO (gr.), por intersección y tipo de Vehículo, Condiciones Actuales

Fuente: Autores

Emisión de CO (gr) por intersección y tipo de vehículo, SITM Gas

Interseccion	Sentido	Tipo de Vehiculo						Total
		Auto	Taxi	Bus	Buseta	Camión	Metrolínea	
Calle 36	E-W	7929	20591	0	0	59	0	28579
	N-S	0	0	0	0	236	1864	2100
	S-N	22950	37472	0	0	172	1074	61668
	W-E	5470	10912	0	0	31	0	16414
Calle 45	E-W	42787	29866	69	486	288	0	73497
	N-S	20189	34314	0	0	174	1266	55943
	S-N	20434	36322	0	0	162	1330	58248
	W-E	47761	30687	173	1210	439	0	80269
Calle 50	15 N-S	101898	122757	0	0	1421	2005	228081
	15 S-N	71258	74248	0	0	442	1416	147364
	17 S-N	64638	69075	530	3713	808	0	138764
	50 E-W	55639	35104	94	661	894	0	92392
Calle 56	E-W	26070	19527	133	936	309	0	46974
	N-S	74348	86894	0	0	1346	2144	164733
	S-N	81202	72249	0	0	976	1318	155744
	W-E	15436	13113	15	109	114	0	28788
Qda Seca	E-W	44205	31838	198	1400	1503	0	79144
	N-S	22747	38601	0	0	1331	1790	64469
	S-N	33940	59829	0	0	582	1496	95846
	W-E	58548	47296	109	774	2495	0	109222
<b>Total</b>							<b>1728241</b>	

Tabla E2 Emisión de CO (gr.), por intersección y tipo de Vehículo, SITM GAS

Fuente: Autores

**Emisión de CO (gr) por intersección y tipo de vehículo, SITM Diesel**

Interseccion	Sentido	Tipo de Vehículo						Total
		Auto	Taxi	Bus	Buseta	Camión	Metrolinea	
Calle 36	E-W	7929	20591	0	0	59	0	28579
	N-S	0	0	0	0	236	4893	5129
	S-N	22950	37472	0	0	172	2527	63121
	W-E	5470	10912	0	0	31	0	16414
Calle 45	E-W	42787	29866	69	486	288	0	73497
	N-S	20189	34314	0	0	174	2741	57418
	S-N	20434	36322	0	0	162	2713	59631
	W-E	47761	30687	173	1210	439	0	80269
Calle 50	15 N-S	101898	122757	0	0	1421	4738	230814
	15 S-N	71258	74248	0	0	442	2822	148770
	17 S-N	64638	69075	530	3713	808	0	138764
	50 E-W	55639	35104	94	661	894	0	92392
Calle 56	E-W	26070	19527	133	936	309	0	46974
	N-S	74348	86894	0	0	1346	4414	167002
	S-N	81202	72249	0	0	976	2671	157098
	W-E	15436	13113	15	109	114	0	28788
Qda Seca	E-W	44205	31838	198	1400	1503	0	79144
	N-S	22747	38601	0	0	1331	3911	66590
	S-N	33940	59829	0	0	582	3134	97484
	W-E	58548	47296	109	774	2495	0	109222
							<b>Total</b>	<b>1747101</b>

*Tabla E3 Emisión de CO (gr.), por intersección y tipo de Vehículo, SITM DIESEL*

*Fuente: Autores*

**Emisión de PM (gr) por intersección y tipo de vehículo, Condiciones Actuales**

Interseccion	Sentido	Emisión de CO en gr					Total	
		Auto	Taxi	Bus	Buseta	Camion		
Calle 36	E-W	3	9	0	0	2	15	
	N-S	0	0	403	491	14	907	
	S-N	10	19	169	211	8	418	
	W-E	2	5	0	0	1	8	
Calle 45	E-W	17	13	10	12	12	64	
	N-S	9	17	183	198	8	415	
	S-N	8	16	149	184	7	364	
	W-E	19	14	25	31	17	106	
Calle 50	15 N-S	45	55	388	451	58	997	
	15 S-N	30	34	195	241	18	519	
	17 S-N	26	31	76	94	32	260	
	50 E-W	23	16	13	17	36	104	
Calle 56	E-W	11	9	19	24	12	75	
	N-S	32	40	307	332	57	768	
	S-N	35	33	175	217	41	500	
	W-E	6	6	2	3	5	22	
Qda Seca	E-W	18	14	28	36	60	156	
	N-S	10	18	305	330	56	719	
	S-N	15	28	266	330	25	663	
	W-E	24	21	16	20	99	179	
							<b>Total</b>	<b>7258</b>

*Tabla E4 Emisión de PM (gr.), por intersección y tipo de Vehículo, Condiciones Actuales*

*Fuente: Autores*

**Emisión de PM (gr) por intersección y tipo de vehículo, SITM Gas**

Interseccion	Sentido	Tipo de Vehículo						Total
		Auto	Taxi	Bus	Buseta	Camion	Metrolinea	
Calle 36	E-W	3	9	0	0	2	0	15
	N-S	0	0	0	0	9	1	10
	S-N	9	17	0	0	7	0	33
	W-E	2	5	0	0	1	0	8
Calle 45	E-W	17	13	10	12	12	0	64
	N-S	8	15	0	0	7	0	31
	S-N	8	16	0	0	6	0	31
	W-E	19	14	25	31	17	0	106
Calle 50	15 N-S	42	55	0	0	57	1	154
	15 S-N	29	32	0	0	18	0	79
	17 S-N	26	31	76	94	32	0	260
	50 E-W	23	16	13	17	36	0	104
Calle 56	E-W	11	9	19	24	12	0	75
	N-S	30	38	0	0	54	1	122
	S-N	33	31	0	0	39	0	104
	W-E	6	6	2	3	5	0	22
Qda Seca	E-W	18	14	28	36	60	0	156
	N-S	9	17	0	0	53	1	80
	S-N	14	26	0	0	23	0	64
	W-E	24	21	16	20	99	0	179
							<b>Total</b>	<b>1696</b>

*Tabla E5 Emisión de PM (gr.), por intersección y tipo de Vehículo, SITM GAS*

*Fuente: Autores*

**Emisión de PM (gr) por intersección y tipo de vehículo, SITM Diesel**

Interseccion	Sentido	Tipo de Vehículo						Total
		Auto	Taxi	Bus	Buseta	Camión	Metrolinea	
Calle 36	E-W	3	9	0	0	2	0	15
	N-S	0	0	0	0	9	15	25
	S-N	9	17	0	0	7	8	41
	W-E	2	5	0	0	1	0	8
Calle 45	E-W	17	13	10	12	12	0	64
	N-S	8	15	0	0	7	9	39
	S-N	8	16	0	0	6	8	39
	W-E	19	14	25	31	17	0	106
Calle 50	15 N-S	42	55	0	0	57	15	168
	15 S-N	29	32	0	0	18	9	87
	17 S-N	26	31	76	94	32	0	260
	50 E-W	23	16	13	17	36	0	104
Calle 56	E-W	11	9	19	24	12	0	75
	N-S	30	38	0	0	54	14	135
	S-N	33	31	0	0	39	8	111
	W-E	6	6	2	3	5	0	22
Qda Seca	E-W	18	14	28	36	60	0	156
	N-S	9	17	0	0	53	12	91
	S-N	14	26	0	0	23	10	73
	W-E	24	21	16	20	99	0	179
							<b>Total</b>	<b>1798</b>

*Tabla E6 Emisión de PM (gr.), por intersección y tipo de Vehículo, SITM DIESEL*

*Fuente: Autores*

**ANEXO F**  
**CONCENTRACIONES HORARIAS POR RECEPTOR**

Receptor	Coordenadas		HORA DEL DIA														Máximo Receptor
	E	N	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
'Rec1'	1104820.54	1279558.97	1.5	1.6	3.4	2.3	1.6	2.0	1.2	1.3	1.4	1.6	2.8	3.4	3.3	3.4	
'Rec2'	1104850.23	1279569.67	0.1	0.2	1.1	0.1	0.2	1.9	1.0	0.0	0.4	0.4	1.3	1.9	1.9	1.9	
'Rec3'	1104843.56	1279492.81	2.6	3.1	3.1	2.4	1.5	3.3	2.2	1.9	2.4	2.3	2.8	3.3	3.3	3.3	
'Rec4'	1104876.97	1279495.42	2.8	3.7	3.6	2.4	1.6	3.8	1.8	2.0	2.5	2.4	3.1	3.5	3.8	3.8	
'Rec5'	1104889.31	1279463.75	0.7	1.2	0.7	1.1	0.6	2.3	1.6	0.6	0.7	0.7	1.4	1.8	1.7	2.3	
'Rec6'	1104855.69	1279460.73	2.3	2.7	1.9	2.4	1.6	1.3	1.2	1.9	2.2	2.1	1.5	1.9	1.9	2.7	
'Rec7'	1104923.90	1279297.86	1.1	1.2	1.3	0.8	0.7	0.9	0.6	0.8	0.7	0.8	1.1	1.3	1.2	1.3	
'Rec8'	1104954.49	1279305.27	0.0	0.0	0.5	0.0	0.1	1.0	0.5	0.1	0.1	0.1	0.8	0.9	0.9	1.0	
'Rec9'	1104991.46	1279131.23	0.5	0.6	0.9	0.5	0.4	0.6	0.4	0.5	0.6	0.6	0.8	1.2	1.1	1.2	
'Rec10'	1105021.65	1279138.48	0.0	0.0	0.5	0.0	0.1	0.8	0.5	0.0	0.1	0.1	0.8	1.4	1.0	1.4	
'TELEB'	1105057.07	1278963.90	0.8	1.1	1.6	1.6	1.2	2.0	1.7	1.5	1.3	1.2	1.6	2.1	2.3	2.3	
'Rec12'	1105087.06	1278972.80	0.4	0.7	1.8	1.3	1.3	2.7	1.9	1.1	0.9	0.9	1.8	2.0	2.2	2.7	
'Rec13'	1105097.70	1278945.25	0.0	0.0	0.4	0.2	0.2	2.3	1.7	0.1	0.1	0.1	1.1	1.5	1.3	2.3	
'Rec14'	1105068.23	1278935.60	1.5	1.7	1.1	1.4	0.9	1.2	1.0	1.3	1.2	1.2	1.2	1.5	1.5	1.7	
'Rec15'	1105119.51	1278806.37	0.4	0.7	1.2	0.6	0.3	0.7	0.6	0.5	0.6	0.6	1.1	1.5	1.6	1.6	
'SKALA'	1105150.78	1278812.07	0.0	0.1	0.6	0.1	0.1	0.9	0.5	0.0	0.1	0.0	1.0	1.1	1.4	1.4	
'Rec17'	1105158.10	1278707.25	1.0	1.2	1.5	0.7	0.4	1.1	0.9	1.1	1.1	1.0	1.8	2.4	2.6	2.6	
'Rec18'	1105186.51	1278718.84	0.2	0.4	0.8	0.2	0.0	1.0	0.8	0.3	0.3	0.2	1.2	1.4	1.6	1.6	
'Rec19'	1105202.02	1278592.58	1.9	2.0	2.7	1.8	1.7	3.0	3.8	2.1	2.5	2.1	3.1	3.4	4.0	4.0	
'Rec20'	1105230.34	1278603.79	2.5	2.5	2.3	1.5	1.3	3.3	2.8	1.9	2.0	1.9	2.4	2.4	2.8	3.3	
'Rec21'	1105242.94	1278575.91	0.2	0.4	0.9	0.4	0.4	3.5	2.6	0.3	0.3	0.3	1.7	1.8	1.9	3.5	
'Rec22'	1105214.05	1278564.71	1.7	2.0	2.1	1.5	1.2	1.6	1.7	1.7	1.7	1.4	2.0	2.2	2.6	2.6	
'Rec23'	1105369.15	1278423.78	1.6	1.8	1.5	1.1	0.4	0.4	0.4	1.3	1.3	1.0	0.6	0.7	0.9	1.8	
'Rec24'	1105377.54	1278460.09	1.8	2.0	2.4	0.9	0.3	1.3	1.4	1.0	1.3	1.1	1.5	1.9	2.4	2.4	
'Rec25'	1105514.08	1278370.29	2.7	3.5	3.2	2.8	1.3	1.1	1.8	3.0	2.6	1.9	1.6	2.0	3.2	3.5	
'Rec26'	1105557.17	1278446.20	0.7	1.4	2.9	0.9	0.4	1.6	1.2	0.7	1.0	0.7	2.0	2.2	2.9	2.9	
'Rec27'	1105588.87	1278454.23	1.2	2.2	4.2	1.5	0.9	2.8	1.8	1.3	1.4	1.1	2.7	3.1	3.6	4.2	
'Rec28'	1105628.25	1278380.27	1.0	1.3	3.4	1.3	1.0	3.3	2.1	1.4	1.4	1.0	2.7	3.2	4.2	4.2	
'Rec29'	1105681.12	1278258.76	1.6	3.6	2.3	2.7	1.7	2.3	1.3	1.8	2.1	1.7	1.5	1.8	2.5	3.6	
'Rec31'	1105766.75	1278190.24	1.8	2.1	1.9	1.3	0.8	0.8	1.0	1.4	1.5	1.6	1.5	1.8	2.5	2.5	
'Rec32'	1105787.19	1278215.79	0.5	0.3	2.4	0.6	0.5	1.5	1.1	0.5	0.9	1.0	2.2	2.2	2.8	2.8	
'Rec33'	1105924.20	1278064.03	3.0	3.1	2.5	1.6	1.0	0.9	1.1	1.3	1.9	1.8	1.9	2.1	2.9	3.1	
'Rec34'	1105944.07	1278088.96	1.0	0.6	3.0	0.6	0.7	1.7	1.2	0.6	1.3	1.2	2.5	2.8	3.4	3.4	
'Rec36'	1106066.18	1277991.65	1.6	1.2	3.9	1.1	1.1	2.6	2.1	1.1	1.8	1.6	3.3	3.8	4.8	4.8	
'Rec37'	1106189.00	1277893.54	0.6	0.4	3.3	0.6	0.7	1.6	1.1	0.6	1.1	1.0	1.9	2.1	2.6	3.3	
'Rec38'	1106117.55	1277907.44	3.9	4.0	2.6	2.5	1.6	1.1	1.4	2.4	2.7	2.6	1.4	1.6	2.1	4.0	
'Rec39'	1106252.59	1277799.24	2.2	2.4	1.7	1.5	1.0	0.9	1.0	1.3	1.6	1.6	1.1	1.2	1.7	2.4	
'Rec40'	1106273.29	1277826.00	0.6	0.3	2.4	0.6	0.7	1.6	1.1	0.6	1.1	0.9	1.8	2.0	2.5	2.5	
'Rec41'	1104791.18	1279506.41	1.5	1.4	1.6	1.4	0.8	1.0	0.7	1.3	1.3	1.3	1.4	1.7	1.7	1.7	
'Rec42'	1104907.68	1279542.95	0.3	0.4	0.5	0.3	0.1	1.0	0.3	0.2	0.4	0.4	0.6	0.8	0.7	1.0	
'Rec43'	1104845.87	1279367.69	0.4	0.5	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5	
'Rec44'	1104954.15	1279424.40	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	
'Rec45'	1104996.37	1278995.42	0.4	0.5	0.6	0.4	0.2	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.8	1.0	1.0	
'Rec46'	1105112.15	1279031.79	0.0	0.0	0.4	0.1	0.1	0.7	0.4	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.7	0.7	
'Rec47'	1105040.80	1278882.71	0.2	0.4	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.6	0.6	0.9	0.9	
'Rec48'	1105156.03	1278920.59	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.5	0.5	
'Rec49'	1105144.33	1278617.39	1.4	1.4	1.5	0.9	0.6	0.7	2.4	1.2	1.2	1.1	1.2	1.6	1.7	2.4	
'Rec50'	1105256.09	1278662.59	0.4	0.5	0.9	0.3	0.3	0.9	0.7	0.3	0.4	0.4	1.0	0.9	1.3	1.3	

