

Contaminación del aire por tráfico automotor en el centro de Medellín

Por:

Ramiro Orrego P.*

Julián Bedoya V.**

1. INTRODUCCION

La ciudad de Medellín ha alcanzado un gran desarrollo industrial asociado con un crecimiento urbano muy dinámico y por ende con un incremento acelerado del parque automotor. Este desarrollo urbano, sin buena planeación, ha complicado bastante la vida urbana. Uno de los tantos problemas que afronta la ciudad es el de la pobre calidad de su aire pues la industria, el transporte y la quema de basuras (en Moravia) ponen todos su cuota de contaminación atmosférica y las condiciones meteorológicas y topográficas del Valle de Aburrá no permiten una rápida dispersión de estos contaminantes (Bedoya, 1980).

Un hecho que reviste gran importancia es la contaminación del aire en la zona central de la ciudad donde, debido a la concepción centralizada de la misma, se concentra gran parte de la actividad económica, política, social, cultural, comercial, con una gran afluencia de personas y de tráfico automotor. Aforos realizados por Planeación Metropolitana en 1978 estimaban una entrada promedio diaria de 1'008.532 personas a la zona central de Medellín, razón por la cual los estudios sobre contaminación en la zona son de gran interés.

En este trabajo se desarrolla una primera fase de identificación del problema existente en la zona central al estimar las emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes del tráfico automotor (Calle y Orrego, 1983). Luego se cuantifica la reducción de contaminantes al implementar diversas medidas de control. De esta manera se puede implementar una planeación urbana que además de otros factores también considere el de la calidad del aire.

En cuanto a la forma de trabajo utilizada se recurrió a mediciones del Municipio de Medellín y de la Universidad Pontificia Bolivariana para estudiar la calidad del aire existente en el centro; los flujos vehiculares se consultaron en los archivos de la Secretaría de Transportes y Tránsito de Medellín y se elaboró un inventario de los cruces más congestionados. Se recurrió al sistema que utiliza la EPA para estimar emisiones de automotores en condiciones similares a las existentes en Medellín. La aplicación de un sencillo modelo matemático permite estimar las concentraciones en la zona. Una continuidad en estos estudios permitirá ver qué tan acertados son los métodos de estimación, pero de momento se considera que el problema es mucho más serio de lo que se quiere aceptar.

2. AREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende la zona central de la ciudad de Medellín según aparece delimitada en la Figura 1. Esta zona tiene un área de 1,55 km² y se encuentra en la margen derecha del río Medellín ubicada entre las calles San Juan y Echeverri y entre las avenidas Oriental y del Ferrocarril. Las condiciones de viento son muy aleatorias en cuanto a su dirección y la velocidad es muy baja debido al encañonamiento del Valle y al alto número de edificaciones que obstaculizan el flujo libre del aire (rugosidad alta del suelo). Según el HIMAT en la ciudad se presenta un período de mucha calma entre las 5 am y las 12 m.

El uso del suelo en la zona central fue clasificado por el DANE (1981) como edificios comerciales 32,60/o, sector servicios un 25,30/o y vivienda un 23,70/o y el 190/o restante representa otras actividades. Esto indica que la zona concentra gran actividad comercial y de servicios lo cual genera gran cantidad de viajes por actividades de compras, banca, servicios profesionales, negocios y trabajo. Según la Dirección de Planeación Metropolitana (1980) alrededor de 111874 vehículos entran a la zona en un período de 13 horas (6 am - 7 pm) de los cuales el 780/o son automóviles y motos; 160/o son buses y busetas, y 60/o son camiones de carga.

La principal fuente contaminante en la zona son los automotores aunque existen otras fuentes menores como son fogones de carbón y de petróleo, quema de basuras, chimeneas de hoteles y la actividad de construcción. Muestreos de calidad del aire hechos en forma continua desde 1976 por la Oficina de Saneamiento y Contaminación Ambiental del Municipio de Medellín revelan que la concentración de SO₂ y material particulado en suspensión no sobrepasan las normas colombianas para calidad del aire pero sí muestran una tendencia ascendente. La medición de material particulado se ha hecho por medio del reflectómetro, método que para Medellín parece subestimar la concentración de partículas en el aire. Otras mediciones hechas por la Universidad Pontificia Bolivariana muestran que la concentración de NO₂ (Capella, 1980) y de CO (Abad, 1979) fácilmente sobrepasan las normas colombianas de calidad del aire aunque la concentración de ozono (Capella, 1980) todavía cumple las normas colombianas vigentes (Ministerio de Salud Pública, 1982). Los estudios sobre calidad del aire en el área son limitados, especialmente, para O₃, NO₂ y CO, pues son mediciones puntuales que no cubren la totalidad de la zona y no cumplen las frecuencias mínimas de muestreo de acuerdo a la legislación colombiana sobre calidad del aire. A pesar de sus limitaciones los muestreos dan un indicio de lo que ocurre en la zona y lo más probable es que cada día se incrementa más el problema de la mala calidad del aire en la zona debido al incremento del parque automotor, a la ampliación de arterias que llevan a la zona central, y a la mayor congestión de automotores en el área.

* I.I. Universidad Nacional

** Ph.D. Universidad Nacional. Profesor Asociado

3. FACTORES DE EMISION

Para estimar la emisión de contaminantes atmosféricos de origen automotor se requiere determinar un factor de emisión que exprese para un vehículo determinado la cantidad de contaminante por kilómetro recorrido. En este trabajo los factores de emisión se determinaron según el "Federal Test Procedure" dado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, 1977). Este método se utiliza debido a que en Colombia no se han evaluado las emisiones en el escape de los vehículos (aunque parece que dentro de poco se podrá hacer al menos parcialmente en las nuevas instalaciones de Transportes y Tránsito de Medellín) y éste resulta el único mecanismo aplicable de momento.

