

**IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE BREEZE DE MODELACIÓN DE LA  
CALIDAD DE AIRE PARA MATERIAL PARTICULADO, PM-10, EN LA PLANTA  
PRODUCTORA DE CEMENTO CEMEX S.A., UBICADA EN LA SALIDA NORTE  
DE BUCARAMANGA.**

**JUAN DIEGO OSPINA LÓPEZ**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
INGENIERIA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA  
AGOSTO  
2008**

**IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE BREEZE DE MODELACIÓN DE LA CALIDAD DE AIRE PARA MATERIAL PARTICULADO, PM-10, EN LA PLANTA PRODUCTORA DE CEMENTO CEMEX S.A., UBICADA EN LA SALIDA NORTE DE BUCARAMANGA.**

**JUAN DIEGO OSPINA LÓPEZ**

**Trabajo de Grado para optar al título de  
INGENIERO SANITARIO Y AMBIENTAL**

**Director  
KENTO TARO MAGARA GOMEZ  
Ingeniero Químico**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
INGENIERIA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA  
AGOSTO  
2008**

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Firma del Presidente del Jurado

---

Firma del Jurado

Floridablanca, Agosto del 2008.

## CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
2.1. Objetivo General.....	4
2.2. Objetivos Específicos.....	4
3. MARCO TEORICO.....	5
3.1. Industria Cementera.....	5
3.2. Material Particulado.....	6
3.2.1. El Término Partícula.....	6
3.2.2. Clasificación de Material Particulado.....	8
3.2.3. Fuentes de Generación de Material Particulado.....	9
3.2.3.1. Carreteras No Pavimentadas.....	10
3.2.3.2. Carreteras Pavimentadas.....	10
3.2.4. Impacto en la Salud.....	10
3.2.4.1. Tipos de Efectos Biológicos del Material Particulado.....	12
3.2.5. Impacto en el Medio Ambiente.....	13
3.3. Dispersión de Contaminantes.....	14
3.4. Software BREEZE ISC.....	14
3.4.1. Introducción a la Modelación.....	15
3.4.2. Variables de la Modelación.....	16
3.4.2.1. Cantidad y Tipo de Emisiones Generadas por las Actividades Existentes...17	
3.4.2.2. Viento.....	17
3.4.2.3. Estabilidad.....	17
3.4.2.4. Altura de Mezcla.....	17
3.4.2.5. Rugosidad del Terreno.....	17
3.4.2.6. Datos de Monitoreo de Calidad de Aire en la Zona.....	18
3.4.2.7. Parámetros de las Fuentes.....	18
3.5. Marco Legal.....	18
4. METODOLOGIA.....	21
4.1. ETAPA I: Definición del Sistema.....	21
4.2. ETAPA II: Determinación de Parámetros Requeridos por el modelo.....	21
4.2.1. Datos Meteorológicos.....	21
4.2.1.1. Altura de Mezcla.....	22
4.2.1.2. Estabilidad Atmosférica.....	22
4.2.2. Datos Topográficos.....	22
4.2.3. Ratas de Emisión.....	23
4.2.3.1. Emisiones Fuentes Puntuales.....	23
4.2.3.2. Factores de Emisión para Carreteras.....	23
4.2.4. Receptores.....	24
4.3. ETAPA III: Aplicación del modelo Breeze ISC pro.....	25
4.3.1. Manejo del Software Breeze ISC Pro.....	25

4.3.1.1.	Importar Plano Base.....	26
4.3.1.2.	Definir Opciones de Control.....	26
4.3.1.3.	Introducir Fuentes.....	26
4.3.1.4.	Introducir Malla de Receptores.....	26
4.3.1.5.	Introducir Opciones de Meteorología.....	27
4.3.1.6.	Introducir Opciones de Salida.....	27
4.3.1.7.	Ejecutar Modelo.....	27
4.3.1.8.	Post Procesamiento de Datos.....	27
4.4.	ETAPA IV: Corrida del modelo.....	28
4.5.	ETAPA V: Análisis de los Resultados.....	28
5.	RESULTADOS Y ANALISIS.....	29
5.1.	Área de Aplicación del Modelo.....	29
5.2.	Resultados de la modelación.....	31
5.2.1.	Isopletas y Rosa de los Vientos.....	31
5.2.2.	Concentraciones de PM-10.....	39
5.2.3.	Índices de Calidad del Aire IBUCA.....	46
6.	CONCLUSIONES.....	50
7.	RECOMENDACIONES.....	51
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49

## INDICE DE TABLAS

<b><u>Tabla</u></b>	<b><u>Página</u></b>
1. Velocidad de Sedimentación de Partículas.....	9
2. Norma de Calidad de Aire para PM-10, Colombia.....	19
3. Ejemplo de Presentación de Datos Meteorológicos.....	22
4. Información de fuentes fijas requerida por Breeze.....	23
5. Información de Receptores requerida por Breeze.....	25
6. Resultados de muestreo con HI-VOL para la estación 1.....	39
7. Resultados de muestreo con HI-VOL para la estación 2.....	40
8. Resultados de modelación para estación 1.....	40
9. Resultados de modelación para estación 2.....	41
10. Porcentajes de Error estación 1.....	41
11. Porcentajes de Error estación 2.....	42
12. Comparación de Aporte Fuentes Puntuales Vs. Fuentes de Área.....	45
13. Índices de Calidad del Aire IBUCA.....	47
14. Índices de Calidad de Aire IBUCA para datos Reales estación 1.....	47
15. Índices de Calidad de Aire IBUCA para datos Modelados estación 1.....	48
16. Índices de Calidad de Aire IBUCA para datos Reales estación 2.....	48
17. Índices de Calidad de Aire IBUCA para datos Modelados estación 2.....	49

## INDICE DE FIGURAS

<b><u>Figuras</u></b>	<b><u>Página</u></b>
1. Comparación de diámetro de partícula con cabello humano.....	11
2. Algoritmo General.....	25
3. Menú de ISC Breeze.....	26
4. Malla Receptores.....	27
5. Archivo Topográfico.....	27
6. Curvas Isopletas.....	28
7. Imagen Satelital de la Zona Norte de Bucaramanga.....	29
8. Imagen Satelital de la Planta CEMEX. S.A. y Barrio Claverianos.....	30
9. Imagen Satelital de la Planta CEMEX. S.A.....	31
10. Isopletas Modelación de PM-10, 16 de Noviembre.....	31
11. Isopletas Modelación de PM-10, 17 de Noviembre.....	32
12. Isopletas Modelación de PM-10, 19 de Noviembre.....	32
13. Isopletas Modelación de PM-10, 20 de Noviembre.....	33
14. Isopletas Modelación de PM-10, 22 de Noviembre.....	33
15. Isopletas Modelación de PM-10, 23 de Noviembre.....	34
16. Isopletas Modelación de PM-10, 24 de Noviembre.....	34
17. Isopletas Modelación de PM-10, 25 de Noviembre.....	35
18. Isopletas Modelación de PM-10, 26 de Noviembre.....	35
19. Isopletas Modelación de PM-10, 27 de Noviembre.....	36
20. Isopletas Modelación de PM-10, 28 de Noviembre.....	36
21. Isopletas Modelación de PM-10, 29 de Noviembre.....	37
22. Isopletas Modelación de PM-10, 1 de Diciembre.....	37
23. Isopletas Modelación de PM-10, Año 2006.....	38
24. Rosa de los Vientos de Bucaramanga, Año 2006.....	38

## INDICE DE GRAFICAS

<b><u>Gráficas</u></b>	<b><u>Página</u></b>
1. Resultados HI-VOL y Modelación en Estación 1.....	42
2. Resultados HI-VOL y Modelación en Estación 2.....	43
3. Porcentaje de Error Estación 1.....	43
4. Porcentaje de Error Estación 2.....	44
5. Comparación de Aporte Fuentes Puntuales Vs. Fuentes de Área.....	46

## **ANEXOS**

Anexo A.