Tabla F1 Concentraciones horarias de CO (ppm) por receptor. Condiciones actuales.

Receptor	Coordenadas		HORA DEL DIA															Máximo Receptor
	E	N	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18			
'Rec51'	1105191.75	1278507.79	0.7	1.0	0.7	0.3	0.2	0.1	0.2	0.4	0.3	0.3	0.2	0.4	0.5	1.0		
'Rec52'	1105307.00	1278552.50	0.2	0.4	1.3	0.3	0.1	1.2	0.7	0.3	0.2	0.1	1.0	1.1	1.3	1.3		
'Rec53'	1105583.12	1278271.29	2.8	3.4	2.6	2.3	1.1	0.9	1.0	1.9	2.0	1.8	1.2	2.2	2.7	3.4		
'Rec54'	1105676.90	1278371.48	1.0	1.6	3.0	1.4	1.2	2.7	1.9	1.5	1.5	0.9	2.4	2.7	3.4	3.4		
'Rec55'	1105757.19	1278140.26	1.0	0.8	0.8	0.5	0.2	0.4	0.2	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.6	1.0		
'Rec56'	1105773.94	1278284.45	0.0	0.1	0.8	0.2	0.2	0.6	0.3	0.0	0.1	0.0	0.7	0.8	1.1	1.1		
'Rec57'	1106008.64	1277937.70	2.5	2.5	1.0	1.2	0.6	0.5	0.7	1.1	1.5	1.3	0.6	0.9	1.2	2.5		
'Rec58'	1106134.09	1277995.07	0.6	0.5	1.9	0.2	0.5	1.4	0.9	0.3	0.6	0.8	1.6	2.1	2.7	2.7		
'Rec59'	1106111.05	1277854.99	0.8	1.1	0.4	0.7	0.4	0.1	0.2	0.5	0.7	0.7	0.1	0.1	0.2	1.1		
'Rec60'	1106253.56	1277899.47	0.0	0.0	0.6	0.0	0.1	0.5	0.3	0.0	0.1	0.1	0.6	0.6	0.8	0.8		
'Rec61'	1104748.08	1279316.77	0.2	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2		
'Rec62'	1105025.63	1279573.67	0.3	0.4	0.5	0.3	0.2	0.5	0.4	0.2	0.4	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6		
'Rec63'	1104892.07	1278969.99	0.1	0.2	0.3	0.1	0.1	0.3	0.3	0.1	0.0	0.0	0.2	0.4	0.5	0.5		
'Rec64'	1105253.40	1278960.65	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.5	0.5		
'Rec65'	1105105.49	1278474.34	0.2	0.5	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.5		
'Rec66'	1105369.38	1278708.00	0.2	0.3	1.1	0.3	0.3	0.7	0.5	0.3	0.4	0.3	1.2	1.1	1.2	1.2		
'Rec67'	1105653.14	1278465.22	0.0	0.7	1.5	0.5	0.3	1.4	1.0	0.3	0.3	0.2	1.3	1.4	1.7	1.7		
'Rec68'	1105632.02	1278132.34	1.1	1.1	1.7	0.8	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	0.7	0.6	0.7	1.1	1.7		
'Rec69'	1105922.28	1278337.78	0.0	0.0	0.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.4	0.6	0.6		
'Rec70'	1106003.40	1277805.75	0.4	0.5	0.0	0.2	0.2	0.0	0.0	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.5		
'Rec71'	1106277.27	1278024.68	0.3	0.3	0.4	0.1	0.1	0.5	0.4	0.2	0.2	0.2	0.5	0.7	0.9	0.9		
'Rec72'	1104916.88	1279198.17	0.2	0.3	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.4	0.3	0.3	0.4		
'Rec73'	1105028.83	1279242.82	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2		
'Rec74'	1105095.63	1278744.58	0.2	0.4	0.9	0.3	0.1	0.3	0.4	0.4	0.5	0.4	0.8	1.0	1.2	1.2		
'Rec75'	1105208.11	1278788.53	0.0	0.1	0.8	0.1	0.0	0.3	0.2	0.0	0.2	0.1	0.3	0.4	0.7	0.8		
'Rec76'	1105296.74	1278397.77	0.8	1.2	0.5	0.4	0.2	0.0	0.2	0.4	0.3	0.3	0.1	0.2	0.4	1.2		
'Rec77'	1105462.89	1278350.02	1.7	2.2	1.4	1.3	0.4	0.3	0.6	1.4	1.3	1.0	0.6	0.9	1.3	2.2		
'Rec78'	1105492.73	1278479.67	0.4	0.8	2.2	0.5	0.3	1.2	0.9	0.5	0.8	0.5	1.7	1.8	2.5	2.5		
'Rec79'	1105872.66	1278047.87	1.3	1.3	1.0	0.5	0.3	0.1	0.3	0.4	0.6	0.6	0.4	0.6	0.8	1.3		
'Rec80'	1105949.27	1278142.36	0.1	0.1	1.0	0.0	0.1	0.4	0.3	0.0	0.2	0.1	0.9	1.1	1.5	1.5		
'Rec81'	1104735.84	1279513.32	1.0	1.2	0.8	0.7	0.1	0.4	0.1	0.4	0.8	0.8	0.7	0.7	0.8	1.2		
'Rec82'	1104941.80	1279595.77	0.2	0.2	0.4	0.2	0.0	0.5	0.1	0.0	0.3	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5		
'Rec83'	1104820.75	1279298.24	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.3		
'Rec84'	1104928.93	1279030.44	0.2	0.1	0.4	0.1	0.0	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.4	0.4		
'Rec85'	1105022.96	1279388.53	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1		
'Rec86'	1105140.02	1279097.35	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.4	0.4		
'Rec87'	1105010.33	1278823.95	0.1	0.2	0.5	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4	0.7	0.8	0.8		
'Rec88'	1105080.14	1278645.21	0.6	0.9	1.0	0.3	0.0	0.3	0.6	0.3	0.5	0.4	0.5	0.7	0.8	1.0		
'Rec89'	1105220.62	1278893.10	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.5	0.5		
'Rec90'	1105284.71	1278727.93	0.2	0.3	0.9	0.2	0.3	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.8	0.7	1.2	1.2		
'Rec91'	1105166.97	1278444.55	0.4	0.8	0.4	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.8		
'Rec92'	1105358.23	1278328.07	1.0	1.4	0.8	0.6	0.1	0.0	0.0	0.5	0.5	0.5	0.1	0.2	0.4	1.4		
'Rec93'	1105541.58	1278238.73	1.3	2.2	1.6	1.5	0.8	0.2	0.4	1.1	1.0	0.9	0.3	0.6	0.9	2.2		
'Rec94'	1105470.09	1278536.22	0.3	0.7	1.7	0.4	0.2	0.6	0.4	0.3	0.4	0.2	1.1	1.3	1.7	1.7		
'Rec95'	1105711.95	1278436.69	0.1	1.0	1.6	0.7	0.5	1.5	1.2	0.5	0.5	0.4	1.1	0.7	1.1	1.6		
'Rec96'	1105874.37	1278267.42	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0	0.4	0.6	0.8	0.8		
'Rec97'	1105914.49	1277949.62	1.4	1.6	0.4	0.6	0.2	0.2	0.2	0.6	0.9	0.6	0.3	0.4	0.6	1.6		
'Rec98'	1106141.24	1278053.31	0.3	0.2	0.8	0.1	0.0	0.7	0.4	0.1	0.2	0.1	1.0	1.2	1.4	1.4		
'Rec99'	1106103.83	1277796.70	0.5	0.5	0.0	0.3	0.2	0.0	0.0	0.2	0.3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.5		
'Rec00'	1106375.09	1277866.17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2		
<b>Máximo Hora =</b>			<b>3.9</b>	<b>4.0</b>	<b>4.2</b>	<b>2.8</b>	<b>1.7</b>	<b>3.8</b>	<b>3.8</b>	<b>3.0</b>	<b>2.7</b>	<b>2.6</b>	<b>3.3</b>	<b>3.8</b>	<b>4.8</b>	<b>4.8</b>		

Tabla F2 Concentraciones horarias de CO (ppm) por receptor. Condiciones actuales.