De acuerdo a las condiciones del método de la EPA para el cálculo de los factores de emisión se consideraron las siguientes condiciones para el caso del Centro de Medellín.

- Temperatura ambiente promedio de 24°C
- Buses, busetas y camiones trabajan el 100 por ciento del tiempo en caliente; los autos (incluyendo taxis) se supone que trabajan el 20 por ciento en frío y el 80 por ciento en caliente.
- La velocidad se estima en 10 km/h para buses y busetas, 12 km/h para camiones y en 14 km/h para autos según determinaciones de la Secretaría de Transportes y Tránsito de Medellín.
- La mayor dificultad para aplicar el método se encuentra en la equivalencia de los modelos de carros americanos con calefacción y/o aire acondicionado y generalmente de mayor tamaño que los utilizados en el medio colombiano. cualquier suposición que se haga en este sentido peca cuando menos de atrevida. Se hizo una suposición de que la mayor antigüedad del parque automotor colombiano y la carencia de normas de emisión para automotores equilibraba las mayores emisiones de carros americanos. Esta suposición parece ser de hecho una de las principales limitantes en la aplicación del método de la EPA.

Los factores de emisión para la zona central de Medellín calculados con base en el método de la EPA y teniendo en cuenta la composición del parque automotor por modelos se presentan en la Tabla 1. Una explicación más detallada del procedimiento utilizado para el cálculo de los factores de emisión se puede consultar en el Trabajo Dirigido de Grado de Juan Guillermo Calle y Ramiro Orrego P. presentado en 1983 en la Facultad Nacional de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, Sede de Medellín.

4. CUANTIFICACION DE EMISIONES

Para estudiar las emisiones en el centro de Medellín se analizaron 23 cruces, 12 tramos de vías arterias y toda la zona central. Los cruces y arterias consideradas fueron las de mayor flujo vehicular (véase Figura 1) y se cuantificó las emisiones para un período de 8,5 horas en el día, las cuales comprendían los siguientes períodos: 6:30 - 8:30 a.m.; 11:00 am. a 3.00 p.m.; y 5:30 a 8:00 p.m.. Existen algunos otros cruces y arterias que se debieron estudiar pero no se dispone de la información de tránsito por flujo vehicular.

Para estimar las emisiones en los cruces se consideró un trayecto de 100 m. Del flujo de buses y camiones, los que operan con motor a gasolina representan el 90 y 80 por ciento respectivamente. Teniendo en cuenta los flujos vehiculares calculados según datos suministrados por la Secretaría de Transportes y Tránsito y que se presentan en la Tabla 2, se calculó la emisión para los 23 cruces de mayor flujo vehicular como se aprecia en la misma tabla.

Las arterias consideradas aparecen en la Tabla 3 y en la Figura 1, las cuales ilustran el tramo considerado, longitud y flujo vehicular para 8,5 horas. Estas arterias son las más representativas por poseer mayor flujo vehicular y por ser las principales arterias que atraviesan en su mayoría el centro de la ciudad. La misma Tabla 3 ilustra la cuantificación de las emisiones aplicando los factores de emisión de la Tabla 1 para el caso de las arterias.

TABLA 1. Factores de Emisión para la Zona Central (1980)

Contaminante	Emisión gr/ km.					
	Buses				Camiones	
	Autos	Motos	Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel
Aldehídos (HCHO)	0,0786	0,068	0,18	0,20	0,18	0,20
Monóxido de Carbono (CO)	117,80	1,7	323,30	15,04	293,50	19,60
Hidrocarburos (HC)	6,53	10,12	45,70	3,6	38,29	3,85
Oxidos de Nitrógeno (NO)	1,905	0,075	3,90	17,55	4,01	16,01
Oxidos de Azufre (SO)	0,08	0,024	0,22	1,70	0,22	1,70
Partículas	0,33	0,21	0,74	0,99	0,74	0,99

TABLA 2. Estimativo de Emisiones de Origen Automotor para los Cruces de Mayor Flujo Vehicular (1980)

CRUCE	Flujo en 8,5 horas						EMISIONES (gr/8,5 horas)		
	Autos	Motos	Buses		Camiones		CO	HC	NO _x
			Gasol.	Diesel	Gasol.	Diesel			
1. Cr. 46 x Cl. 52	20816	867	2907	322	960	239	368.472	31.639	6.438
2. Cr. 51 x Cl. 53	15502	645	3224	358	414	103	300.140	27.301	5.177
3. Cr. 46 x Cl. 53	14792	616	1764	195	580	144	248.983	20.541	4.316
4. Cr. 51 x Cl. 50	9969	415	3280	364	433	108	237.015	23.750	4.167
5. Cr. 46 x Cl. 54	11239	468	1530	170	459	114	195.891	16.667	3.406
6. Cr. 46 x Cl. 57	9829	409	1701	189	521	130	186.679	16.719	3.288
7. Cr. 52 x Cl. 53	8223	346	1984	187	341	85	171.525	16.192	2.944
8. Cr. 55 x Cl. 49	7441	310	1782	198	493	123	160.328	15.323	2.857
9. Cr. 49 x Cl. 52	8351	347	1160	128	243	60	143.379	12.105	2.464
10. Cr. 53 x Cl. 53	5654	235	1722	191	315	78	132.002	13.104	2.337
11. Cr. 49 x Cl. 46	5315	221	1604	178	224	56	121.457	11.968	2.132
12. Cr. 55 x Cl. 51	4405	183	1559	173	278	69	110.879	11.340	1.818
13. Cr. 52 x Cl. 51	5861	244	463	51	238	59	91.230	7.141	1.578
14. Cr. 54 x Cl. 51	3954	164	1121	124	241	60	90.214	8.861	1.704
15. Cr. 54 x Cl. 53	3509	146	1330	147	157	39	89.265	9.194	1.572
16. Cr. 50 x Cl. 53	5765	240	500	55	104	26	87.304	6.720	1.475
17. Cr. 52 x Cl. 45	3542	147	946	105	408	102	84.667	8.424	1.560
18. Cr. 52 x Cl. 46	2724	415	608	67	229	57	58.750	5.900	1.060
19. Cr. 53 x Cl. 51	3240	135	344	38	140	34	53.544	4.387	930
20. Cr. 54 x Cl. 48	1633	68	805	89	239	59	52.538	5.784	972
21. Cr. 55 x Cl. 46	2194	91	297	33	504	126	50.552	4.872	996
22. Cr. 54 x Cl. 46	1595	66	545	60	369	92	47.521	5.069	917
23. Cr. 53 x Cl. 46	1492	62	540	59	230	62	42.005	4.431	790
TOTAL							3.124.340	287.432	54.898