Resultados Muestreo Isocinético CEMEX. S.A.

Anexo B.

Resultado Muestreo Calidad de Aire CEMEX. S.A.

Anexo C.

Índice de calidad del aire de Bucaramanga IBUCA.

Anexo D.

Factores de Emisión Carretera Pavimentada.

Anexo E.

Factores de Emisión Carretera No Pavimentada.

Anexo F.

Hojas de Calculo. Factores de Emisión de Carreteras.

Anexo G.

A model for predicting the dispersion of dust from a haul truck.

Anexo H.

Tablas para determinar la estabilidad atmosférica.

Anexo I.

Tabla con datos de Elevación del Terreno.

## RESUMEN

Desde hace un tiempo atrás, la población del Barrio Claverianos, ubicada en la Salida Norte de Bucaramanga, viene presentando sus quejas ante las entidades departamentales por los inconvenientes causados por la contaminación debido al material particulado. La empresa CEMEX S.A., ubicada a 600 metros de este barrio y preocupado por la salud de sus habitantes, ha buscado desarrollar estrategias junto con la CDMB para determinar la dispersión de sus contaminantes y así definir su aporte contaminante al barrio, para tal fin se decidió aplicar el Software de modelación de la calidad de aire BREEZE para modelar la dispersión de Material Particulado, PM-10, ya que esta es la principal emisión de la planta cementera; para esta modelación fue necesaria la colaboración conjunta de Universidad - Empresa Privada - Estado, representados estos en la Universidad Pontificia Bolivariana, CEMEX S.A. y Corporación de Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB). La CDMB junto con CEMEX S.A. aportaron todos los datos a su alcance, como fueron la data meteorológica y datos de muestreos isocinéticos y de calidad de aire. Con estos datos se procedió a trabajar con el software y posteriormente analizar los resultados. Los resultados arrojados por la modelación mostraron una tendencia de los contaminantes a dirigirse al sur, lugar dónde se encuentra el Barrio Claverianos, pero siempre mostrando unos valores por debajo del límite máximo permitido de  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  exigido por la Resolución 601 de 4 de Abril de 2006. También se encontró que fueron las carreteras al interior de la cementera las que más material particulado aportaron a la modelación, por encima de las fuentes puntuales del proceso de triturado, molienda, mezcla y empaque. Igualmente se concluyó la modelación con porcentajes de error del orden del 35% lo cual es un valor aceptable para trabajos de modelación de dispersión de contaminantes.

## ABSTRACT

Since long time ago, the population of Claverianos neighborhood, located in the north side exit of Bucaramanga, has been presenting several complaints to the departmental entities for the inconveniences caused by the particular matter pollution. The factory CEMEX S.A., located 600 meters from Claverianos neighborhood, has been worried about the health of the habitants of this neighborhood; CEMEX S.A. has been developing strategies with the CDMB in order to determine the dispersion of their pollutants and in that way define their pollution contribution to Claverianos neighborhood, for this purpose it was decided to implement the air quality modeling software BREEZE to model the dispersion of particular matter, PM-10, because this is the principal emission of this cement plant; for this modeling implementation it was necessary the collaboration of the University – Private company – State, represented by Universidad Pontificia Bolivariana, CEMEX S.A. and Corporación de Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB). The CDMB and CEMEX S.A. contributed with all the data that they had, this is the meteorological data, the isokinetics sampling data and the air quality data. After having all this data collected, it was able to proceed to work with the software and after running the software the results were analyzed. The modeling results show a tendency of the pollutants to move to the south, which is the place where Claverianos neighborhood is located, but the results were showing low values under de maximum permit limit of  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  required by the Resolution 601 of April 4 of 2006. Also it was found that the roads inside this cement plant contributed with more particular matter than the point sources from the processes of Crushing, Milling, Blending and Packing. In the same order the modelation were finished with a error of 35% which is acceptable for this kind of Air Dispersion Models.

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante años la población urbana ha ampliado sus fronteras, buscando mejorar su modus vivendi en aras de la obtención del progreso y desarrollo de la misma.

Lo anotado anteriormente ha implicado indudablemente que el crecimiento demográfico, arquitectónico e industrial producto de ésta diáspora, haya venido acompañado de aumento de la malla vial para satisfacer la demanda de tráfico automotor pesado y ligero, cada día en alza, así como también de la creación y establecimiento de factorías y complejos industriales con sus correspondientes secuelas de contaminación ambiental, que por su inadecuado manejo y control, progresivamente alteran y lesionan los recursos naturales como el aire, agua y tierra, entre otros, fundamentales para la supervivencia de la humanidad, en búsqueda de la obtención del pleno desarrollo y modernización, sin sopesar las consecuencias de sus implicaciones.

La contaminación atmosférica es sin duda una de las preocupaciones más grandes con vistas al futuro; pero aún siendo así, es uno de los campos menos estudiados y donde menos inversión se ha hecho para minimizar sus impactos generados por los contaminantes producidos debido a las emisiones fijas (factorías) y las móviles (vehículos) sobre las poblaciones urbanas. Bucaramanga no es la excepción a esta regla, casi general, de poco interés hacia el aire que respiramos y que nos mantiene vivos.

Por ello, ya desde los tiempos más remotos, el hombre ha estado consciente del peligro que representa una atmósfera contaminada, tanto la creada de modo natural con ocasión de una erupción volcánica, como la provocada por él mismo, al hacer arder un bosque y al encender una antorcha para iluminarse en el interior de las cavernas donde vivía. En tiempos históricos esta preocupación ya motivó varias disposiciones legislativas en diversos países, como Francia, donde en 1832 Carlos VI prohibía en un edicto la emisión de gases malolientes. Asimismo, en Inglaterra ya existía en el siglo XVII una disposición que prohibía encender fuego en las chimeneas durante las sesiones en el Parlamento de Westminster.

Es así como, por ejemplo, ya en actividades como la minería se ha empezado a trabajar en el control y conocimiento de la naturaleza de estos contaminantes y en su dispersión, como lo señalaron en el 2005, Reed & Westman en el artículo “A model for predicting the dispersion of dust from a haul truck” (ver Anexo G), donde hablan de la importancia de conocer el movimiento y las concentraciones del material particulado y como esta información ayuda a prevenir de alguna manera que la población se vea finalmente afectada por el material particulado respirable menor a 10 micras (PM-10). Esta información de vital importancia ha sido tomada con base en los datos arrojados por modelación en computador, la cual demuestra que la fidelidad de estos valores no está ciento por ciento libre de error, es más, arrojan datos del 77% de concordancia con datos reales tomados en los puntos donde se podía efectuar una comparación fiable. Aún con este porcentaje de fiabilidad, estos programas dan una aproximación valiosa, sobre la cual se puede tomar decisión en busca de disminuir el problema de la contaminación atmosférica.