Receptor	Coordenadas		HORA DEL DIA															Máximo Receptor
	E	N	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18			
'Rec1'	1104820.54	1279558.97	11	10	35	24	19	17	11	10	14	17	28	33	32	35		
'Rec2'	1104850.23	1279569.67	1	1	7	1	2	15	9	1	1	1	12	15	15	15		
'Rec3'	1104843.56	1279492.81	15	15	19	11	9	16	11	11	12	12	17	22	21	22		
'Rec4'	1104876.97	1279495.42	9	11	15	7	6	18	11	6	8	8	17	21	21	21		
'Rec5'	1104889.31	1279463.75	1	2	8	2	4	23	15	1	1	1	14	19	18	23		
'Rec6'	1104855.69	1279460.73	21	20	17	13	10	13	10	13	13	13	15	18	18	21		
'Rec7'	1104923.90	1279297.86	10	9	14	7	6	10	6	7	7	7	13	18	16	18		
'Rec8'	1104954.49	1279305.27	0	0	7	0	2	10	5	0	1	1	11	15	13	15		
'Rec9'	1104991.46	1279131.23	9	12	17	11	8	16	10	12	10	11	20	33	25	33		
'Rec10'	1105021.65	1279138.48	0	0	6	0	2	13	7	0	1	1	12	18	16	18		
'TELEB'	1105057.07	1278963.90	18	23	24	25	21	19	12	26	19	20	23	34	36	36		
'Rec12'	1105087.06	1278972.80	0	1	7	1	3	15	9	1	1	1	13	18	17	18		
'Rec13'	1105097.70	1278945.25	0	0	5	0	3	25	16	0	1	1	13	17	15	25		
'Rec14'	1105068.23	1278935.60	17	20	16	17	11	19	14	18	15	16	18	31	24	31		
'Rec15'	1105119.51	1278806.37	9	12	14	10	7	14	9	12	10	11	16	27	21	27		
'SKALA'	1105150.78	1278812.07	0	0	4	0	1	10	6	0	1	1	7	10	9	10		
'Rec17'	1105158.10	1278707.25	5	5	8	4	3	8	6	6	7	6	12	17	17	17		
'Rec18'	1105186.51	1278718.84	1	1	4	1	1	7	5	1	1	1	8	10	10	10		
'Rec19'	1105202.02	1278592.58	10	9	13	8	7	14	20	10	10	9	16	20	21	21		
'Rec20'	1105230.34	1278603.79	5	4	7	3	3	14	11	4	4	4	11	12	14	14		
'Rec21'	1105242.94	1278575.91	2	2	6	1	2	27	20	2	3	2	13	14	17	27		
'Rec22'	1105214.05	1278564.71	13	15	13	11	6	13	13	12	12	11	14	17	18	18		
'Rec23'	1105369.15	1278423.78	7	7	5	5	3	2	3	7	6	6	2	3	4	7		
'Rec24'	1105377.54	1278460.09	8	8	10	5	3	9	9	6	6	5	9	11	13	13		
'Rec25'	1105514.08	1278370.29	12	15	13	12	6	5	7	14	10	8	7	9	11	15		
'Rec26'	1105557.17	1278446.20	2	3	9	2	2	6	4	2	3	3	7	8	10	10		
'Rec27'	1105588.87	1278454.23	3	4	11	3	2	7	4	3	4	3	7	8	10	11		
'Rec28'	1105628.25	1278380.27	2	2	10	2	2	9	6	2	3	3	8	10	12	12		
'Rec29'	1105681.12	1278258.76	7	18	9	12	7	6	6	8	9	8	6	7	10	18		
'Rec31'	1105766.75	1278190.24	7	8	7	5	4	3	4	6	6	7	7	7	10	10		
'Rec32'	1105787.19	1278215.79	2	2	9	2	2	6	5	2	3	4	9	9	11	11		
'Rec33'	1105924.20	1278064.03	11	11	9	6	4	4	5	6	7	7	7	8	10	11		
'Rec34'	1105944.07	1278088.96	3	2	10	2	3	7	5	3	5	4	8	9	11	11		
'Rec36'	1106066.18	1277991.65	3	2	10	3	3	7	5	3	5	4	9	10	12	12		
'Rec37'	1106189.00	1277893.54	2	1	9	2	3	6	4	2	4	4	7	8	10	10		
'Rec38'	1106117.55	1277907.44	11	11	9	7	5	4	5	6	8	7	6	7	9	11		
'Rec39'	1106252.59	1277799.24	9	10	7	6	4	4	5	5	7	7	5	5	7	10		
'Rec40'	1106273.29	1277826.00	2	1	8	2	3	6	4	2	4	3	7	7	9	9		
'Rec41'	1104791.18	1279506.41	10	9	8	7	5	5	4	6	6	6	7	8	8	10		
'Rec42'	1104907.68	1279542.95	1	1	2	1	1	6	3	0	1	1	4	6	5	6		
'Rec43'	1104845.87	1279367.69	4	4	5	2	2	3	2	2	2	2	5	7	6	7		
'Rec44'	1104954.15	1279424.40	0	0	1	0	0	3	2	0	0	0	3	5	4	5		
'Rec45'	1104996.37	1278995.42	9	10	8	9	5	7	7	10	7	9	8	12	10	12		
'Rec46'	1105112.15	1279031.79	0	0	2	0	0	7	3	0	0	0	2	3	3	7		
'Rec47'	1105040.80	1278882.71	3	4	6	4	3	3	3	4	3	3	6	8	8	8		
'Rec48'	1105156.03	1278920.59	0	0	2	0	0	3	2	0	0	0	2	2	3	3		
'Rec49'	1105144.33	1278617.39	7	7	7	5	3	4	15	6	6	6	7	9	9	15		
'Rec50'	1105256.09	1278662.59	1	1	4	1	1	5	3	1	1	1	3	4	5	5		

Tabla F3 Concentraciones horarias de PM<sub>10</sub> (µgr / m<sup>3</sup>) por receptor. Condiciones actuales.

Receptor	Coordenadas		HORA DEL DIA														Máximo Receptor
	E	N	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
'Rec51'	1105191.75	1278507.79	4	5	4	3	1	1	2	3	3	3	2	3	3	5	
'Rec52'	1105307.00	1278552.50	2	2	4	1	1	8	5	2	2	2	4	5	6	8	
'Rec53'	1105583.12	1278271.29	9	10	8	6	3	2	3	5	5	5	4	6	7	10	
'Rec54'	1105676.90	1278371.48	2	3	7	2	2	7	4	2	3	2	6	8	9	9	
'Rec55'	1105757.19	1278140.26	3	3	2	2	1	1	1	2	2	2	1	2	2	3	
'Rec56'	1105773.94	1278284.45	0	0	3	0	1	2	2	1	1	1	3	3	4	4	
'Rec57'	1106008.64	1277937.70	5	5	3	3	2	1	2	3	3	3	1	2	2	5	
'Rec58'	1106134.09	1277995.07	1	1	4	1	1	3	2	1	1	1	4	4	5	5	
'Rec59'	1106111.05	1277854.99	3	3	2	2	1	0	1	2	2	2	1	1	1	3	
'Rec60'	1106253.56	1277899.47	0	0	2	0	0	2	1	0	0	0	2	3	3	3	
'Rec61'	1104748.08	1279316.77	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	3	4	4	4	
'Rec62'	1105025.63	1279573.67	1	1	1	1	1	2	1	0	1	1	1	2	2	2	
'Rec63'	1104892.07	1278969.99	3	4	3	3	2	1	2	3	2	3	3	4	4	4	
'Rec64'	1105253.40	1278960.65	0	0	2	0	0	1	1	0	0	0	2	2	2	2	
'Rec65'	1105105.49	1278474.34	3	3	2	1	1	0	0	2	2	2	0	0	1	3	
'Rec66'	1105369.38	1278708.00	0	1	4	0	0	3	2	1	1	1	3	3	4	4	
'Rec67'	1105653.14	1278465.22	0	1	4	1	1	4	2	1	1	1	3	4	5	5	
'Rec68'	1105632.02	1278132.34	3	3	4	2	1	1	1	2	2	2	1	1	2	4	
'Rec69'	1105922.28	1278337.78	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	2	2	
'Rec70'	1106003.40	1277805.75	1	2	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	2	
'Rec71'	1106277.27	1278024.68	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	2	2	2	
'Rec72'	1104916.88	1279198.17	3	4	6	3	2	4	3	4	3	3	6	10	9	10	
'Rec73'	1105028.83	1279242.82	0	0	2	0	0	4	2	0	0	0	3	5	4	5	
'Rec74'	1105095.63	1278744.58	2	2	5	2	1	3	2	2	3	3	6	7	8	8	
'Rec75'	1105208.11	1278788.53	0	0	2	0	0	3	2	0	1	1	2	3	3	3	
'Rec76'	1105296.74	1278397.77	3	4	3	2	1	0	1	3	2	2	1	1	1	4	
'Rec77'	1105462.89	1278350.02	6	8	5	5	2	1	2	5	5	4	2	3	4	8	
'Rec78'	1105492.73	1278479.67	2	2	8	1	1	5	4	2	3	2	6	7	9	9	
'Rec79'	1105872.66	1278047.87	4	4	3	2	1	1	1	2	2	2	1	1	2	4	
'Rec80'	1105949.27	1278142.36	0	0	3	0	1	2	2	0	1	1	3	3	4	4	
'Rec81'	1104735.84	1279513.32	6	6	5	4	3	2	3	3	4	4	4	5	5	6	
'Rec82'	1104941.80	1279595.77	0	0	1	0	0	3	2	0	0	0	2	3	3	3	
'Rec83'	1104820.75	1279298.24	2	2	4	2	1	2	2	2	2	2	4	6	5	6	
'Rec84'	1104928.93	1279030.44	4	5	5	4	2	3	3	4	3	4	5	7	6	7	
'Rec85'	1105022.96	1279388.53	0	0	1	0	0	2	1	0	0	0	2	2	2	2	
'Rec86'	1105140.02	1279097.35	0	0	1	0	0	3	1	0	0	0	1	2	2	3	
'Rec87'	1105010.33	1278823.95	2	3	4	2	1	1	2	2	2	2	4	5	5	5	
'Rec88'	1105080.14	1278645.21	4	4	5	2	1	2	4	3	3	3	4	5	5	5	
'Rec89'	1105220.62	1278893.10	0	0	2	0	0	2	1	0	0	0	2	2	3	3	
'Rec90'	1105284.71	1278727.93	0	1	3	0	0	3	2	1	1	1	3	3	4	4	
'Rec91'	1105166.97	1278444.55	3	3	2	2	1	0	1	2	2	2	0	1	1	3	
'Rec92'	1105358.23	1278328.07	3	4	2	2	1	0	1	2	2	2	1	1	1	4	
'Rec93'	1105541.58	1278238.73	5	7	4	4	2	1	1	3	3	3	1	2	2	7	
'Rec94'	1105470.09	1278536.22	1	1	6	1	1	4	3	1	2	1	4	5	6	6	
'Rec95'	1105711.95	1278436.69	0	2	3	1	1	4	2	1	1	1	3	2	3	4	
'Rec96'	1105874.37	1278267.42	0	0	2	0	0	1	1	0	0	0	2	2	3	3	
'Rec97'	1105914.49	1277949.62	3	3	1	2	1	1	1	1	2	2	1	1	1	3	
'Rec98'	1106141.24	1278053.31	0	0	2	0	0	2	1	0	1	0	2	3	3	3	
'Rec99'	1106103.83	1277796.70	2	2	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	2	
'Rec00'	1106375.09	1277866.17	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	
<b>Máximo Hora =</b>			<b>21</b>	<b>23</b>	<b>35</b>	<b>25</b>	<b>21</b>	<b>27</b>	<b>20</b>	<b>26</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>28</b>	<b>34</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	

Tabla F4 Concentraciones horarias de PM<sub>10</sub> (µgr / m<sup>3</sup>) por receptor. Condiciones actuales.