TABLA 3. Estimativo de Emisiones para las Arterias con Mayor Flujo Vehicular (1980)

ARTERIA	TRAMO	Longitud (m)	Ancho (m)	Flujo en 8,5 horas						EMISIONES (gr/8,5 horas)		
				Buses		Camiones		CO	HC	NO _x		
				Autos	Motos	Gasol.	Diesel				Gasol. Dies.	
1. Av. Oriental	Cl. 46 - Cl. 56	1160	40	10.384	432	1472	158	504	126	1.418.900	182.490	36.590
2. Av. Bolívar	Cl. 46 - Cl. 53	790	30	6.313	263	1653	183	235	59	1.067.618	102.149	18.637
3. Av. Ayacucho	Cr. 52 - Cr. 56B	600	6	1.977	82	1484	164	352	88	492.186	57.579	9.155
4. Av. 1o. Mayo	Cr. 49 - Cr. 51	326	14	8.350	347	1159	129	242	60	470.330	39.390	7.860
5. Junín	Cl. 46 - Cl. 52	450	14	3.694	153	803	89	104	26	327.328	30.046	5.658
6. Carabobo	Cl. 46 - Cl. 54	790	10	2.116	88	317	35	118	29	308.210	26.770	5.260
7. Av. de Greiff	Cr. 51 - Cr. 55	360	20	3.025	126	803	89	115	29	236.500	22.470	3.970
8. Maracaibo	Cr. 46 - Cr. 51	520	6	3.032	126	92	10	59	15	210.542	14.368	3.534
9. Cúcuta	Cl. 46 - Cl. 54	720	10	646	27	342	38	86	21	154.530	16.850	2.710
10. La Playa	Cr. 46 - Cr. 49	200	20	4.613	192	591	65	117	36	154.166	12.785	2.659
11. Maturín	Cr. 46 - Cr. 55	730	12	760	32	214	8	120	30	143.070	14.420	2.410
12. Boyacá	Cr. 51 - Cr. 55	400	8	1.871	78	145	16	56	14	114.420	10.110	1.910
TOTAL:		7.046								5.097.800	539.427	100.353

En el cálculo de emisiones para la zona central se utilizaron los aforos de entrada de vehículos a la zona dados por la Dirección de Desarrollo Metropolitano (realizados en Septiembre 12 de 1980). El trayecto recorrido según el tipo de vehículo está basado en estudios hechos por la Secretaría de Transportes y Tránsito de Medellín. El cálculo se hará para un día, tomando un período de 13 horas (6am a 7 pm). La Tabla 4 ilustra los volúmenes de entrada y el recorrido promedio para cada tipo de vehículo en la zona central.

TABLA 4. Volúmenes de Entrada y Recorridos Promedios en la Zona.

Tipo de vehículo	Cantidad	Recorrido Promedio (km)
Automóviles	83.312	1,62
Motos	3.471	1,80
Buses: Gasolina	16.723	3,35
Diesel	1.858	3,35
Camiones: Gasolina	5.206	2,50
Diesel	1.301	2,50

Se debe anotar que el volumen de motos no se especifica en el aforo en entradas pero con base en suposiciones dadas por funcionarios de la Secretaría de Tránsito se estimó en un 4% del total de autos. La Tabla 5 ilustra el estimativo de las emisiones en un día para la zona.

Para el cálculo de emisiones en la zona en el año 1980 se hizo algunas suposiciones basadas en que los días sábados y domingos el flujo de vehículos en la zona rebaja considerablemente. La Tabla 6 ilustra el porcentaje por categoría de vehículos que transitan sábados y domingos en relación con el flujo de vehículos que transitan en día de semana.

TABLA 6. Porcentaje de Vehículos que Transitan Sábados y Domingos en la Zona.

Categoría	Porcentaje	
	Sábados	Domingos
Autos	40	20
Motos	70	30
Buses	70	30
Camiones	80	15

La Tabla 7 sólo considera 13 horas diarias de emisiones de las 6 am hasta las 7 pm y dá, bajo este supuesto, las emisiones totales y dá los porcentajes de participación de los tipos de vehículos y de cada uno de los seis contaminantes considerados.