Existe un sin número de fuentes generadoras de estos problemas ambientales atmosféricos, como lo son los procesos de fundición, los procesos de combustión, la actividad minera, el transporte, entre otros. Dentro de la producción minera hay una en especial a la cual se le da mucha importancia, ya que es vital dentro del desarrollo industrial de una ciudad, hablamos de la fabricación de cemento. Esta industria ha incrementado su producción de manera acelerada conforme las ciudades han crecido, pero este incremento trae detrás problemas que generalmente se pasan por alto; problemas de generación de contaminantes atmosféricos que solo llegan a sufrirlos los habitantes que viven en cercanías a estas industrias, es este el caso de muchas industrias cementeras y poblaciones cercanas a estas. En particular ocurre en la ciudad de Bucaramanga, Santander, donde la industria cementera CEMEX ha visto como se acumulan las quejas en sus oficinas debido al material particulado que genera el proceso de empaque, triturado y transporte del cemento, afectando al Barrio Claverianos el cual colinda con la empresa. Hace algunos años esta industria se encontraba lejos de la población, acatando de esta manera las exigencias de planeación territorial que se aplica en estos casos, pero conforme la densidad demográfica aumenta, la ciudad se expande, y ha llegado, hoy en día, a estar limitando de manera muy cercana con la planta cementera, sufriendo de manera directa la polvareda proveniente de esta industria, sin que la industria sea la culpable, ya que estos se encontraban con anterioridad en el sector. Aún así CEMEX, preocupado por el bienestar de los habitantes del sector ha tomado y está tomando medidas que disminuyan en gran medida las emisiones de material particulado; así mismo buscan determinar el movimiento del material particulado en el aire implementando modelos matemáticos de dispersión de contaminantes en la atmósfera.

Para dar solución o de alguna manera definir donde se encuentran las concentraciones más perjudiciales para los habitantes y saber de donde provienen estas, los modelos matemáticos de dispersión de contaminantes en la atmósfera se usan como una herramienta valiosa en esta gestión ambiental ya que, según comentaron Espert & López en el 2004, permiten relacionar las concentraciones ambientales de los diferentes contaminantes directamente con sus fuentes de emisión, o con la emisión de sus precursores, así como con las condiciones topográficas, de uso de suelo y la meteorología. Esta valiosa herramienta científica permite predecir los cambios en las concentraciones ambientales de distintas especies químicas a lo largo de un día o periodos mayores como resultado de cambios en las condiciones iniciales y en consecuencia ofrecen la posibilidad de evaluar la efectividad de diferentes medidas de control de emisiones antes de su aplicación.

La aplicación de un modelo de la calidad del aire en la evaluación de estrategias de control de emisiones contaminantes a la atmósfera es una tarea compleja que demanda la integración sistemática de una gran cantidad de información generada por diferentes fuentes, tales como: inventario de emisiones, meteorología, topografía, etc.

Es por esto que se debe evitar por todos los medios posibles dañar de alguna manera el elemento aire y tratar de mitigar cualquier foco de emisiones atmosféricas. Teniendo en cuenta que esto no siempre es posible, ya que hay contaminantes que se seguirán emitiendo, al menos por unos años más, lo que se busca, en muchos de los casos, es que estas emisiones de contaminantes dañinos como material particulado, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre y ozono, por nombrar los más importantes, no

afecten de ninguna manera a los habitantes de las zonas urbanas. Para tal efecto se han desarrollado software que nos ayudan a predeterminedar el movimiento de dichos contaminantes y así estar preparados para tomar decisiones y saber dónde y con que concentraciones estarán los contaminantes generados por los vehículos y fábricas.

El software BREEZE, adquirido por la Universidad Pontificia Bolivariana y objeto principal de este trabajo, es uno de estos programas, destinado a ayudar a los gobiernos a ubicar sus empresas, siempre pensando en que el movimiento de los contaminantes por la variedad direccional de los vientos y por sus grados de concentración, de ninguna manera o forma perjudiquen a los pobladores.

Esta clase de software son desarrollados para condiciones especiales de relieve, meteorología, etc., y el software BREEZE no es la excepción; éste fue desarrollado en USA, lo que nos lleva a deducir que las condiciones con las cuales se implementó difieren de las presentes en Bucaramanga y podría arrojar altos porcentajes de error.

Aún así se encontró que los datos arrojados por la modelación fueron satisfactorios demostrando que el Material Particulado, PM-10, emitido por la empresa se dirige en dirección al Barrio Claverianos y mostrando porcentajes de errores de 45 y 32% para las dos estaciones que se establecieron como mediciones en campo.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

- Implementar el software BREEZE de modelación de la calidad del aire para emisiones de material particulado, PM-10, en la planta productora de cemento, CEMEX S.A., ubicada en la salida norte de Bucaramanga.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Establecer el área de influencia de la planta cementera donde se aplicará el modelo de calidad del aire, para emisiones de material particulado PM-10.
- Con base en los análisis de los resultados obtenidos de la modelación determinar las concentraciones máximas y mínimas de PM-10 en el área de influencia de la planta de cemento CEMEX S.A.
- Con base en el análisis de los datos obtenidos y de acuerdo a la disponibilidad de recursos de la planta cementera, proponer una solución al problema de emisión de PM-10.

### 3. MARCO TEORICO

#### 3.1. INDUSTRIA CEMENTERA

El cemento tiene como materias prima fundamentales la caliza y la arcilla. Existen principalmente dos procesos, conocidos como proceso seco y proceso húmedo; estos procesos son muy similares, siendo la diferencia la humedad del material durante el proceso. En el proceso seco es menor la humedad de la mezcla o “pasta” alimentada al horno, siendo este proceso más económico en energía que el húmedo, debido a la menor humedad por el proceso húmedo comprende los siguientes pasos:

- Explotación de la caliza y trituración.
- Almacenamiento de caliza triturada y otros agregados.
- Explotación y molienda de arcilla.
- Mezcla de las materias primas y agua.
- Molienda de la mezcla anterior para obtener la “pasta”.
- Mezcla y corrección de la “pasta”.
- Almacenamiento de la “pasta”.
- Horno de clinkerización.
- Enfriamiento y almacenamiento de clinker.
- Mezcla de clinker y yeso y molienda de la misma.
- Almacenamiento de cemento.
- Empaque y embarque del cemento.

En el proceso seco, los materiales se mezclan en forma seca (humedad alrededor del 1%). Es menor el gasto de energía, pero mucho más difícil el ajuste de la composición de la mezcla en forma seca.

En Colombia, la mayoría de las fábricas de cemento emplean aún el proceso húmedo, Los principales contaminantes emitidos son: Partículas: es el contaminante característico del proceso del cemento. Se emite en grandes cantidades, especialmente del horno, en el cual los gases de combustión arrastran material; además hay emisiones de cenizas cuando el horno trabaja con carbón.

Cuando se opera el horno con excesos de aire mayores que los adecuados, aumenta el arrastre y la emisión de partículas por la chimenea del horno. En las etapas anteriores al horno, es relativamente baja la emisión de partículas en el proceso húmedo, siendo mayor en el proceso seco.

En los procesos siguientes al horno, hay emisiones apreciables de partículas por ambos métodos, pues el material está seco; la principal de estas emisiones está en los molinos de cemento (molienda de clinker y yeso) y en la empacada, pero estos procesos casi siempre tienen equipo de control altamente eficiente, pues el valor del material emitido hace rentable su recuperación.

Hay también emisiones de Óxidos de Azufre, dependiendo del combustible quemado y su contenido de azufre, y de óxidos de nitrógeno debido a las altas temperaturas logradas en la zona caliente del horno. Las emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos, son prácticamente despreciables, debido a la buena combustión lograda.

Fabricación Cemento Pórtland: Más de 30 materiales brutos son usados aunque pueden dividirse en cuatro componentes básicos: piedra de cal (calcáreos), sílica, alúmina y hierro, se necesitan aproximadamente 3200 libras de materiales crudos y secos para producir 1 tonelada de cemento.