Receptor	Coordenadas		HORA DEL DIA															Máximo Receptor
	E	N	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18			
'Rec1'	1104820.54	1279558.97	1.1	1.2	2.1	1.0	0.7	1.8	0.9	1.0	1.0	1.1	2.2	2.5	2.5	2.5		
'Rec2'	1104850.23	1279569.67	0.1	0.2	1.1	0.1	0.2	1.7	0.8	0.0	0.3	0.3	1.5	1.8	1.8	1.8		
'Rec3'	1104843.56	1279492.81	2.1	2.8	2.8	2.2	1.4	3.1	2.1	1.7	2.2	2.1	2.7	3.1	3.2	3.2		
'Rec4'	1104876.97	1279495.42	2.8	3.7	3.6	2.4	1.6	3.7	1.5	2.0	2.5	2.4	3.1	3.5	3.8	3.8		
'Rec5'	1104889.31	1279463.75	0.7	1.2	0.6	1.1	0.5	2.1	1.2	0.6	0.7	0.7	1.1	1.3	1.1	2.1		
'Rec6'	1104855.69	1279460.73	1.8	2.6	1.5	2.4	1.4	1.2	1.0	1.7	1.9	2.1	1.3	1.6	1.5	2.6		
'Rec7'	1104923.90	1279297.86	0.8	0.9	1.2	0.7	0.5	0.7	0.5	0.6	0.7	0.7	1.0	1.1	1.1	1.2		
'Rec8'	1104954.49	1279305.27	0.0	0.0	0.5	0.0	0.1	0.8	0.4	0.0	0.1	0.1	0.7	0.7	0.7	0.8		
'Rec9'	1104991.46	1279131.23	0.3	0.4	0.6	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3	0.4	0.4	0.7	0.7		
'Rec10'	1105021.65	1279138.48	0.0	0.0	0.4	0.0	0.1	0.5	0.4	0.0	0.0	0.1	0.6	0.5	0.8	0.8		
'TELEB'	1105057.07	1278963.90	0.7	0.9	1.2	1.1	1.0	1.8	1.4	1.2	0.9	1.0	1.1	1.3	1.8	1.8		
'Rec12'	1105087.06	1278972.80	0.4	0.7	1.7	1.3	1.3	2.3	1.8	1.1	1.0	0.9	1.5	1.6	2.2	2.3		
'Rec13'	1105097.70	1278945.25	0.0	0.0	0.4	0.2	0.2	2.0	1.4	0.1	0.1	0.1	0.7	0.9	1.0	2.0		
'Rec14'	1105068.23	1278935.60	1.2	1.3	0.6	1.2	0.7	0.6	0.6	0.9	0.7	0.7	0.6	0.7	1.1	1.3		
'Rec15'	1105119.51	1278806.37	0.3	0.5	0.8	0.4	0.2	0.4	0.3	0.3	0.4	0.2	0.7	1.0	1.4	1.4		
'SKALA'	1105150.78	1278812.07	0.0	0.1	0.6	0.1	0.1	0.6	0.4	0.1	0.1	0.0	0.8	1.0	1.4	1.4		
'Rec17'	1105158.10	1278707.25	0.9	1.1	1.3	0.6	0.3	0.7	0.6	1.0	1.0	0.8	1.6	2.2	2.7	2.7		
'Rec18'	1105186.51	1278718.84	0.2	0.4	0.7	0.2	0.1	0.7	0.6	0.3	0.3	0.2	1.0	1.4	1.6	1.6		
'Rec19'	1105202.02	1278592.58	1.8	1.9	2.2	1.6	1.6	2.1	1.7	2.1	2.4	2.0	2.7	3.2	4.0	4.0		
'Rec20'	1105230.34	1278603.79	2.5	2.5	2.2	1.5	1.2	2.4	2.1	1.9	2.0	1.9	2.3	2.3	2.7	2.7		
'Rec21'	1105242.94	1278575.91	0.2	0.4	0.7	0.4	0.4	1.7	1.3	0.3	0.4	0.3	1.3	1.3	1.7	1.7		
'Rec22'	1105214.05	1278564.71	1.3	1.6	1.4	1.4	1.0	0.8	0.7	1.7	1.4	1.2	1.6	2.0	2.5	2.5		
'Rec23'	1105369.15	1278423.78	1.0	1.4	0.9	0.7	0.4	0.2	0.2	0.9	0.9	0.8	0.5	0.7	0.8	1.4		
'Rec24'	1105377.54	1278460.09	1.3	1.4	1.7	0.7	0.4	0.8	0.6	0.7	0.7	0.9	1.3	1.8	2.3	2.3		
'Rec25'	1105514.08	1278370.29	1.7	2.4	2.2	1.5	0.7	0.7	1.3	1.8	1.8	1.6	1.5	2.0	3.0	3.0		
'Rec26'	1105557.17	1278446.20	0.7	1.4	2.3	0.7	0.4	1.2	1.0	0.7	0.8	0.6	1.9	2.1	2.8	2.8		
'Rec27'	1105588.87	1278454.23	1.2	2.2	3.9	1.3	0.8	2.7	1.7	1.3	1.4	1.1	2.6	3.1	3.6	3.9		
'Rec28'	1105628.25	1278380.27	1.0	1.3	2.8	0.7	0.7	3.1	1.9	0.9	1.1	1.0	2.6	3.1	4.1	4.1		
'Rec29'	1105681.12	1278258.76	0.8	1.8	1.3	1.8	1.1	2.3	1.2	1.2	1.3	1.2	1.1	1.6	2.3	2.3		
'Rec31'	1105766.75	1278190.24	1.0	1.4	1.3	0.9	0.5	0.6	0.9	1.1	1.2	1.3	1.3	1.6	2.3	2.3		
'Rec32'	1105787.19	1278215.79	0.3	0.3	2.1	0.4	0.4	1.4	0.9	0.5	0.7	0.9	2.0	2.0	2.6	2.6		
'Rec33'	1105924.20	1278064.03	2.3	2.5	2.3	1.3	1.0	0.8	1.1	1.2	1.6	1.6	1.7	1.9	2.6	2.6		
'Rec34'	1105944.07	1278088.96	0.9	0.5	2.7	0.6	0.7	1.4	1.1	0.6	1.2	1.0	2.4	2.6	3.1	3.1		
'Rec36'	1106066.18	1277991.65	1.5	1.2	3.5	1.1	0.9	2.1	1.9	1.0	1.6	1.5	3.1	3.6	4.4	4.4		
Rec37'	1106189.00	1277893.54	0.5	0.3	2.2	0.6	0.7	1.4	1.0	0.6	1.1	0.9	1.9	2.0	2.3	2.3		
'Rec38'	1106117.55	1277907.44	3.3	3.6	2.2	2.3	1.5	0.9	1.3	2.1	2.6	2.5	1.2	1.5	1.9	3.6		
'Rec39'	1106252.59	1277799.24	1.7	1.9	1.5	1.2	0.9	0.7	1.0	1.1	1.5	1.5	1.0	1.1	1.5	1.9		
'Rec40'	1106273.29	1277826.00	0.4	0.3	2.2	0.5	0.7	1.3	1.0	0.5	0.9	0.9	1.8	1.9	2.2	2.2		
'Rec41'	1104791.18	1279506.41	1.3	1.4	1.5	1.4	0.6	1.3	0.6	1.0	1.2	1.3	1.4	1.6	1.5	1.6		
'Rec42'	1104907.68	1279542.95	0.3	0.4	0.5	0.3	0.1	1.1	0.3	0.2	0.4	0.4	0.6	0.7	0.7	1.1		
'Rec43'	1104845.87	1279367.69	0.3	0.3	0.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.5		
'Rec44'	1104954.15	1279424.40	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2		
'Rec45'	1104996.37	1278995.42	0.3	0.3	0.5	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	0.1	0.5	0.6	0.8	0.8		
'Rec46'	1105112.15	1279031.79	0.0	0.0	0.4	0.1	0.1	0.5	0.3	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.7	0.7		
'Rec47'	1105040.80	1278882.71	0.1	0.3	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.4	0.6	0.8	0.8		
'Rec48'	1105156.03	1278920.59	0.0	0.0	0.4	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.3	0.3	0.5	0.5		
'Rec49'	1105144.33	1278617.39	1.2	1.4	1.3	0.6	0.5	0.5	0.4	1.2	1.1	1.0	1.0	1.5	1.7	1.7		
'Rec50'	1105256.09	1278662.59	0.4	0.5	0.8	0.3	0.3	0.5	0.5	0.3	0.4	0.4	0.9	0.9	1.2	1.2		

Tabla F5 Concentraciones horarias de CO (ppm) por receptor. Proyección con SITM.

Receptor	Coordenadas		HORA DEL DIA															Máximo Receptor
	E	N	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18			
'Rec51'	1105191.75	1278507.79	0.7	0.8	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.3	0.1	0.3	0.6	0.8		
'Rec52'	1105307.00	1278552.50	0.2	0.4	1.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.8	0.9	1.2	1.2		
'Rec53'	1105583.12	1278271.29	2.5	3.2	2.5	1.9	1.0	0.8	1.0	1.9	1.8	1.7	1.1	2.2	2.6	3.2		
'Rec54'	1105676.90	1278371.48	1.0	1.6	1.9	0.9	0.6	2.0	1.4	1.0	1.0	0.9	2.2	2.5	3.3	3.3		
'Rec55'	1105757.19	1278140.26	0.5	0.7	0.5	0.4	0.2	0.4	0.2	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.7		
'Rec56'	1105773.94	1278284.45	0.0	0.1	0.6	0.2	0.1	0.5	0.2	0.1	0.1	0.0	0.7	0.7	1.0	1.0		
'Rec57'	1106008.64	1277937.70	2.2	2.3	0.9	1.1	0.6	0.5	0.7	1.0	1.4	1.3	0.6	0.9	1.2	2.3		
'Rec58'	1106134.09	1277995.07	0.6	0.5	1.8	0.2	0.4	1.3	0.9	0.3	0.6	0.7	1.6	2.0	2.5	2.5		
'Rec59'	1106111.05	1277854.99	0.6	0.7	0.3	0.5	0.4	0.1	0.2	0.4	0.6	0.4	0.1	0.1	0.1	0.7		
'Rec60'	1106253.56	1277899.47	0.0	0.0	0.6	0.0	0.1	0.4	0.3	0.0	0.1	0.1	0.6	0.6	0.7	0.7		
'Rec61'	1104748.08	1279316.77	0.2	0.2	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2		
'Rec62'	1105025.63	1279573.67	0.3	0.4	0.5	0.3	0.2	0.6	0.4	0.2	0.4	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6		
'Rec63'	1104892.07	1278969.99	0.1	0.2	0.3	0.1	0.1	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.2	0.4	0.5	0.5		
'Rec64'	1105253.40	1278960.65	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.2	0.3	0.5	0.5		
'Rec65'	1105105.49	1278474.34	0.2	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4		
'Rec66'	1105369.38	1278708.00	0.2	0.3	0.8	0.3	0.3	0.6	0.4	0.3	0.4	0.3	1.1	1.1	1.2	1.2		
'Rec67'	1105653.14	1278465.22	0.0	0.7	1.1	0.4	0.2	1.1	0.8	0.4	0.4	0.2	1.2	1.3	1.7	1.7		
'Rec68'	1105632.02	1278132.34	1.0	1.0	1.7	0.6	0.2	0.3	0.4	0.6	0.7	0.6	0.6	0.7	1.1	1.7		
'Rec69'	1105922.28	1278337.78	0.0	0.0	0.2	0.2	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.3	0.4	0.5	0.5		
'Rec70'	1106003.40	1277805.75	0.3	0.3	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.3		
'Rec71'	1106277.27	1278024.68	0.3	0.3	0.4	0.1	0.1	0.5	0.4	0.2	0.2	0.2	0.5	0.7	0.9	0.9		
'Rec72'	1104916.88	1279198.17	0.2	0.2	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.3		
'Rec73'	1105028.83	1279242.82	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.2		
'Rec74'	1105095.63	1278744.58	0.2	0.4	0.8	0.2	0.0	0.2	0.2	0.3	0.4	0.3	0.8	0.9	1.2	1.2		
'Rec75'	1105208.11	1278788.53	0.0	0.1	0.7	0.1	0.0	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.3	0.4	0.7	0.7		
'Rec76'	1105296.74	1278397.77	0.5	0.9	0.5	0.3	0.1	0.0	0.0	0.4	0.4	0.2	0.1	0.2	0.4	0.9		
'Rec77'	1105462.89	1278350.02	1.2	1.7	1.3	1.1	0.1	0.3	0.4	1.0	1.1	1.0	0.6	0.9	1.3	1.7		
'Rec78'	1105492.73	1278479.67	0.4	0.8	1.8	0.4	0.2	0.7	0.6	0.5	0.5	0.5	1.5	1.6	2.5	2.5		
'Rec79'	1105872.66	1278047.87	1.0	1.2	0.9	0.5	0.2	0.1	0.3	0.4	0.6	0.6	0.4	0.5	0.8	1.2		
'Rec80'	1105949.27	1278142.36	0.1	0.1	0.9	0.0	0.1	0.4	0.3	0.0	0.2	0.1	0.9	1.1	1.3	1.3		
'Rec81'	1104735.84	1279513.32	0.8	1.0	0.8	0.6	0.0	1.2	0.1	0.2	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	1.2		
'Rec82'	1104941.80	1279595.77	0.2	0.2	0.4	0.2	0.0	0.4	0.1	0.0	0.3	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4		
'Rec83'	1104820.75	1279298.24	0.2	0.2	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.3		
'Rec84'	1104928.93	1279030.44	0.1	0.1	0.4	0.1	0.0	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4		
'Rec85'	1105022.96	1279388.53	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1		
'Rec86'	1105140.02	1279097.35	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.4	0.4		
'Rec87'	1105010.33	1278823.95	0.1	0.2	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.4	0.5	0.8	0.8		
'Rec88'	1105080.14	1278645.21	0.6	0.8	0.8	0.2	0.0	0.2	0.2	0.4	0.5	0.3	0.5	0.6	0.9	0.9		
'Rec89'	1105220.62	1278893.10	0.0	0.0	0.4	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.3	0.3	0.5	0.5		
'Rec90'	1105284.71	1278727.93	0.2	0.3	0.7	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.7	0.6	1.2	1.2		
'Rec91'	1105166.97	1278444.55	0.4	0.6	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.6		
'Rec92'	1105358.23	1278328.07	0.7	1.2	0.6	0.4	0.1	0.0	0.0	0.3	0.2	0.4	0.1	0.2	0.4	1.2		
'Rec93'	1105541.58	1278238.73	1.1	2.0	1.4	1.3	0.5	0.2	0.4	1.1	1.0	0.9	0.3	0.6	0.9	2.0		
'Rec94'	1105470.09	1278536.22	0.3	0.7	1.3	0.4	0.2	0.3	0.2	0.3	0.4	0.2	1.0	1.2	1.6	1.6		
'Rec95'	1105711.95	1278436.69	0.1	1.0	1.0	0.5	0.3	1.2	0.8	0.7	0.6	0.4	1.1	0.7	1.0	1.2		
'Rec96'	1105874.37	1278267.42	0.0	0.0	0.4	0.1	0.1	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.4	0.6	0.7	0.7		
'Rec97'	1105914.49	1277949.62	1.2	1.4	0.4	0.5	0.2	0.2	0.2	0.5	0.7	0.5	0.3	0.4	0.6	1.4		
'Rec98'	1106141.24	1278053.31	0.3	0.2	0.7	0.1	0.0	0.6	0.4	0.1	0.2	0.1	1.0	1.2	1.4	1.4		
'Rec99'	1106103.83	1277796.70	0.4	0.5	0.0	0.2	0.2	0.0	0.0	0.2	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.5		
'Rec00'	1106375.09	1277866.17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2		
<b>Máximo Hora =</b>			3.3	3.7	3.9	2.4	1.6	3.7	2.1	2.1	2.6	2.5	3.1	3.6	4.4	<b>4.4</b>		