5. DISCUSION DE RESULTADOS

Para facilitar la discusión de resultados se requiere la utilización de alguna técnica que nos transforme estas emisiones en concentraciones ambientales de calidad del aire. Para los cruces y arterias se puede obtener una idea de la concentración ambiental suponiendo un volumen de aire con una longitud de 100 m a lo largo de la vía (en el caso de los cruces no se considera la vía que atraviesa), la dirección del viento es la misma de la arteria, el ancho del volumen es el ancho de la vía y la altura de mezcla se estima en 50 metros como máximo, debido al encañonamiento de los gases en las calles. De esta manera la concentración del contaminante en el aire se puede estimar según la siguiente expresión:

$$C = \frac{q \times \ell}{U \times h \times a}$$

TABLA 5. Estimativo de las Emisiones de Origen Automotor para la Zona Central en un día (1980)

Tipo de Motor	Tipo de vehículo	Contaminante emitido (kg/13 Horas)						Peso Total de cada tipo de vehíc. kg/ 13	°/o del peso total
		CO	HC	NO	SO	Partic.	HCHO		
Gasolina	Automóvil	15.898,00	881,30	257,10	10,70	44,53	9,98	17.101,61	39,56
	Motos	106,30	63,20	0,46	0,15	1,31	0,42	171,84	0,40
	Buses	18.336,00	2.560,20	218,48	12,32	41,45	10,08	21.178,53	49,00
	Camiones	3.819,90	498,30	52,19	2,86	9,63	2,34	4.385,22	10,15
Diesel	Buses	93,61	22,40	109,23	10,58	6,16	3,48	245,46	0,57
	Camiones	63,94	12,52	52,07	5,52	3,21	0,65	137,91	0,32
Peso total de cada contaminante		38.317,75	4.037,92	689,53	42,13	106,29	26,95	43.220,57	100,00
Porcentaje del peso total		88,66	9,34	1,59	0,10	0,25	0,06	100,00	

donde:

- C: concentración del contaminante en el aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).
 q: tasa de emisión del contaminante por unidad de tiempo y de longitud ($\mu\text{g}/\text{m}\cdot\text{s}$).
 ℓ: longitud base de cálculo (100 m) parece una longitud apropiada para renovar los contaminantes.
 U: velocidad del viento a nivel del piso, para el centro de Medellín es muy baja (1 m/s)
 a: ancho de la arteria, o de una de las vías (carrera) en los cruces.

h: altura de mezcla de contaminantes, la cual para calles encañonadas no puede ser muy alta debido a los vientos cruzados (50m).

Una discusión de algunas variaciones de este modelo ha sido desarrollada a fondo por Enrique Posada (1982). Al aplicar esta expresión para los cruces y arterias cuyas emisiones se estudiaron arriba se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 8 para arterias y en la Tabla 9 para algunos cruces.

TABLA 7. Estimativo de las Emisiones de Origen Automotor para 1980 en el centro de la ciudad

Tipo de Motor	Tipo de Vehículo	Emisiones t/año ¹						Total por tipo de veh.	Participación (°/o)
		CO	HC	NO ₂	SO ₂	Partic.	HCHO		
Gasolina	Autos	4.629,77	256,70	74,89	3,15	12,98	3,11	4.980,60	37,97
	Motos	33,32	19,84	0,15	0,05	0,65	0,16	54,17	0,41
	Buses	5.721,21	789,84	68,18	3,85	12,94	3,15	6.608,17	50,37
	Camiones	1.182,81	154,31	16,17	0,89	2,99	0,73	1.357,90	10,34
Diesel	Buses	29,20	6,99	34,00	3,32	1,94	0,39	75,84	0,58
	Camiones	19,78	3,87	16,10	1,72	0,99	0,20	46,66	0,33
Total por contaminante		11.616,09	1.240,55	209,49	12,98	32,49	7,74	13.119,34	100,00
Participación (°/o)		88,54	9,46	1,59	0,10	0,25	0,06	100,00	

1 Considerando un período de 13 horas diarias (6 am - 7 pm)

TABLA 8. Estimativo de Concentración de Contaminantes Atmosféricos en algunas Arterias del Centro de la Ciudad de Medellín*

Arteria		a (m)	CO $\mu\text{g}/\text{m}^3$	HC $\mu\text{g}/\text{m}^3$	NO ₂ $\mu\text{g}/\text{m}^3$
1. Avenida Oriental	Cr. 46	50	1599	206	41
2. Avenida Bolívar	Cr. 51	34	2598	249	45
3. Ayacucho	Cl. 49	8	6702	784	125
4. Avenida 1o. de Mayo	Cr. 50 A Cl. 52	20	4715	395	79
5. Junín	Cr. 49	20	2377	218	41
6. Carabobo	Cr. 52	14	1821	158	31
7. Avenida de Greiff	Cl. 53	30	1431	136	24
8. Maracaibo	Cl. 53	10	2646	181	44
9. Cúcuta	Cr. 54	15	935	102	16
10. La Playa	Cl. 52	38	1326	110	23
11. Maturín	Cl. 46	16	801	81	13
12. Boyacá	Cl. 51	11	1699	150	28

* Se utiliza ℓ =100 m, h = 50 m, U =1 m/s y el ancho de la arteria. Condiciones locales p= 635 mm Hg y T= 23°C

TABLA 9. Estimativo de Concentración de Contaminantes Atmosféricos en Algunos Cruces del Centro de Medellín*

CRUCE		a	CO	HC	NO ₂	
Carrera	Calle	(m)	μ g/m ³	μ g/m ³	μ g/m ³	
1.	46 Oriental	52 lo. de Mayo	50.	4817	414	84
2.	51 Bolívar	53 Maracaibo	35	5605	510	68
3.	46 Oriental	53 Maracaibo	50	3255	269	56
4.	51 Bolívar	50 Colombia	34	4556	457	80
5.	46 Oriental	54 Juanambú	50	2561	218	44
6.	46 Oriental	57 La Paz	50	2440	219	43
7.	52 Carabobo	53 De Greiff	14	8008	756	137
8.	55 Tenerife	49 Ayacucho	16	6549	626	117
9.	49 Junín	52 lo. de Mayo	20	4686	396	81
10.	53 Cundinamarca	53 De Greiff	14	6162	612	109
11.	49 Junín	46 Maturín	20	3969	391	70
12.	55 Tenerife	51 Boyacá	8	9059	926	148
13.	52 Carabobo	51 Boyacá	15	3975	311	69
14.	54 Cúcuta	51 Boyacá	15	3931	386	74
15.	54 Cúcuta	53 De Greiff	18	3241	335	57
16.	50 Palacé	53 Maracaibo	15	3804	293	64
17.	52 Carabobo	45 Amador	6	9223	918	170
18.	52 Carabobo	46 Maturín	12	3200	321	58
19.	53 Cundinamarca	51 Boyacá	14	2500	205	43
20.	54 Cúcuta	48 Pichincha	16	2146	236	40
21.	55 Tenerife	46 Maturín	13	2542	245	50
22.	54 Cúcuta	46 Maturín	12	2599	276	50
23.	53 Cundinamarca	46 Maturín	12	2288	241	43

* Se utiliza l = 100 m, h = 50 m, U = 1 m/s y a ancho de arteria. Condiciones locales p = 635 mm Hg y T = 23°C.