Los materiales secos son pulverizados e introducidos directamente a un horno rotatorio: Usualmente el horno es horizontal, conformado por un cilindro de acero recubierto de ladrillos y refractarios; del horno sale el clinker, el cual es enfriado y mezclado con 5% de yeso en peso, luego es pulverizado y se obtiene el producto final. Con el proceso húmedo, adicionando agua en la operación inicial de molienda se adiciona agua conformando una pasta; antes de que los materiales se mezclen se elimina el exceso de agua, y se obtiene la composición final. Esta mezcla se introduce en el horno y se le adiciona el yeso.

En la empresa de cemento CEMEX. S.A. dónde se adelantará el proyecto de modelación de contaminantes solo se está trabajando con los procesos trituración, molienda, almacenamiento y empaque del producto, por lo cual se debe tener en cuenta que de allí proviene las emisiones de material particulado respirable, PM-10.

Estas emisiones afectan de manera directa a los alrededores de la cementera, ya sean bosques y ríos, o la salud de los habitantes que viven en barrios cercanos a la planta. Este es el caso del Barrio Claverianos, que se encuentra a 400 metros de la cementera, y que fue construido con propósito social para dar albergue a ciudadanos sin hogar, y que sufre diariamente la polvareda proveniente de las actividades realizadas al interior de la planta.

## **3.2. MATERIAL PARTICULADO**

### **3.2.1. El Término Partícula**

Con el término genérico de partícula, en el campo de la contaminación ambiental, se designa a las sustancias en estado sólido o líquido, excepto H<sub>2</sub>O no combinada, dispersadas en un gas, de tamaño menor que el de las moléculas, pero menores de 500 μ (micras).

Suelen emplearse distintos términos cuando se habla de partículas atmosféricas, como aerosol, polvo, bruma, niebla, humo, etc. Estos términos se definen así:

*AEROSOL*: Dispersión en un medio gaseoso de partículas sólidas o líquidas de tamaño microscópico, que tienen una velocidad de caída despreciable. Tales como Smoke, Fog o Mist; con un diámetro que varía de 100 micras a 0.01 micras, o menos.

*BRUMA O NIEBLA*: Fenómeno atmosférico que se caracteriza por una falta de transparencia Atmosférica junto a la superficie terrestre, debida a la presencia de partículas hidrosópicas en suspensión que pueden absorber vapor de agua, llegando a actuar como

núcleos de condensación sobre los que se forman pequeñas gotitas de agua; se reserva el nombre de niebla, para el caso en que la visibilidad sea menor de un kilómetro.

*DROPLET (GOTICAS)*: Partículas líquidas de tal tamaño y densidad, que pueden caer en condiciones de calma, pero que pueden permanecer suspendidas en condiciones turbulentas.

*DUST (POLVO)*: Término libremente aplicado a partículas sólidas predominantemente grandes, capaces de sostenerse o suspenderse temporalmente en el aire u otros gases. El polvo no tiende a flocularse, excepto cuando se presenten fuerzas electrostáticas y las partículas se dejan cargar eléctricamente polarizándose. Las partículas son creadas por el rompimiento de grandes partículas en procesos tales como: Trituración, pulverización, perforaciones, explosiones, etc. En la mezcla de materiales y operaciones como: transporte, tamizado, barreduras, etc. Puede escaparse al aire.

*FLY ASH (CENIZAS VOLATILES)*: Partículas finamente divididas de ceniza, emitidas en el flujo de gases, en la quema de combustibles. Las partículas de ceniza pueden contener combustible sin quemar. El término se aplica predominantemente a los gases que llevan la ceniza generada por la combustión del carbón, en calderas tipo Stoker y Pulverizado.

*FOG*: Término libremente aplicado a aerosoles visibles, en los cuales la fase dispersa es un líquido. En meteorología, es una dispersión de agua.

*FUME*: Partículas sólidas, generadas por la condensación del estado gaseoso de materiales metálicos volatilizados y acompañados por una reacción química tal como la oxidación. Estas partículas floculan y a la vez colapsan.

*HOLLIN (SOOT)*: Aglomeración de partículas ricas en carbón, impregnadas con alquitrán, formadas por la combustión incompleta, de materiales carbonáceos.

*HUMO (SMOKE)*: Partículas en suspensión finamente divididas (aerosol), resultado de la combustión de compuesto de carbón u otro tipo de material combustible y de la condensación de vapores de reacciones químicas.

*MIST (NIEBLA, NEBLINA, VAPOR)*: Término aplicado libremente a la dispersión de partículas, que generalmente, a la temperatura y presión normales, son líquidas; muchas son de tamaño bastante grande para ser visibles sin ayuda visual. En meteorología, la dispersión del agua en pequeñas gotas, pero de suficiente tamaño para ser visibles y precipitarse, es lo que se denomina bancos de niebla.

*SMOG*: Término derivado de Smoke and Fog y aplicado ampliamente para los contaminante atmosféricos. En general, es niebla natural intensificada por la acción de los contaminantes industriales; suele ser una mezcla de humo y niebla. Cuando se intensifica por procesos químicos debidos a la radiación solar, se llama SMOG fotoquímico.

Las partículas presentan una gran variedad de tamaños y una constitución química muy variada según su procedencia. Pueden ser químicamente activas (fluoruro, plomo, mercurio,

berilio, etc) o ser inertes, pero absorber sustancias activas de la atmósfera, o pueden combinarse formando especies activas.

Pueden causar importantes daños sobre los materiales, vegetales y animales. Afectan también a la salud humana, entran en el cuerpo por la vía respiratoria pudiendo quedar retenidas en los alvéolos pulmonares.

Por esta razón son consideradas más nocivas las partículas pequeñas que las mayores.

### **3.2.2. Clasificación de Material Particulado**

Generalmente las partículas aparecen divididas en tres clases según su tamaño: polvos gruesos, medios y finos, aunque no existe uniformidad en los tamaño límites de las tres categorías entre los distintos autores.

Sin embargo se considera que las partículas cuyo diámetro es mayor a cinco micras ( $5\mu$ ) no ingresan a los pulmones y por lo tanto se catalogan que no son respirables.

Las partículas menores de cinco micras ( $5\mu$ ) y mayores de punto cinco micras ( $0.5\mu$ ), ingresan a los pulmones y se consideran las más perjudiciales para la salud.

Las partículas menores de punto cinco micras ( $0.5\mu$ ), ingresan a los pulmones, pero se considera que salen nuevamente a la atmósfera a través de la respiración.

También se puede clasificar según su comportamiento en la atmósfera:

Partículas de diámetro inferior a 0.1 micras su comportamiento es similar al de las moléculas; se caracterizan por grandes movimientos causados por choques con las moléculas del gas (movimiento browniano).

Partículas de diámetro entre 1 y 20 micras tienden a seguir el movimiento del gas en que se dispersan.

Partículas de diámetro superior a 20 micras, poseen velocidades de sedimentación apreciables, permaneciendo en la atmósfera por cortos periodos de tiempo.

En la tabla siguiente se dan los valores de la velocidad de sedimentación para distintos tamaños de partículas suponiéndolas esféricas, de densidad  $1\text{g/cm}^3$  y con el viento en calma.

Tabla 1. Velocidad de Sedimentación de Partículas.

<b>DIAMETRO DE PARTICULAS (<math>\mu</math>)</b>	<b>VELOCIDAD DE CAIDA (cm/seg)</b>
200	120
100	30
50	7
10	0.3
5	0.07
1	0.003
0.5	0.0007

Fuente: Contaminación del aire por material particulado, zonas urbanas complejos industriales o mineros, dispersión y monitoria, Asociación de Ingenieros Sanitarios de Antioquia, Octubre de 1993. Enrique Henao Correa.

Es habitual establecer una división entre partículas sedimentables y en suspensión. Las primeras son las que caen directamente sobre una superficie normalizada, como partículas en suspensión se consideran aquellas cuya velocidad de caída es inapreciable.