Tabla F6 Concentraciones horarias de CO (ppm) por receptor. Proyección con SITM.

Receptor	Coordenadas		HORA DEL DIA															Máximo Receptor
	E	N	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18			
'Rec1'	1104820.54	1279558.97	2	2	4	2	1	3	2	1	2	2	4	5	5	5		
'Rec2'	1104850.23	1279569.67	0	1	2	1	0	3	2	1	1	1	2	3	3	3		
'Rec3'	1104843.56	1279492.81	4	6	5	4	3	7	4	3	4	4	5	6	6	7		
'Rec4'	1104876.97	1279495.42	9	11	11	7	4	13	5	6	7	7	9	10	11	13		
'Rec5'	1104889.31	1279463.75	1	2	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2		
'Rec6'	1104855.69	1279460.73	3	4	2	4	3	2	1	3	3	3	2	2	2	4		
'Rec7'	1104923.90	1279297.86	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2		
'Rec8'	1104954.49	1279305.27	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1		
'Rec9'	1104991.46	1279131.23	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1		
'Rec10'	1105021.65	1279138.48	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1		
'TELEB'	1105057.07	1278963.90	2	2	2	1	2	1	1	2	1	1	1	2	2	2		
'Rec12'	1105087.06	1278972.80	0	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	2	2	2		
'Rec13'	1105097.70	1278945.25	0	0	1	0	0	2	1	0	0	0	1	1	1	2		
'Rec14'	1105068.23	1278935.60	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2		
'Rec15'	1105119.51	1278806.37	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	2	2		
'SKALA'	1105150.78	1278812.07	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1		
'Rec17'	1105158.10	1278707.25	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	3		
'Rec18'	1105186.51	1278718.84	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	2	2		
'Rec19'	1105202.02	1278592.58	2	2	3	2	2	3	2	2	2	2	3	4	4	4		
'Rec20'	1105230.34	1278603.79	3	3	3	2	2	3	2	3	3	2	3	3	4	4		
'Rec21'	1105242.94	1278575.91	1	1	1	1	1	2	1	1	1	0	1	1	2	2		
'Rec22'	1105214.05	1278564.71	1	2	2	2	1	1	1	2	2	1	1	2	3	3		
'Rec23'	1105369.15	1278423.78	1	2	2	1	0	0	1	1	1	1	1	2	2	2		
'Rec24'	1105377.54	1278460.09	2	2	2	1	0	1	1	1	1	1	2	2	3	3		
'Rec25'	1105514.08	1278370.29	2	3	3	2	1	1	1	2	2	2	2	4	5	5		
'Rec26'	1105557.17	1278446.20	2	3	4	1	1	2	1	1	2	1	3	4	5	5		
'Rec27'	1105588.87	1278454.23	3	4	7	3	2	5	3	3	3	2	4	6	6	7		
'Rec28'	1105628.25	1278380.27	2	2	5	1	1	6	3	1	2	1	5	7	7	7		
'Rec29'	1105681.12	1278258.76	1	2	2	2	1	6	2	1	1	1	3	3	6	6		
'Rec31'	1105766.75	1278190.24	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2		
'Rec32'	1105787.19	1278215.79	0	0	2	0	0	1	1	0	1	1	2	2	2	2		
'Rec33'	1105924.20	1278064.03	2	2	2	1	1	1	1	1	2	1	1	2	3	3		
'Rec34'	1105944.07	1278088.96	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	3		
'Rec36'	1106066.18	1277991.65	1	1	3	1	1	2	1	1	2	1	3	4	5	5		
'Rec37'	1106189.00	1277893.54	0	0	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2		
'Rec38'	1106117.55	1277907.44	3	4	2	2	2	1	1	2	2	2	1	1	2	4		
'Rec39'	1106252.59	1277799.24	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2		
'Rec40'	1106273.29	1277826.00	0	0	2	0	1	1	1	0	1	1	2	2	2	2		
'Rec41'	1104791.18	1279506.41	2	3	3	2	1	3	2	2	2	2	3	3	3	3		
'Rec42'	1104907.68	1279542.95	1	1	1	1	1	3	1	0	1	1	1	2	2	3		
'Rec43'	1104845.87	1279367.69	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1		
'Rec44'	1104954.15	1279424.40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
'Rec45'	1104996.37	1278995.42	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1		
'Rec46'	1105112.15	1279031.79	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1		
'Rec47'	1105040.80	1278882.71	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1		
'Rec48'	1105156.03	1278920.59	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1		
'Rec49'	1105144.33	1278617.39	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	3		
'Rec50'	1105256.09	1278662.59	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	2	2	2		

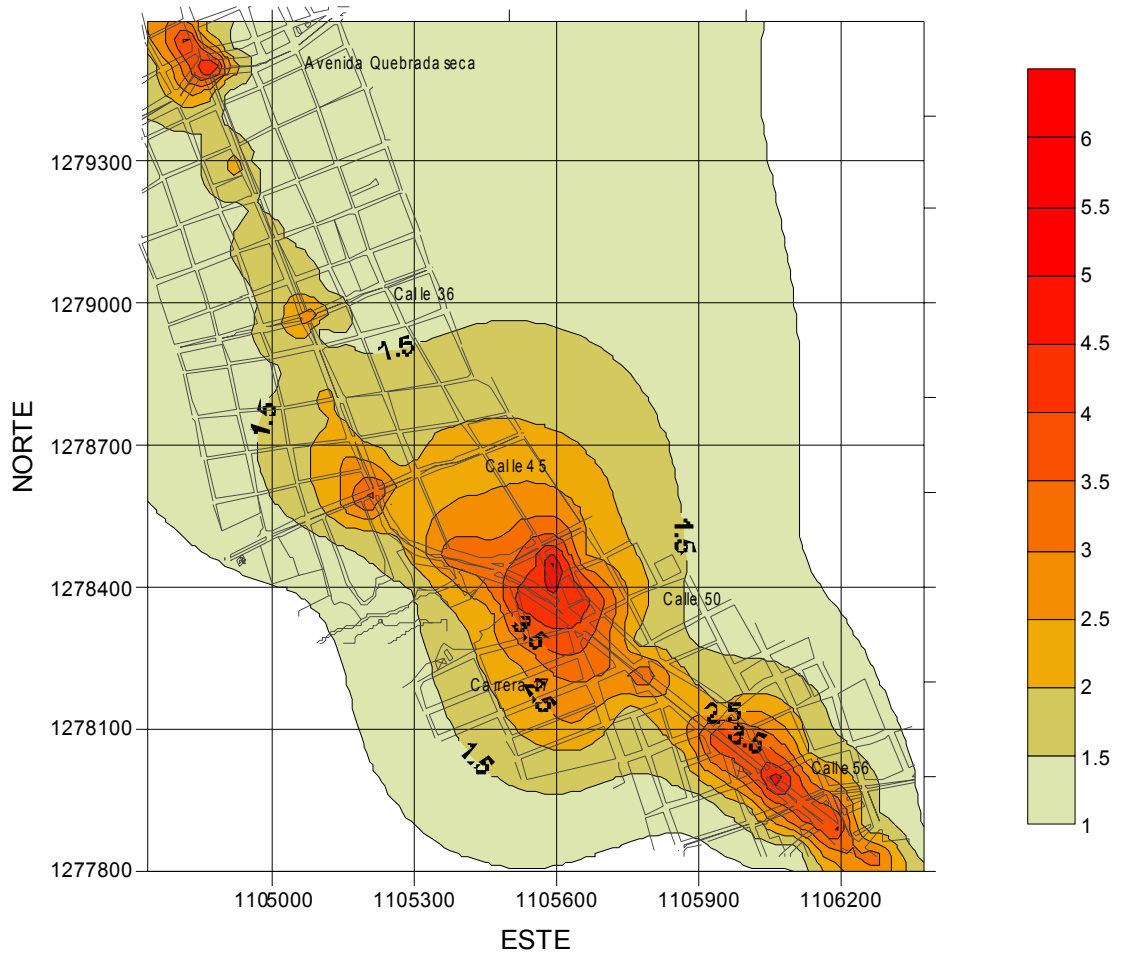
Tabla F7 Concentraciones horarias de  $PM_{10}$  ( $\mu\text{gr} / \text{m}^3$ ) por receptor. Proyección con SITM.