Las normas colombianas de calidad del aire según las condiciones locales de Medellín (p = 635 mmHg, y T = 23°C) dan como límite del CO 12618 μg/m³ para un promedio de 8 horas y de 42059 μg/m³ para promedios de 1 hora. Según el modelo matemático aplicado ninguna de las arterias o cruces excede dicha norma, lo cual indica que el modelo es muy liberal pues algunas mediciones reportadas por Posada (1982), indican que en Junín con Ayacucho (Cra. 49 x Cl 49) se superan las normas colombianas para calidad del aire en cuanto a CO. Por lo demás los valores del modelo son bastante comparables dentro de cierto rango de magnitud con las mediciones reportadas por Posada (1982), aunque el modelo en términos generales subestima las concentraciones de CO para el área central de Medellín.

En cuanto a los hidrocarburos Colombia no ha fijado normas en la calidad del aire, pero si se puede utilizar como pauta la norma de los Estados Unidos que fija un promedio de 160 μg/m³ para promedios de 3 horas. En este caso los resultados del modelo son mucho más críticos pues presenta que 6 arterias exceden esta norma, siendo excedida por un factor superior a 5 en Ayacucho (Cl. 49). En cuanto a los cruces, al presentar un flujo vehicular combinado mayor, absolutamente todos están excediendo la norma. No quiere decir esto que el modelo reemplace las mediciones o sirva para asignar responsabilidades, pero sí llama la atención sobre un problema muy serio que está afectando al

centro de la ciudad y requiere de mediciones específicas (hasta el momento no se sabe de mediciones de hidrocarburos expresados como metano, solo se conoce el trabajo de Peláez (1982, p 41-42) donde reporta algunas mediciones de aldehídos).

La norma local para NO₂ es de 84 μg/m³ y el modelo predice que se excede sólo en una arteria (Ayacucho Cl 49) y en seis cruces. De nuevo se observa aquí la liberalidad del modelo pues las mediciones de NO₂ en el centro en promedio de 13 sitios (174 μg/m³) exceden la norma colombiana por un factor de dos.

Es de anotar que el modelo matemático ayuda a identificar dos contaminantes causantes de serios problemas en el centro de la ciudad. La combinación de los óxidos de nitrógeno con hidrocarburos y con energía solar produce una serie de reacciones fotoquímicas generando los oxidantes fotoquímicos que irritan los ojos y todas las membranas mucosas.

El estudio de Calle y Orrego (1983) estimó las emisiones para la zona en 13 horas y se obtuvieron los siguientes resultados:

CO	38317,7 kg
HC	4037,9 kg
NO ₂	689,5 kg

DYNA No. 103 MAYO/84 MEDELLIN

El modelo matemático explicado con anterioridad se aplicó a toda la zona central que tiene un área de 1,55 km² con las siguientes modificaciones: ancho de 1250 m y altura de 300 m. Los resultados de concentración de contaminante en el aire son:

CO	2183	μg/m ³
HC	230	μg/m ³
NO	39	μg/m ³

El modelo no parece muy apropiado cuando se aplica a toda el área pues los promedios se rebajan considerablemente, aunque el promedio para HC todavía continúa por encima de la norma de Estados Unidos de 160 μg/m³ para promedio de 3 horas. Es lógico esperar que las concentraciones rebajen al alejarnos de los cruces y las vías por lo cual no es de extrañar los resultados del modelo al aplicarlo como promedio para toda el área.

6. ALTERNATIVAS PARA EL CENTRO DE LA CIUDAD

El objetivo primordial de la aplicación de los diversos modelos aquí esbozados es que sirvan de base para una correcta previsión del impacto que algunas medidas pueden tener en mejorar la calidad del aire de una zona. A continuación se presentan cuatro alternativas, donde se hacen diferentes suposiciones que afectan la velocidad de tránsito en el área central. En estas alternativas se aumenta la velocidad para ver el efecto que tendría sobre las emisiones, particularmente para ver como rebajan. En una alternativa se mantienen constantes las velocidades pero se eliminan las emisiones de una fuente al prohibir su ingreso al área central.

Alternativa 1.

Restringir la entrada de autos particulares y taxis a la zona central. Se busca la descongestión en la zona, lo que permite que los buses y camiones alcancen mayores velocidades. Considerando que los buses podrían alcanzar una velocidad promedio de 18 km/h y los camiones de 20 km/h. Los factores de emisión para estas nuevas condiciones se hallaron de la misma forma que en los casos anteriores. La Tabla 10 ilustra estos factores.

TABLA 10. Factores de Emisión para el Centro sin Automóviles

Contaminantes	FACTOR DE EMISION gr/km				
	BUSES		CAMIONES		Motos
	Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel	
CO	200,50	13,79	198,90	18,33	17,00
HC	24,70	12,85	23,43	3,20	10,12
NO _x	3,62	14,74	3,86	13,94	0,075
SO _x	0,22	1,70	0,22	1,70	0,024
Partículas	0,74	0,99	0,74	0,99	0,21
HCHO	0,18	0,20	0,18	0,20	0,021

Utilizando los mismos recorridos promedios y estos factores de emisión se estimarán las emisiones para un año. La tabla 11 ilustra las emisiones para la zona sin automóviles.