No existe tampoco uniformidad de criterio en el tamaño de partículas que se consideren de uno y otro tipo, aunque el límite de división suele situarse en torno a las 5 a 10 micras de diámetro.

### **3.2.3. Fuentes de Generación de Material Particulado**

Las fuentes de generación de material particulado son muchas y muy variadas, entre ellas se destacan la actividad transportadora, la actividad industrial, las construcciones, las vías destapadas, las quemadas, etc.

Los procesos industriales, pueden causar contaminación externa (fuera de la fábrica), contaminación interna (en los salones de trabajo), o ambas, Los contaminantes pueden ser emitidos en una forma canalizada (es decir, mediante una chimenea), en cuyo caso se pueden cuantificar con relativa facilidad, o pueden emitirse en forma fugitiva (por ejemplo el polvo que se levanta de una pila de arena al aire libre), y en estos casos es difícil o imposible cuantificar la emisión.

Las emisiones también dependen de si son generadas durante el proceso de producción o por el consumo de combustibles (caso calderas, hornos, etc), del tipo y del estado de los equipos de control.

Dentro de los procesos, generadores de material particulado, más importantes se encuentran los procesos de combustión, procesos de fundición, procesos de materias minerales y el transporte.

Este último, el transporte, también genera contaminación por el solo hecho de circular, levantando el polvo que se encuentra en el suelo.

### **3.2.3.1. Carreteras no pavimentadas**

Cuando un vehículo viaja en una carretera sin pavimentar, la fuerza de las ruedas sobre la carretera causa la pulverización del material que yace sobre esta. Partículas son levantadas y lanzadas por las ruedas, y la carretera es expuesta a las corrientes del viento que relanzan el material sobre la superficie. La turbulencia, en el viento, dejada por el paso del vehículo continúa con la polvareda.

Existen factores de emisión para este tipo de casos, a los cuales se ha agregado el material particulado emitido por el escape del vehículo, por las ruedas y los frenos y también por el material resuspendido de la superficie.

### **3.2.3.2. Carreteras pavimentadas**

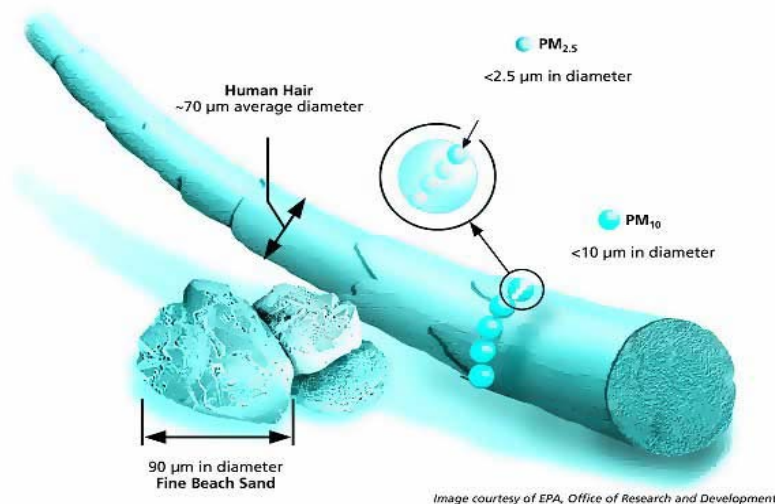
Las emisiones de material particulado ocurre cualquier vez que un vehículo viaje por una superficie pavimentada como carreteras o estacionamientos. Las emisiones de material particulado provenientes de carreteras pavimentadas se debe directamente a las emisiones de los motores de vehículos, del uso de frenos y llantas de estos, y la resuspensión del material perdido por la carretera pavimentada. En términos generales la contaminación por material particulado proveniente de la carretera pavimentada se debe al desgaste de esta y a la pérdida y resuspensión del material de la superficie. En carreteras pavimentadas de industrias, como la cementeras, la superficie es cargada continuamente de material particulado por otras fuentes, como puede ser el material arrastrado por camiones que viene de carreteras no pavimentadas, como también puede ser la deposición del material particulado proveniente de la actividad industrial que se desarrolla al interior de la empresa.

### **3.2.4. Impacto en la Salud**

El tamaño de la partícula está directamente relacionado con el potencial de esta para causar problemas en la salud. Partículas menores a 10 micras de diámetro causan la mayoría de problemas, porque estas se internan profundamente en los pulmones, y algunas llegan a entrar en el torrente sanguíneo.

La exposición a dichas partículas puede dañar tanto los pulmones como el corazón. Las, consideradas, “partículas respirables” son aquellas que se encuentran cerca de las carreteras y en industrias polvorosas, estas son las partículas mayores a 2,5 micras y menores a 10 micras; y las, consideradas, “partículas finas”, son las provenientes del humo y la neblina, que son iguales o menores a 2,5 micras de diámetro.

Figura 1. Comparación de Diámetro de Partícula con cabello humano.



Fuente: Pagina Web Oficial de la EPA.

En la Figura 1. se contextualizan los tamaños de las partículas, que pueden tener efectos dañinos sobre la salud humana, siendo comparados con el diámetro de un cabello humano.

La contaminación por material particulado, especialmente las partículas finas, contienen pequeñas porciones sólidas y líquidas que penetran en los pulmones causando serios problemas a estos. Numerosos científicos han relacionado la contaminación con material particulado a varios problemas, incluidos:

- aumento en los síntomas de problemas respiratorios, como son la irritación de vías respiratorias, garganta, o dificultad para respirar, por ejemplo;
- pérdida del funcionamiento de los pulmones;
- empeoramiento del asma;
- desarrollo de bronquitis crónica;
- funcionamiento irregular del corazón;
- ataques cardíacos (no fatales); y
- muerte prematura en personas con enfermedades respiratorias o cardíacas.

Las personas con enfermedades respiratorias o cardíacas, niños y personas mayores son la población más afectada por la exposición a contaminación por material particulado. Sin embargo, aún si se es saludable, se sentirán los síntomas de dichos problemas si se está expuesto a altos niveles de material particulado.

Los efectos biológicos del material particulado varían dependiendo de si el material es de origen vegetal, animal o mineral, pues la reacción del organismo será diferente. Algunos polvos se consideran inertes por la poca reactividad que originan en los tejidos. Partículas de bajo diámetro pero de gran longitud (tales como las de los asbestos) pueden alcanzar las regiones más profundas del sistema respiratorio.

Ho hay que olvidar dos aspectos fundamentales, que no requieren explicación: la concentración del material particulado en el aire respirado y la duración de la exposición, las cuales están en relación directa tanto con la probabilidad de que aparezca un efecto negativo, como con la rapidez y la severidad del mismo.

#### **3.2.4.1. Tipos de Efectos Biológicos del Material Particulado**

*Efectos Fibrogénicos:* Los polvos que pueden producir una reacción fibrosa en los pulmones comprenden polvos minerales tales como los que contienen una proporción de cuarzo (sílice cristalino), asbestos o carbón; polvos metálicos, tales como los de tungsteno, carburo de titanio, berilio y aluminio; polvos radiactivos, polvos de talco y ciertos polvos vegetales.

Ante exposiciones altas como las que se encuentran en los ambientes laborales, el efecto más notorio es la neumoconiosis. Dependiendo del agente causal se le asigna un nombre específico: Silicosis (sílice), antracosis (carbón), antracosilicosis (sílice + carbón), asbestosis, talcosis, aluminosis, pulmón del fundidor de bauxita, siderosis (hierro y óxido de hierro), baritosis (bario), beriliosis, etc.