Receptor	Coordenadas		HORA DEL DIA															Máximo Receptor
	E	N	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18			
'Rec51'	1105191.75	1278507.79	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1		
'Rec52'	1105307.00	1278552.50	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	2	2		
'Rec53'	1105583.12	1278271.29	4	5	5	3	2	2	2	3	3	3	3	5	6	6		
'Rec54'	1105676.90	1278371.48	2	3	3	2	1	3	2	2	2	1	3	4	4	4		
'Rec55'	1105757.19	1278140.26	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1		
'Rec56'	1105773.94	1278284.45	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1		
'Rec57'	1106008.64	1277937.70	2	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3		
'Rec58'	1106134.09	1277995.07	1	1	2	0	0	1	1	1	1	1	2	2	3	3		
'Rec59'	1106111.05	1277854.99	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1		
'Rec60'	1106253.56	1277899.47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1		
'Rec61'	1104748.08	1279316.77	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
'Rec62'	1105025.63	1279573.67	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1		
'Rec63'	1104892.07	1278969.99	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1		
'Rec64'	1105253.40	1278960.65	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1		
'Rec65'	1105105.49	1278474.34	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1		
'Rec66'	1105369.38	1278708.00	0	1	2	0	0	1	1	1	1	1	1	2	2	2		
'Rec67'	1105653.14	1278465.22	0	1	2	1	0	2	1	1	1	0	2	2	2	2		
'Rec68'	1105632.02	1278132.34	1	2	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	4		
'Rec69'	1105922.28	1278337.78	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1		
'Rec70'	1106003.40	1277805.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
'Rec71'	1106277.27	1278024.68	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1		
'Rec72'	1104916.88	1279198.17	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1		
'Rec73'	1105028.83	1279242.82	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1		
'Rec74'	1105095.63	1278744.58	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2		
'Rec75'	1105208.11	1278788.53	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1		
'Rec76'	1105296.74	1278397.77	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1		
'Rec77'	1105462.89	1278350.02	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2		
'Rec78'	1105492.73	1278479.67	1	2	3	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	3		
'Rec79'	1105872.66	1278047.87	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1		
'Rec80'	1105949.27	1278142.36	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1		
'Rec81'	1104735.84	1279513.32	2	2	2	1	1	3	1	1	1	1	1	2	1	3		
'Rec82'	1104941.80	1279595.77	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1		
'Rec83'	1104820.75	1279298.24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
'Rec84'	1104928.93	1279030.44	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1		
'Rec85'	1105022.96	1279388.53	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1		
'Rec86'	1105140.02	1279097.35	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1		
'Rec87'	1105010.33	1278823.95	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1		
'Rec88'	1105080.14	1278645.21	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2		
'Rec89'	1105220.62	1278893.10	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1		
'Rec90'	1105284.71	1278727.93	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	2	2		
'Rec91'	1105166.97	1278444.55	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1		
'Rec92'	1105358.23	1278328.07	1	2	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	2		
'Rec93'	1105541.58	1278238.73	2	4	3	2	1	1	1	2	2	2	1	1	1	4		
'Rec94'	1105470.09	1278536.22	1	1	2	1	0	1	1	1	1	1	2	2	3	3		
'Rec95'	1105711.95	1278436.69	0	2	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	2		
'Rec96'	1105874.37	1278267.42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1		
'Rec97'	1105914.49	1277949.62	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1		
'Rec98'	1106141.24	1278053.31	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	2	2		
'Rec99'	1106103.83	1277796.70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
'Rec00'	1106375.09	1277866.17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
<b>Máximo Hora =</b>			<b>9</b>	<b>11</b>	<b>11</b>	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>13</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>13</b>		

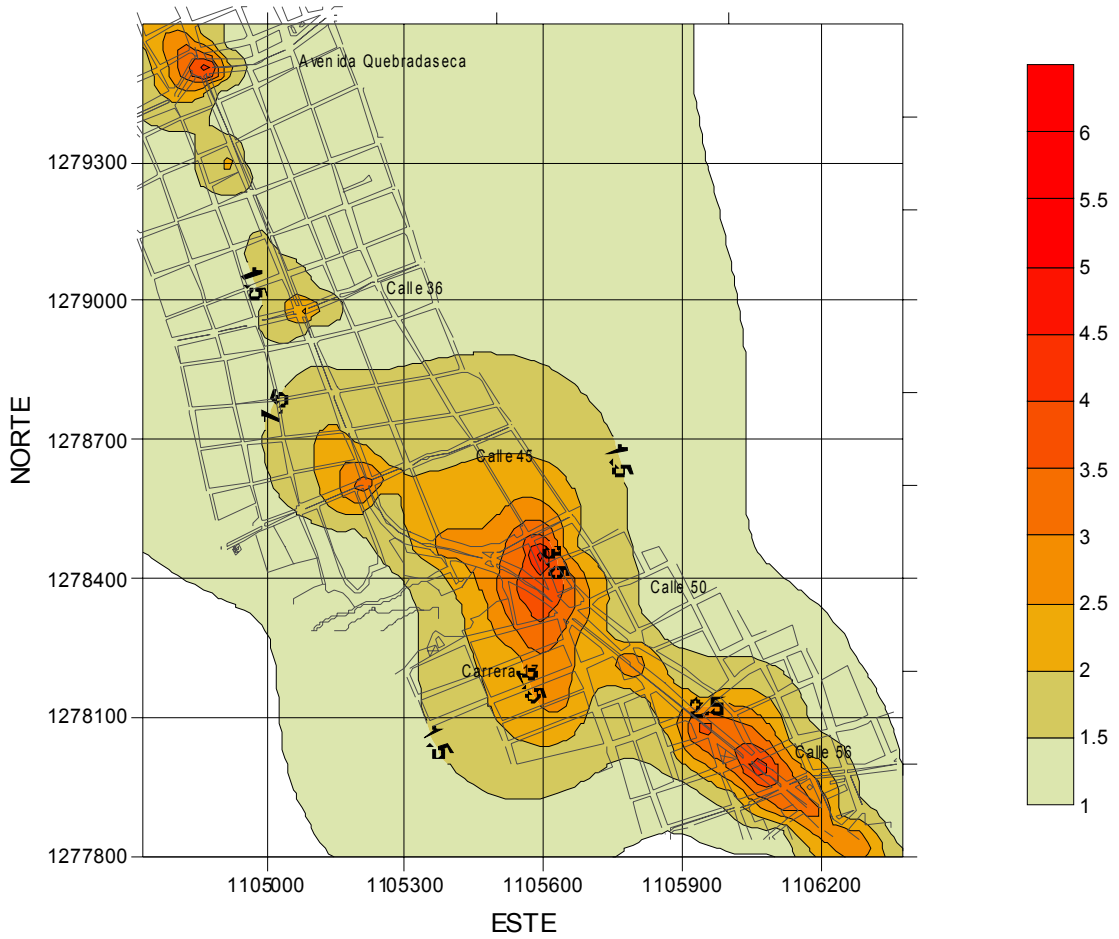
Tabla F8 Concentraciones horarias de PM10 ( $\mu\text{g} / \text{m}^3$ ) por receptor. Proyección con SITM

**ANEXO G**  
**CURVAS ISOPLETAS**

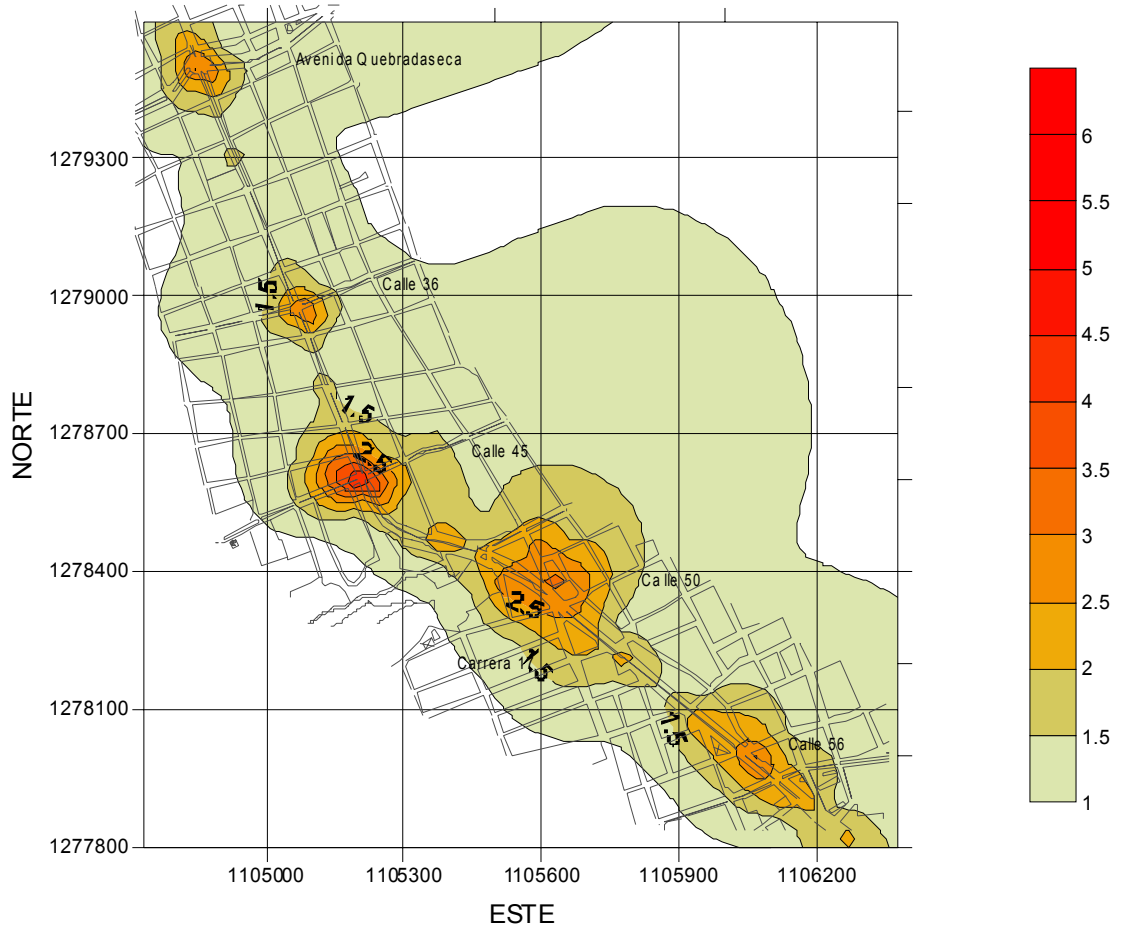
### Curvas Isopletas para el CO (ppm), Condiciones Actuales 8 AM



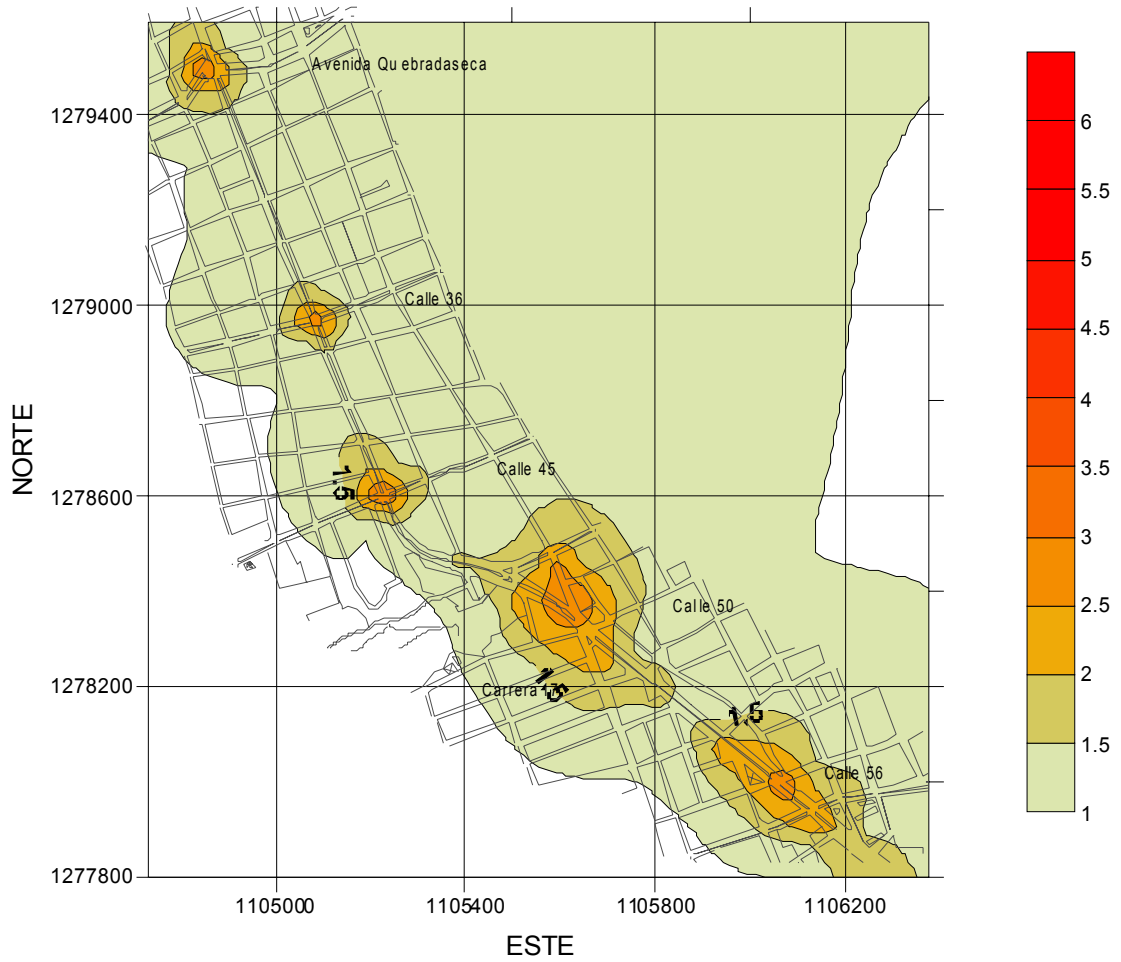
### Curvas Isopletas para el CO (ppm),SITM 8 AM