Alternativa 2.

Existen vías como Boyacá (Cl. 51), Maracaibo (Cl. 53), Amador (Cl. 45), Maturín (Cl. 46), y Pichincha (Cl. 48) cuyas calzadas son angostas o están restringidas por las ventas ambulantes, algunas con gran afluencia de gente que tiene que transitar por la vía y otras con flujo vehicular no muy alto. Estas vías dan salida y/o entrada a Carabobo (Cr. 52), Bolívar (Cr. 51), Palacé (Cr. 50), Junín (Cr. 49), Sucre (Cr. 47), y la Avenida Oriental (Cr. 46); convirtiéndolas en zonas peatonales se logra para las arterias mayor velocidad de tránsito, dado que dejarán de existir los semáforos en los cruces con dichas vías. Para esta situación se supuso que los autos alcanzarían 25 km/h., los buses 16 km/h. y los camiones 18 km/h. Se hacen los cálculos para Carabobo (Cr. 52), Bolívar (Cr. 51) y la Avenida Oriental (Cr. 46). Tomando iguales flujos y recorrido que aparecen en la Tabla 3. Los factores de emisiones para esta situación se ilustran en la Tabla 12. La Tabla 13 ilustra los estimativos de emisión para estas arterias.

Considerando ya no solamente estas tres arterias sino toda la zona central, mediante mejor distribución de los flujos vehiculares, programación de semáforos (ondas verdes), separación de buses y autos, programación de terminales de buses en zonas amplias, programación de tránsito de camiones de descargue en horas no pico, puede lograrse incrementar la velocidad de tránsito. La Tabla 14 presenta la estimación de emisiones para esta situación.

Alternativa 3.

La implementación de buses trolleys (buses eléctricos) para el transporte masivo supone la eliminación de las emisiones de los buses con motor a gasolina y diesel en la zona, que presentan un 50,4% de las emisiones totales; las velocidades para autos y camiones se suponen iguales a las actuales.

Alternativa 4.

No permitir la entrada de buses a la zona, y creación de pasajes peatonales que permitan mayores distancias entre paradas en las principales arterias. Se supone para esta situa-

ción una velocidad de 31 km/h para autos y de 20km/h para camiones. La Tabla 15 presenta la estimación para esta nueva situación.

Como resumen de las alternativas supuestas, la Tabla 16 presenta un cuadro comparativo de las mayores emisiones (CO, HC y NO_x) para toda la zona central.

TABLA 11. Estimativo de las Emisiones de Origen Automotor en la Zona Central sin Automóviles para 365 días.

Tipo de Motor	Tipo de Vehículo	CONTAMINANTES EMITIDOS t* / año						Peso total prov. de cada tipo de Vehículo	O/o de peso por cada tipo de Vehículo.
		CO	HC	NO _x	SO _x	Partíc.	HCHO		
Motor de gasolina	Buses	3.504,51	431,72	63,27	3,85	12,94	3,15	4.019,44	81,3
	Camiones	670,85	76,50	14,81	0,89	2,99	0,73	766,77	15,5
	Motos	33,32	19,84	0,15	0,05	0,65	0,16	54,17	1,1
Motor diesel	Buses	26,77	5,53	28,62	3,32	1,94	0,39	66,57	1,3
	Camiones	18,44	3,21	14,02	1,72	0,99	0,20	38,58	0,8
Peso total proveniente de cada contaminante		4.253,89	536,80	120,87	9,83	19,51	4,63	4.945,50	100
Porcentaje del peso total sobre las contaminantes en estudio		86,0	10,9	2,4	0,2	0,4	0,1	100	

* t tonelada

TABLA 12. Factores de Emisión para Carabobo (Cr. 52), Bolívar (Cr. 51) y la Avenida Oriental (Cr. 46) con Flujo Vehicular más rápido. (gr/km).

Contaminante	Autos	Motos	Buses		Camiones	
			Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel
CO	72,52	17,00	232,10	13,99	198,90	18,60
HC	5,86	10,12	29,90	2,97	23,47	3,30
NO _x	1,59	0,075	3,68	15,18	3,86	14,30
SO _x	0,08	0,024	0,22	1,70	0,22	1,70
Partículas	0,33	0,21	0,74	0,99	0,74	0,99
HCHO	0,079	0,068	0,18	0,20	0,18	0,20

TABLA 13. Estimativo de las Emisiones para Carabobo, Bolívar, y la Avenida Oriental con Flujo Vehicular más Rápido.

Arteria	CO	HC	NO _x	SO _x	Part.	HCHO
Carabobo (Cr. 52)	199,8	20,33	4,69	0,29	0,87	0,20
Avenida Oriental (Cr. 46)	1.399,9	141,46	32,60	2,03	6,16	1,42
Bolívar (Cr. 51)	368,4	40,59	8,42	0,54	1,55	0,36

Emisiones kg/ día

TABLA 14. Estimativos de las Emisiones en la Zona Central considerando Flujo Vehicular más rápido.

Tipo de Motor	Tipo de Vehículo	Emisiones t*/ año.							
		CO	HC	NO _x	SO _x	Part.	HCHO	Total	o/o
Gasolina	Autos	2.850,00	230,30	62,49	3,14	12,96	3,10	3.161,99	35,5
	Motos	33,32	19,84	0,15	0,05	0,65	0,16	54,17	0,6
	Buses	4.056,80	522,60	64,3	3,85	12,94	3,15	4.663,64	52,4
	Camiones	800,90	94,50	15,5	0,89	2,99	0,73	915,51	10,3
Diesel	Buses	27,16	5,76	29,47	3,32	1,94	0,39	68,04	0,8
	Camiones	18,71	3,32	14,38	1,72	0,99	0,20	39,32	0,4
TOTAL:		7.786,89	876,32	186,29	12,97	32,47	7,75	8.902,67	100,00
o/o		87,5	9,8	2,1	0,1	0,4	0,1	100,00	

*t tonelada

TABLA 15. Estimativo de Emisiones en la Zona Central sin Buses.