*Efectos Irritantes:* Incluyen la irritación de las mucosas de los ojos y el tracto respiratorio y que se manifiesta por enrojecimiento, hinchazón, rasquiña, lagrimeo, estornudos y tos. También producen obstrucción bronquial por contracción refleja de los músculos de los bronquios y, después de una exposición de muchos años, pueden dar lugar a un grupo de entidades conocidas como enfermedades respiratorias crónicas no especificadas, cuyas características principales son la producción crónica de esputo y/o una respiración dificultosa durante el reposo y/o el ejercicio. Otros diagnósticos que hace el médico en personas expuestas a polvos irritantes corresponden a: rinitis crónica, traqueobronquitis, neumonitis, bronquitis crónica, asma bronquial, etc.

Algunos polvos que producen efectos irritantes son: arsénico y sus compuestos, algodón, ciertas maderas, pentóxido de vanadio, níquel y sus compuestos, manganeso, aluminio, cromo, y sus sales, cadmio y óxido de cadmio y sales de platino.

*Efectos Alérgicos:* Ciertos polvos, casi exclusivamente de origen vegetal o animal, tienen la propiedad de originar reacciones alérgicas. Ejemplos: algunos cereales, algunas variedades de madera, pieles, y pelos de animales, plumas, heno húmedo, bagazo, excrementos de gallinas, palomas y pericos, algodón, yute, lino y cáñamo.

Las enfermedades a que dan lugar corresponden a conjuntivitis alérgica, rinitis alérgica, laringotraqueitis, bronquitis asmática, alveolitis, bagazosis (por bagazo), bisinosis (por algodón, yute, lino o cáñamo), etc.

*Efectos Carcinogénicos:* Polvos de arsénico, trióxido de arsénico y sales del mismo están asociadas a cáncer del pulmón, de la nariz y de la piel; algunos tipos de maderas, a cáncer de nariz y la cavidad nasal; el níquel, el cromo y los compuestos de cada uno de ellos, a cáncer de la cavidad nasal y de los bronquios; talco y asbestos, a cáncer bronquial, pleural y peritoneal.

Algunas de estas sustancias actúan como carcinogénicos completos, es decir, no se requiere de exposiciones a otras sustancias para que el cáncer se desarrolle. Otras se comportan como promotores, es decir, que una vez que se ha iniciado el proceso canceroso, promueven el desarrollo del mismo.

*Efectos Tóxicos Sistémicos:* Estos efectos se caracterizan porque trascienden el sistema respiratorio y producen manifestaciones en otros órganos y sistemas, tales como el hígado, los riñones o el sistema nervioso central. No siempre se afecta el sistema respiratorio. Así, los polvos de cadmio y manganeso afectan el sistema respiratorio, los riñones y los huesos, entre otros. El plomo, en cambio, no produce efectos locales en el tracto respiratorio, aunque si en, por ejemplo, el sistema formador de la sangre, los huesos y los sistemas nerviosos central y periférico.

Dadas las concentraciones relativamente bajas que normalmente se encuentran de estos contaminantes en el aire ambiente general, muchas veces el efecto respiratorio de este tipo de polvos pasa completamente desapercibido y solo se detectan los efectos sistémicos al mucho tiempo después de iniciada la exposición.

*Efectos en la Piel:* Las partículas de materiales de reforzamiento y aislamiento, tales como la fibra de vidrio y ciertos materiales resistentes al fuego, con bastante facilidad se incrustan en la piel y causan un tipo de dermatitis folicular. Ciertas maderas y materiales sintéticos producen una dermatitis alérgica, mientras que el contacto repetido con polvos detergentes a los que se ha adicionado enzimas causa dermatitis irritativa.

### **3.2.5. Impacto en el Medio Ambiente**

La generación de material particulado afecta de manera más directa los pulmones de los seres humanos, pero también trae consigo problemas ambientales. Dentro de los problemas ambientales generados por el material particulado están la contaminación de fuentes hídricas, ya que por sedimentación estas partículas muchas veces van a dar con ríos y cuerpos de agua cercanos a las industrias generadoras del contaminante.

También son un problema para la vegetación, ya que en muchos casos se ve como el polvo cubre de manera indiscriminada la flora, impidiendo que esta tenga un desarrollo normal de su fotosíntesis, y deteriorando de igual manera el suelo, fundamento básico para la vida, añadiendo contaminantes que en muchos casos terminan por destruir la vida vegetal, y de la mano con esto la fauna se ve directamente afectada al ser parte de una cadena alimenticia y al ver contaminado su entorno dejando a la especie animal sin posibilidades de alimento y por consiguiente condenándola a la muerte.

Por último, y no menos importante, se encuentra el aspecto paisajístico, que esta siendo deteriorado con la producción indiscriminada de contaminantes atmosféricos, creando nubes de material particulado que impiden el paso libre de la luz y terminan por afectar, junto con otros contaminantes como el dióxido de carbono, la temperatura de las ciudades, creando lo mundialmente conocido como efecto invernadero o calentamiento global. Resumiendo son estos los problemas más frecuentes:

### *Reducción de la visibilidad*

Las partículas finas (menores a 2,5 micras) son las mayores causantes de la reducción de visibilidad (neblina) privando a los ciudadanos de paisajes e incluso dificultando la indispensable visibilidad de los conductores, muchas veces esta neblina es generada por fuentes antrópicas a kilómetros de distancia que son arrastradas por el viento a los puntos dónde más molesta a la comunidad, sus propios hogares.

### *Daño medioambiental*

Las partículas pueden ser llevadas por el viento largas distancias para después sedimentarse en el suelo o agua. Los efectos de esta sedimentación incluyen: acidificación de lagos y ríos; cambio del balance de nutrientes en aguas costeras y riveras; agotamiento de los nutrientes del suelo; sensibles daños en los bosques y cosechas; y afecta la diversidad del ecosistema.

### *Daño estético*

La polución por material particulado puede manchar y dañar la piedra y otros materiales, incluyendo importantes objetos culturales como estatuas y monumentos.

## **3.3. DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES**

Una corriente de contaminantes emitidos de manera continua a la atmósfera primero va a subir, luego se inclinará y después se desplazará siguiendo la dirección media del viento, el cual además va a diluir los contaminantes y los alejará de la fuente. Intuitivamente es cierto que a medida que la pluma avanza en la dirección del viento el contaminante se dispersa y se distribuye mas en ambas direcciones; horizontal y vertical. La concentración de los contaminantes promediada en el tiempo, a una distancia  $x$  vientos debajo de la fuente de emisión se distribuye normalmente en las dos direcciones transversales a la dirección media del viento, es decir en la dirección horizontal  $\pm y$ , y vertical  $\pm z$ , la distribución de los contaminantes en la pluma se llama por esta razón binormal. Este comportamiento se puede interpretar matemáticamente realizando balances de masa para el contaminante, el resultado es una ecuación diferencial de segundo orden, que puede ser resuelta explícitamente, o se puede usar una representación estadística del fenómeno, este último modelo se conoce como la ecuación Gaussiana de dispersión (MARTINEZ, 1999).

## **3.4. SOFTWARE BREEZE ISC**

BREEZE AERMOD/ISC Pro es parte de una nueva generación de Sistemas de Modelación de Calidad de Aire, creado para satisfacer la demanda de instituciones gubernamentales y no gubernamentales que día a día buscan con afán mantener Ciudades y Empresas a la vanguardia de las leyes Ambientales que cada vez son más estrictas. Este software esta especializado en prever el movimiento de los contaminantes atmosféricos generados, en especial por las fábricas, es decir, modela el movimiento de los contaminantes producidos por fuentes fijas.