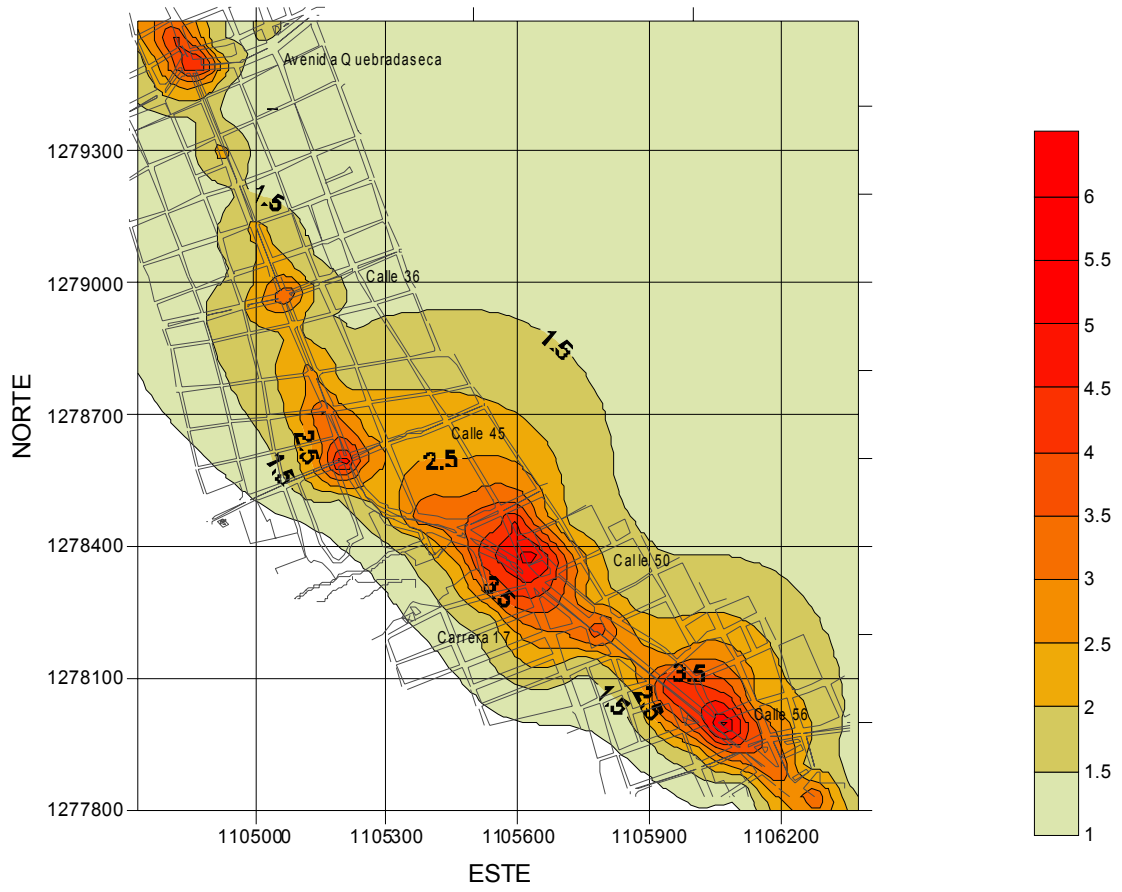
### Curvas Isopletas para el CO (ppm), Condiciones Actuales 12 PM



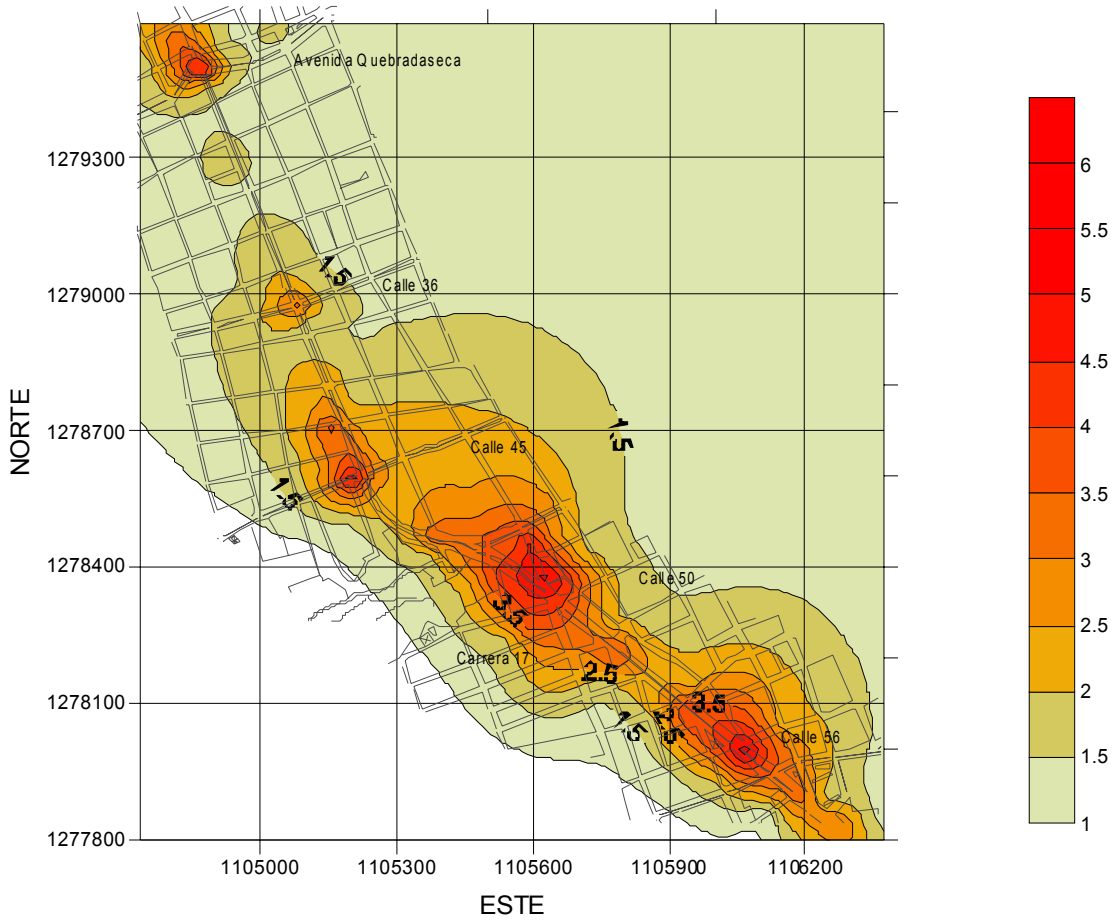
### Curvas Isopletas para el CO (ppm), SITM 12 PM



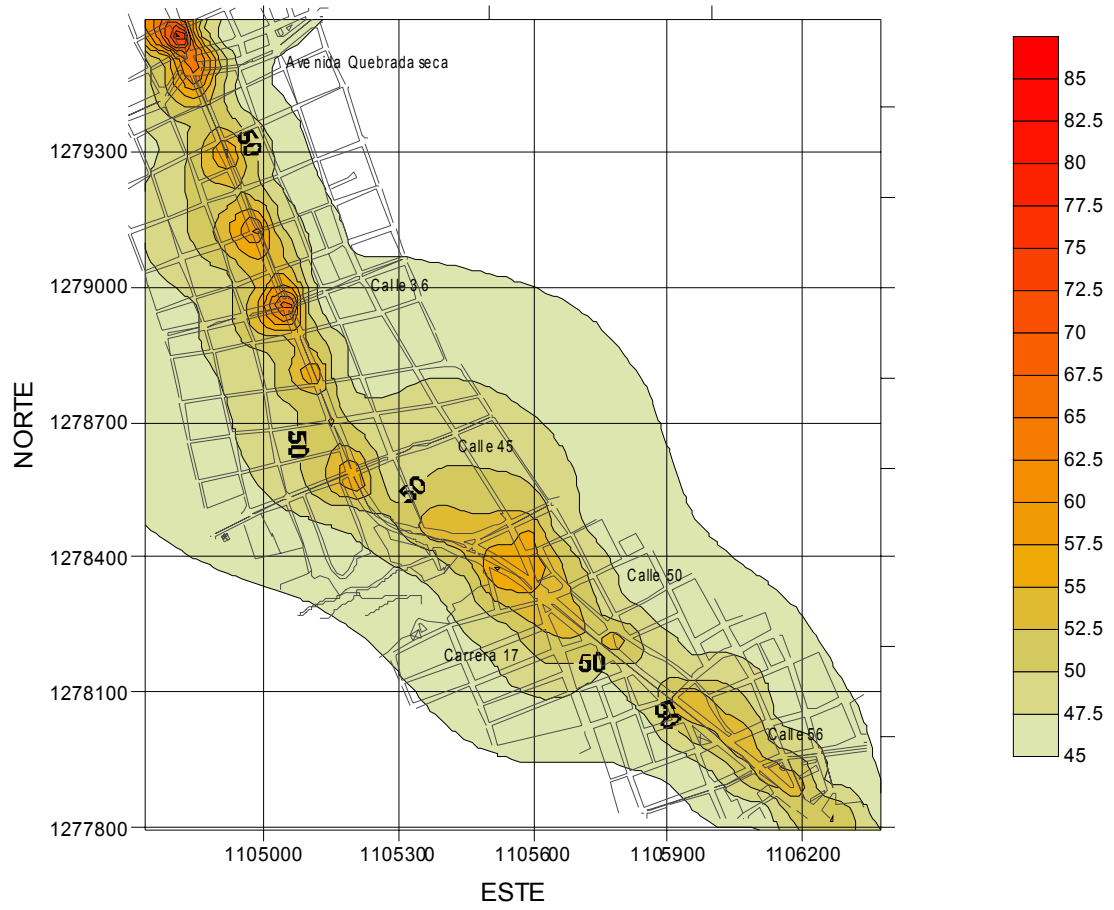
### Curvas Isopletas para el CO (ppm), Condiciones Actuales 6 PM