Vehículo	Emisiones toneladas/año							
	CO	HC	NO _x	SO _x	Partic.	HCHO	Total	o/o
Autos	2.457,90	173,70	65,60	3,14	12,96	3,10	2.176,40	76,0
Motos	33,32	19,84	0,15	0,05	0,65	0,16	54,17	1,5
Camión	Gasolina	670,85	76,50	14,81	0,89	2,99	766,77	21,4
	Diesel	18,44	3,21	14,02	1,72	0,99	38,58	1,1
Total:	3.180,51	273,25	94,58	5,80	17,59	4,19	3.575,92	100,00
o/o	89,0	7,6	2,6	0,2	0,5	0,1	100,00	

7. CONCLUSIONES

El presente estado de conocimientos sobre las emisiones de contaminantes de los vehículos en nuestro medio no permite establecer con precisión una estimación de emisiones. El método utilizado, especialmente en el cálculo de los factores de emisión, es una aproximación de lo que ocurre y sus restricciones limitan el alcance de los resultados; sin embargo, el planteamiento de las alternativas bajo diferentes supuestos permite hacer comparaciones cualitativas, por el hecho de que éstas se obtienen bajo las mismas condiciones de evaluación, pues hay que destacar que a medida que la velocidad se hace mayor, las emisiones son menores y que con la eliminación de una fuente contaminante se obtienen mejoras sustanciales. Las alternativas brindan la oportunidad de sustentar soluciones por comparación, encaminadas a resolver el creciente problema de la contaminación del aire por tráfico automotor. Es posible mediante estudios de concentración en la zona darle al método de estimación de emisiones un buen grado de aproximación haciendo una com-

paración razonable de las emisiones establecidas para los autos en los Estados Unidos. Lo ideal sería tener equipos para evaluar las emisiones en el tubo de escape de los vehículos y diseñar un programa que permita mediante técnicas estadísticas estimar con un alto grado de confiabilidad las emisiones del parque automotor.

Los resultados obtenidos indican que en la zona se emiten 13.108 t/año de contaminantes (considerando 13 horas diarias) y cerca de 15.729 t/año considerando 24 horas. El mayor volumen de emisión corresponde al transporte público masivo, responsable de un 51% de la contaminación del aire por parque automotor en la zona. Las emisiones más altas corresponden al CO con un 88,5% del total emitido, seguido de los HC con un 9,4% y los NO_x con 1,59%.

Respecto a los resultados de las alternativas, el efecto de restringir la entrada de buses a la zona central, aumentando la velocidad de los autos, es la mejor alternativa, pues se ob-