Con este programa es posible identificar el impacto generado, por mas de una fuente fija, en una ciudad, con datos de meteorología y relieve específicos, también es posible añadir

una malla de receptores para así identificar las concentraciones de los contaminantes en diferentes puntos del mapa que se esté modelando. A su vez permite al usuario ingresar en el mapa edificaciones, que de una u otra manera, intervendrán en el movimiento de los contaminantes.

### **3.4.1. Introducción a la Modelación**

El modelo perfecto de concentración de contaminantes del aire permitiría predecir las concentraciones que resultarían de cualquier conjunto especificado de emisiones de contaminantes, para cualesquiera condiciones meteorológicas especificadas, en cualquier lugar, durante cualquier periodo, con confianza total en la predicción. Los mejores modelos con los que se cuenta en la actualidad se encuentran lejos de este ideal. Todos los modelos son simplificaciones de la realidad, lo que conduce a creer que “todos los modelos son erróneos; algunos modelos son útiles”, el presentado en este trabajo es útil.

Los usos que se pueden lograr con la modelación son:

- Determinación de áreas de influencia
- Predicción del impacto ambiental causado por obras futuras
- Para establecer regulaciones
- Evaluación del estado de contaminación rural y urbana
- Diseño de redes de monitoreo
- Definir máximos contribuyentes en un área contaminada
- Análisis de riesgos (escapes accidentales de gases tóxicos)
- Análisis de descargas o escapes accidentales
- Para definir altura óptima de chimeneas
- Herramienta de decisión en elección de sistemas de control
- Diseño de programas de prevención

La clasificación de la EPA para modelos de calidad de aire, donde se tienen los Gaussianos, Numéricos, Estadísticos, De Caja y Físicos.

*Gaussianos:* Es el modelo más ampliamente usado para contaminantes no reactivo.

*Numéricos:* Análisis de fuentes urbanas cuando están involucrados contaminantes reactivos.

*Estadísticos:* En casos donde los procesos físicos y químicos no poseen una clara interpretación científica.

*De Caja:* Los contaminantes emitidos se mezclan uniformemente en una caja de dimensiones finitas.

*Físicos:* Involucra técnicas para modelar fluidos como los túneles de viento.

Se destaca que el uso de los modelos trae como beneficios menores costos, tiempo menor de trabajo, predicción de concentraciones ante variación de condiciones de operación y ayuda a la ubicación de receptores para monitoreos.

Sobre la precisión de los modelos se establece que los factores que afectan en mayor grado la precisión de los modelos son: el modelo matemático en si y la calidad de los datos de entrada

- Variables conocidas
- Variables referentes a comportamientos físicos y químicos (Rango típico de variación de  $\pm 50\%$ ).

Los modelos son más fiables para medir concentraciones promedio a largo plazo que para estimar concentraciones a corto plazo en un sitio específico.

Los modelos son bastante fiables estimando picos de concentraciones en un área determinada, los errores para este caso típicamente están entre  $\pm 10\%$  a  $40\%$ . Varios autores coinciden en que los errores típicamente para un modelo que da resultados horarios los errores se encuentran entre  $-67\%$  a  $+200\%$ . (Turner, 1970).

Otras fuentes atribuyen errores de  $\pm 50\%$  para un receptor en un punto específico.

Existen unas consideraciones generales para la modelación, las cuales son:

#### *LOCALIZACIÓN DE RECEPTORES CRÍTICOS*

La red de receptores debe diseñarse teniendo en cuenta cada caso particular.

Se debe tener en cuenta el grado de precisión que se espera y el área de influencia a determinar, considerando la topografía, meteorología, sitios monitoreados y el resultado de modelación de Sondeo (Screening) previo.

#### *MECANISMOS DE REMOCION*

##### *- Deposición Seca*

El contaminante es absorbido por la superficie de contacto (absorción de la humedad del suelo, incorporación en la tierra o respiración de las plantas). En algunos contaminantes no reactivos no ocurre remoción seca.

##### *- Remoción Húmeda:*

Involucra la absorción del contaminante, partículas o gases en gotas líquidas o cristales de hielo. Estos contaminantes son transportados a la superficie de la tierra en forma de precipitación, aunque se da también cuando nieblas en reposo o partículas de niebla entran en contacto con la superficie.

#### *TRANSFORMACIONES QUÍMICAS*

Dos sustancias reaccionan para formar otra. Las sustancias originales desaparecen.

#### *CLASIFICACION URBANO / RURAL*

### **3.4.2. Variables de la Modelación**

Para realizar una descripción realista de la dispersión de contaminantes en el aire, es necesario, conocer en detalle las características de la parte baja de la atmósfera. Esta “capa” está en contacto directo con el suelo y tiene un espesor promedio (en las horas diurnas) de aproximadamente 1 – 2 km. Y se conoce como *capa límite planetaria CLP*.

Las variables claves que conforman la base de datos de entrada para aplicar un modelo de dispersión y hacerlo consistente son:

#### **3.4.2.1. Cantidad y tipo de emisiones generadas por las actividades existentes**

Estas emisiones se pueden determinar ya sea por medición directa, balance de masa o usando ecuaciones empíricas que permiten calcular la emisión por medio de factores definidos para cada tecnología, proceso o equipo y para cada combustible o materia prima usada en estos procesos. Por otra parte, es necesario conocer la ubicación física de la fuente de emisión y las especificaciones geométricas de los dispositivos utilizados para su liberación a la atmósfera.

#### **3.4.2.2. Viento**

El viento diluye los contaminantes a medida que son emitidos y los transporta lejos de su fuente.

Normalmente, la dilución de los contaminantes está en proporción directa con la velocidad media del viento a través de la columna de humo del contaminante. El viento también actúa para crear remolinos en la superficie de la tierra, con lo cual vuelve a incrementar la dispersión de dicha columna. En general, el viento es el que determina la velocidad y la dirección del movimiento de la masa de esta columna de contaminante y afecta también la magnitud de la dispersión que puede tener lugar. Los patrones locales de viento pueden verse afectados por las características de la superficie, tales como las montañas y las construcciones, así como por la existencia de lagos y ríos.

#### **3.4.2.3. Estabilidad**

La estabilidad atmosférica es una variable que se establece para caracterizar la capacidad que la atmósfera tiene para dispersar un contaminante. En realidad, lo que representa es el grado de turbulencia existente en un momento determinado. La estabilidad es, una estimación del estado de la atmósfera que no se puede medir directamente como la temperatura, la presión, la velocidad del viento, etc.; y se estima en función de la velocidad del viento y la radiación solar (CASAL *et al.*, 2001).

#### **3.4.2.4. Altura de Mezcla**

Es definida como la altura en la atmósfera hasta donde los contaminantes alcanzan a ser mezclados y dispersados (entre mas alta habrá mayor volumen para la dilución de los contaminantes) y depende de la rugosidad superficial local, de la velocidad del viento, y la radiación solar, entre otros factores.

#### **3.4.2.5. Rugosidad del Terreno**

Esta variable da cuenta de las irregularidades topográficas que afectan el comportamiento de los contaminantes generando mayor turbulencia y dispersión de los mismos. Es definida como la altura para la cual se anula la velocidad del viento en las cercanías del suelo. Es posible asociarla a un valor paramétrico relacionado con el tipo de terreno.

#### **3.4.2.6. Datos de Monitoreo de Calidad de Aire en la Zona**

Permiten validar el modelo utilizado, contrastándolo con valores de concentraciones reales y en el caso de contar con monitoreo continuo de variables meteorológicas, permite conocer cómo varía estacionalmente la velocidad y dirección del viento, así como la estabilidad.