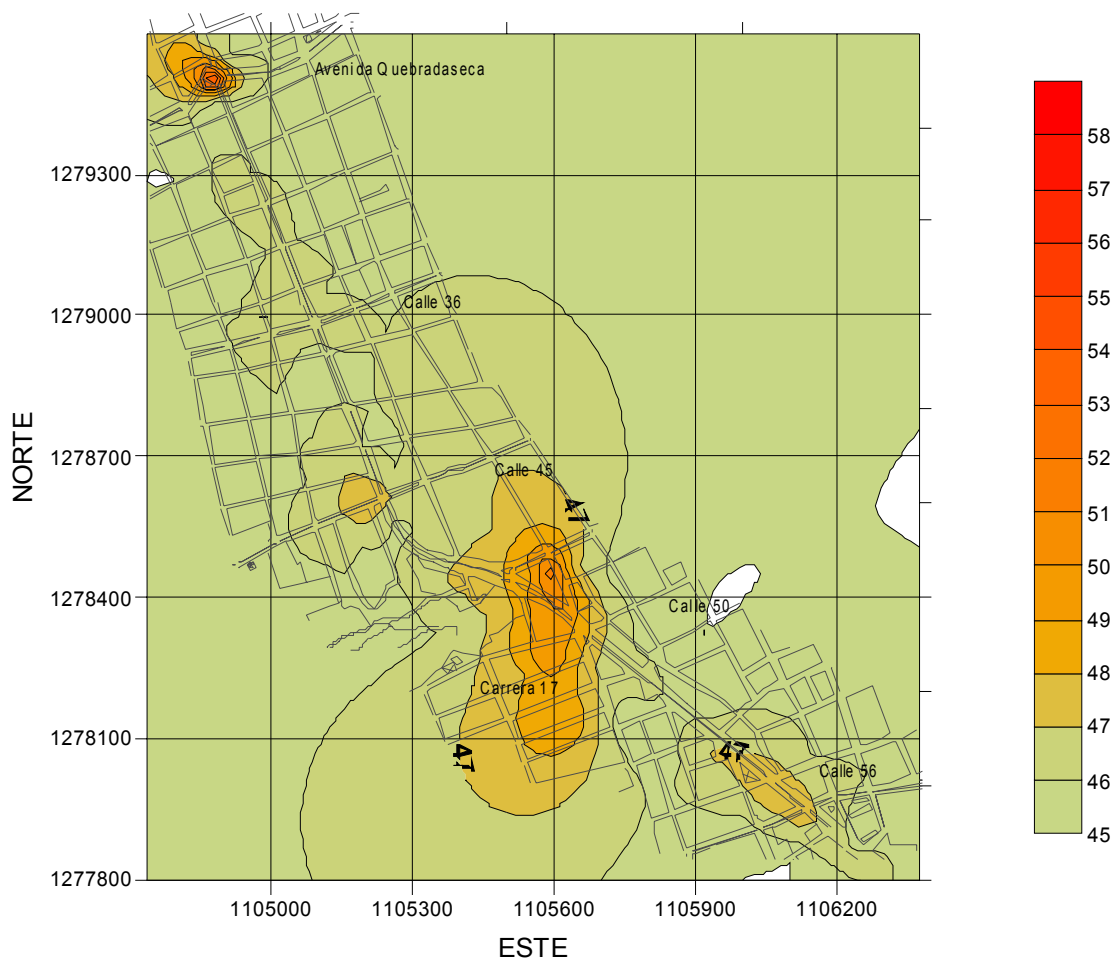
### Curvas Isopletas para el CO (ppm),SITM 6 PM



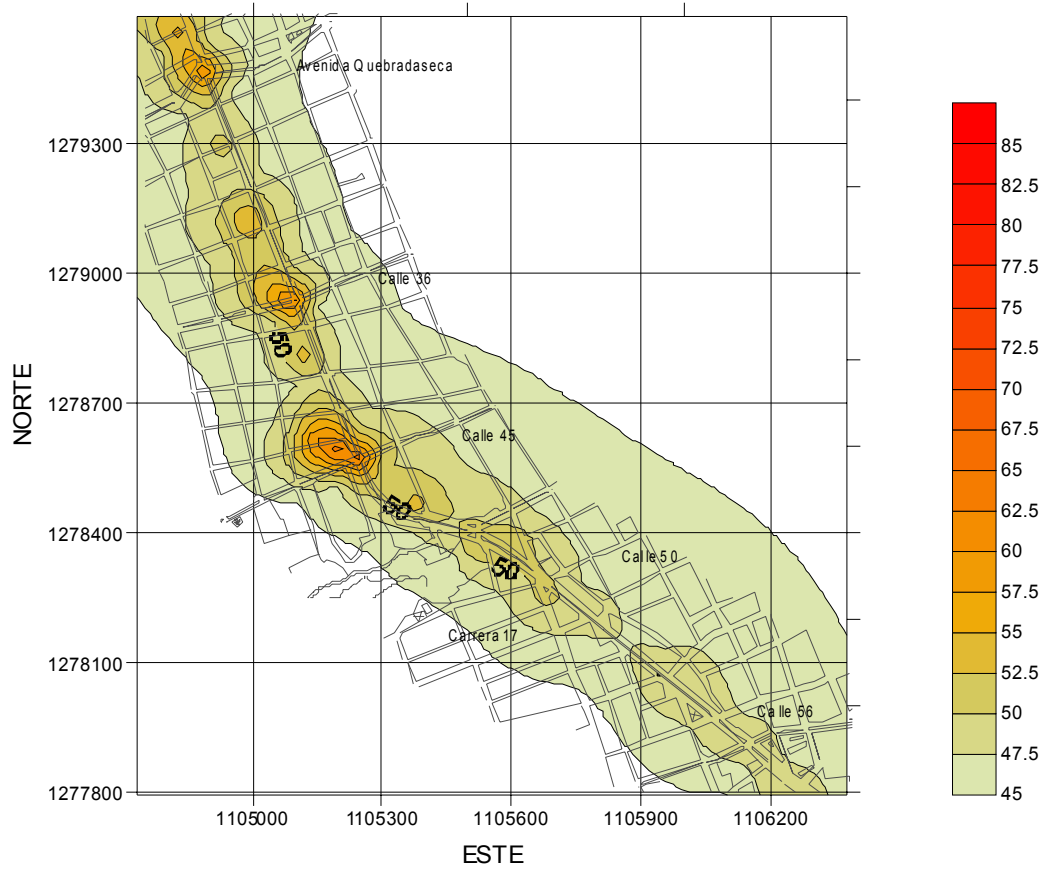
### Curvas Isopletas para el PM (microgr. / m3), Condiciones Actuales 8 AM



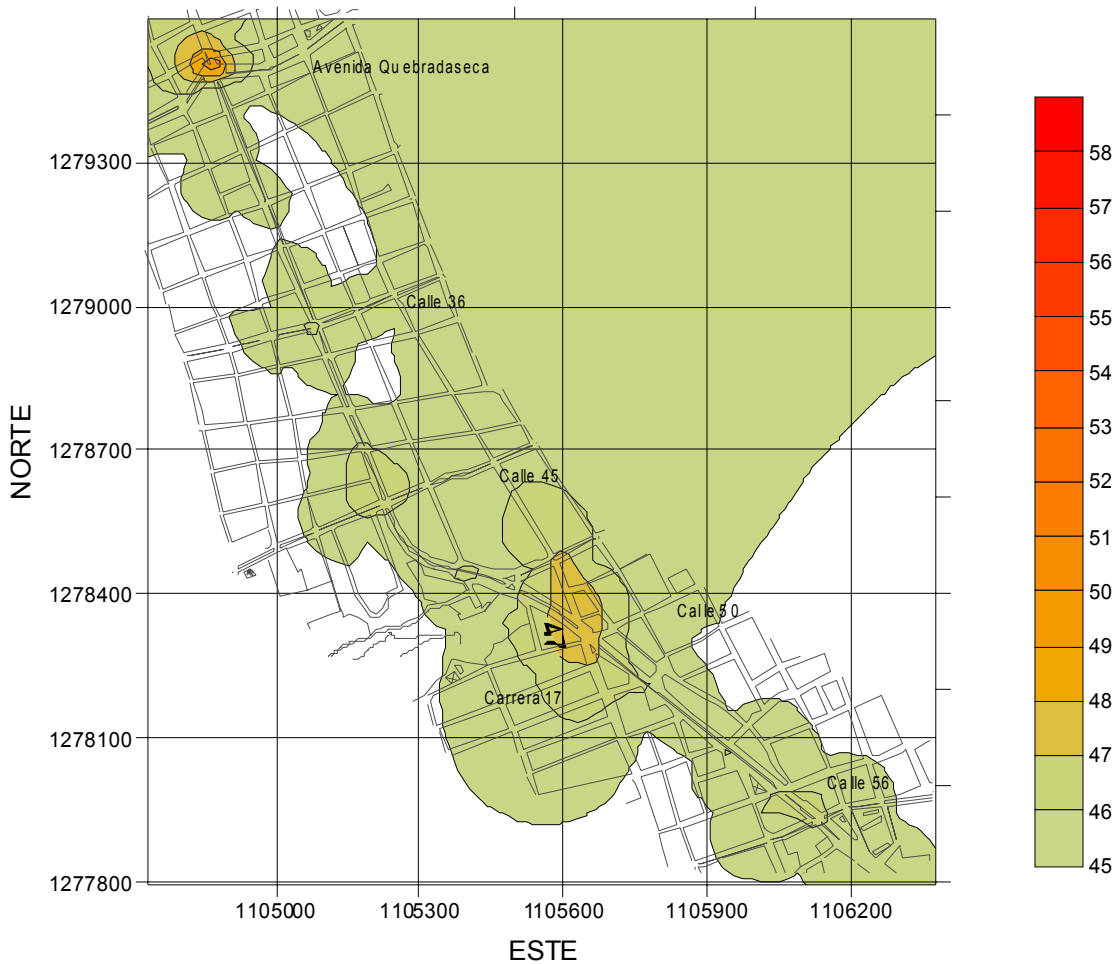
### Curvas Isopletas para el PM (microgr. / m3), SITM 8 AM



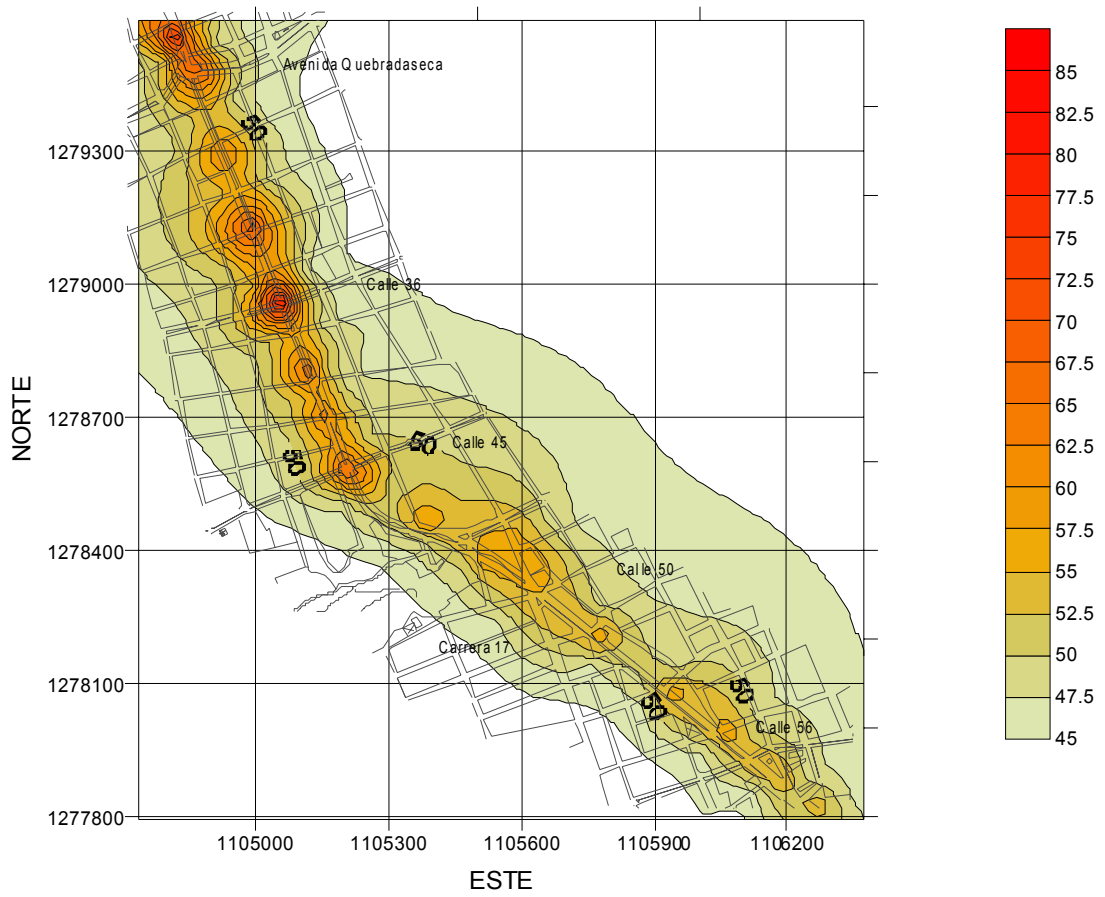
### Curvas Isopletas para el PM (microgr. / m3), Condiciones Actuales 12 PM



### Curvas Isopletas para el PM (microgr. / m3), SITM 12 PM



### Curvas Isopletas para el PM (microgr. / m3), Condiciones Actuales 6 PM



### Curvas Isopletas para el PM (microgr. / m3), SITM 6 PM