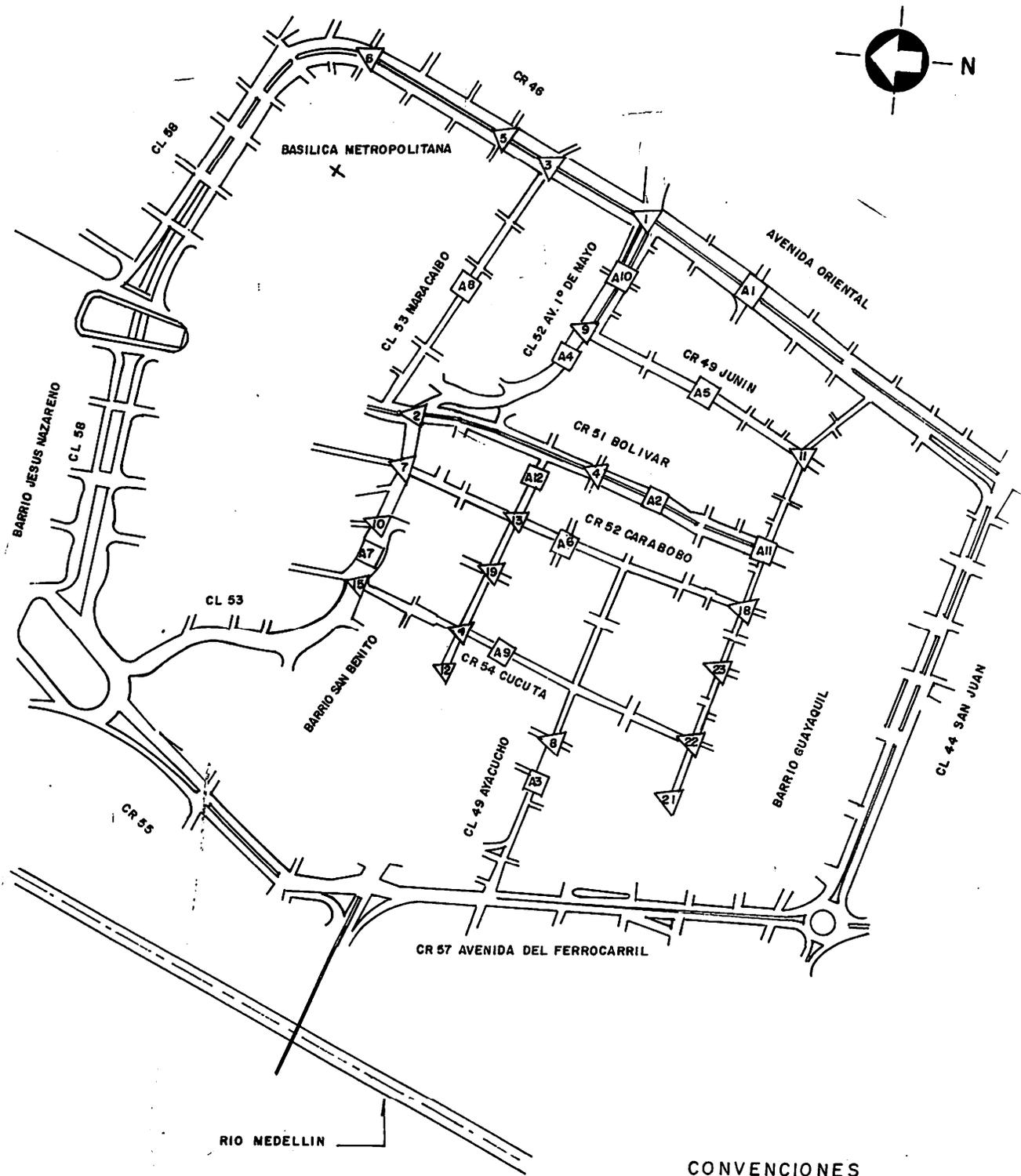


FIGURA I. Delimitación del área central de Medellín

TABLA 16. Cuadro Comparativo para las Alternativas Supuestas en la Zona Central.

EMISIONES		Alternativas				
t/ año	Vehículo	1	2	3	4	5
CO	Autos	—	2.850,00	4.629,70	2.457,90	4.629,77
	Motos	33,32	33,32	33,32	33,32	33,32
	Bus - Gasolina	3.504,51	4.056,80	—	—	5.721,21
	Diesel	26,77	27,16	—	—	29,20
	Camión - Gasolina	670,85	800,90	1.182,81	670,85	1.182,81
	Diesel	18,44	18,71	19,78	18,44	19,78
			<u>4.253,89</u>	<u>7.786,89</u>	<u>5.865,61</u>	<u>3.180,51</u>
HC	Autos	—	230,30	256,79	173,70	256,70
	Motos	19,84	19,84	19,84	19,84	19,84
	Bus - Gasolina	431,72	522,60	—	—	798,84
	Diesel	5,53	5,76	—	—	6,99
	Camión - Gasolina	76,50	94,50	154,31	76,50	154,31
	Diesel	321	3,32	3,87	3,21	3,87
			<u>536,80</u>	<u>876,32</u>	<u>434,72</u>	<u>273,25</u>
NO _x	Autos	—	62,49	74,89	65,60	74,89
	Motos	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
	Bus - Gasolina	63,27	64,30	—	—	68,18
	Diesel	28,62	29,47	—	—	34,00
	Camión - Gasolina	14,81	15,50	16,17	14,81	16,17
	Diesel	14,02	14,38	16,10	14,02	16,0
			<u>120,87</u>	<u>186,29</u>	<u>107,31</u>	<u>94,58</u>
TOTAL:		4.908,35	8.849,50	6.407,64	3.548,34	13.066,13

- Alternativas:
1. El centro sin autos.
 2. Vías más rápidas
 3. Electrificación del transporte masivo (buses trolleys)
 4. El centro sin buses.
 5. Actual

tienen las emisiones más bajas porque se elimina una fuente de gran poder contaminador y porque permite al interior de la zona una mejor distribución y agilización del tránsito vehicular, situación en la cual se disminuyen las emisiones dañinas. La reducción de emisiones respecto a la situación actual es de un 73^o/o.

Los estudios de concentración, que actualmente adelanta la Oficina de Saneamiento y Contaminación Ambiental del Municipio de Medellín, despejarán muchas dudas acerca de la calidad del aire en el área, ya que estudios preliminares, aunque limitados, revelan indicios de una situación preocupante en la zona.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ABAD, J.G., ECHEVERRI, M. y SANCHEZ, H. La contaminación por Monóxido de Carbono en Medellín y su Relación con el Tráfico Automotor. Tesis de Grado. Universidad Pontificia Bolivariana, Facultad de Ingeniería Mecánica. Medellín, Julio, 1979. 131 p.

BEDOYA, Julián. Contaminación del Aire y Meteorología. DYNA No. 99. Facultad Nacional de Minas. Universidad Nacional de Medellín. 1980. p. 5-10.

CALLE J.G. y ORREGO R. Estimación de Emisiones de contaminantes Atmosféricos por Tráfico Automotor en el Centro de Medellín. Trabajo Dirigido de Grado. Universidad Nacional - Facultad Nacional de Minas. Medellín 1983. 119 p.

CAPELLA, L., CARMONA, J y PELAEZ J. Estudios sobre Niveles de Hidrocarburos y Oxidantes Existentes en el Aire Ambiental del Valle de Aburrá. Tesis de Grado. Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Mecánica. Medellín. 1980. 376 p.

DANE. Censo de Edificaciones. Medellín. Agosto 1981.

DIRECCION DE PLANEACION METROPOLITANA. Aforos de flujo vehicular en el Centro de Medellín. Planeación Metropolitana. Medellín. 1980.

EPA. Compilation of Air Pollution Emission Factors. Third Edition. U.S. EPA. NTIS. Washington D.C. 1977 pp 71 - 111.

MINISTERIO DE SALUD PUBLICA. Decreto No. 2 Bogotá, 1982.

PELAEZ, Jaime Alberto. Estudio sobre Niveles de Hidrocarburos y Oxidantes Existentes en el Aire Ambiente del Valle de Aburrá. Revista Contaminación Ambiental, No. 9, UPB CIDI - Medellín, 1982 p. 41-49.

POSADA, E. El problema de Contaminación por Monóxido de Carbono en la Ciudad de Medellín y su Relación con el Tráfico automotor. Universidad Pontificia Bolivariana CIDI. Medellín. 1982. 106 p.