#### **3.4.2.7. Parámetros de las fuentes**

Dependiendo del tipo de fuente, los datos que se deben conocer como mínimo para los puntos de emisión son:

- Altura de la fuente sobre el nivel del suelo,
- Diámetro de la chimenea,
- Velocidad y temperatura de los gases de salida (m/s),
- Tasa de emisión puntual (g/s),
- Factores de emisión de cada fuente y cada contaminante.

### **3.5. MARCO LEGAL**

Dentro de la legislación colombiana se encuentra el Decreto 1600 de 1994 donde se reglamenta el Sistema Nacional Ambiental, SINA, en relación con los sistemas de investigación e información ambiental en el país. En el artículo primero de dicho decreto se hace referencia a los modelos como parte de dicho sistema de información ambiental, así como también a que la modelación implica una variable de estudio frente al cambio ambiental global.

**El Documento CONPES 3344 del Departamento Nacional de Planeación** señala a los modelos de dispersión y de calidad del aire como herramientas necesarias para fortalecer los procesos de recolección y análisis de la información en el conocimiento de las relaciones entre las emisiones contaminantes, la calidad del aire y la salud.

**El Decreto 02 de 1982** (artículo 126) menciona la utilización de modelos de dispersión para la estimación de la concentración promedio anual y promedio en 24 horas, producida por la emisión de contaminantes, a sotavento de la dirección prevaleciente del viento en el área de influencia para la instalación de una fuente fija artificial de contaminación del aire cuya magnitud lo amerite.

**Decreto 2811 de 1974.** Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. El cual dictamina:

Que “corresponde al gobierno mantener la atmósfera en condiciones que no causen molestias o daños o interfieran en el desarrollo normal de la vida humana”.

“se prohibirá, restringirá o condicionará la descarga en la atmósfera de polvo, vapores, gases, humo, emanaciones y, en general, de sustancias de cualquier naturaleza que puedan

causar enfermedad, daño o molestias a la comunidad o a sus integrantes, cuando sobrepasen los grados o niveles fijados”.

**Ley 99 de 1993.** En cuanto a las funciones de las Corporaciones Autónomas Regionales:

**Artículo 31, Numeral 10.** Fijar en el área de su jurisdicción, los límites permisibles de emisión, descarga, transporte o depósito de sustancias, compuestos o cualquier otra materia que pueda afectar el medio ambiente o los recursos naturales renovables.

**Decreto 948 de Junio 5 de 1995.** De alcance general y aplicable en todo el territorio nacional, mediante el cual se establecen las normas y principios generales para la protección atmosférica, los mecanismos de prevención, control y atención de episodios por contaminación del aire generada por fuentes contaminantes fijas y móviles, la directrices y competencias para la fijación de las normas de calidad del aire o niveles de inmisión, las normas básicas para la fijación de estándares de emisión y descargas de contaminantes a la atmósfera, las de emisión de ruido y olores ofensivos, se regulan el otorgamiento de permisos de emisión, los instrumentos y medios de control y vigilancia, el régimen de sanciones por la comisión de infracciones y la participación ciudadana en el control de la contaminación atmosférica.

**Resolución 601 de Abril 4 de 2006.** Por la cual se establece la norma de calidad del aire o nivel de inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia.

Tabla 2. Norma de Calidad del Aire para PM-10, Colombia.

Contaminante	Unidad	Límite Máximo Permissible	Tiempo de Exposición
PM-10	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	70	Anual
		150	24 Horas

Nota: mg/m<sup>3</sup> o  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a las condiciones de 298,15 °K y 101,325 KPa (25 °C y 760 mm Hg).

**Decreto 979 de Abril 3 de 2006.** Por el cual se modifican las clases de normas de calidad del aire o de los distintos niveles periódicos de inmisión, así como los niveles de prevención, alerta y emergencia por contaminación del aire. De igual forma, determina la clasificación de las fuentes de área de contaminación atmosférica.

La norma de calidad del aire, o nivel de inmisión, será fijada para períodos de exposición anual, diario, ocho horas, tres horas y una hora.

La norma de calidad anual, o nivel de inmisión anual, se expresará tomando como base el promedio aritmético diario en un año de concentración de gases y material particulado PM10, y el promedio geométrico diario en un año de la concentración de partículas totales en suspensión.

La norma de calidad diaria, o nivel de inmisión diario, se expresará tomando como base el valor de concentración de gases y material particulado en 24 horas.

La norma de calidad para ocho horas, o nivel de inmisi3n para ocho horas, se expresar1 tomndo como base el valor de concentraci3n de gases en ocho horas.

La norma de calidad para tres horas, o nivel de inmisi3n para tres horas, se expresar1 tomndo como base el valor de concentraci3n de gases en tres horas.

La norma de calidad horaria, o nivel de inmisi3n por hora, se expresar1 con base en el valor de concentraci3n de gases en una hora".

## **4. METODOLOGIA**

La metodología se definió partiendo de la búsqueda de los requerimientos necesarios para correr el Software Breeze, así como también del contaminante a evaluar (PM-10), sabiendo desde un principio que este contaminante es el que más presencia hace en los procesos de elaboración del cemento al interior de la Cementera, ya que la cementera CEMEX S.A. ubicada en la salida norte de Bucaramanga, no cuenta con horno Clinker y solo efectúa los procesos de triturado, molienda y empaque.

### **4.1. ETAPA I: Delimitación del área afectada**

En esta etapa se procedió a establecer el área dónde se aplicaría el modelo. Con la colaboración de la CDMB, Corporación de Defensa de la Meseta de Bucaramanga, la cual indicó que se debería tener en cuenta el Barrio Claverianos, que se encuentra muy próximo a la cementera y por consiguiente es más vulnerable a las emisiones de material particulado provenientes de la actividad productora de CEMEX, S.A. También se escogió esta zona debido a los trabajos adelantados anteriormente en este barrio sobre calidad de aire, lo cual nos daba un antecedente de alto nivel de contaminación por partículas en la zona.

Después de identificar el barrio se buscaron imágenes satelitales de la zona, mediante la herramienta Google Earth. Una vez obtenidas las imágenes satelitales, se procedió a verificar los datos arrojados por Google Earth, como lo son distancias, coordenadas y altitud. Esta verificación se hizo en campo, con la ayuda de un GPS se tomaron las coordenadas, distancias y altura reales, las cuales coincidieron, exactamente con los datos obtenidos en Google Earth.

### **4.2. ETAPA II: Determinación de parámetros requeridos por el modelo**

Una vez obtenida la imagen satelital, se procede a determinar y recopilar todos los datos necesarios para correr el modelo. Estos datos son los de meteorología, Topografía y Ratios de Emisión.

#### **4.2.1. Datos Meteorológicos**

Dentro de los datos meteorológicos necesarios para correr el modelo se encuentran: dirección y velocidad del viento, temperatura, radiación solar y precipitación. Todos estos datos son necesarios, como mínimo, durante un año. Lo que quiere decir que la estación meteorológica de dónde se obtuvieron estos datos debe tener como mínimo un año de funcionamiento.

El software requiere Datos Horarios durante un año de Dirección del Viento, Velocidad del Viento, Temperatura, Estabilidad Atmosférica y Altura de Mezcla en el orden que se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Ejemplo de Presentación de Datos Meteorológicos.

AÑO	MES	DIA	HORA	DV	VV	TEM	EST	HM	HM
06	1	1	1	292,0000	0,1300	294,3	6	10000,0	10000,0
06	1	1	2	228,0000	0,4400	293,3	6	10000,0	10000,0
06	1	1	3	184,0000	0,2200	293,1	6	10000,0	10000,0
06	1	1	4	285,0000	0,6200	292,9	6	10000,0	10000,0

Fuente: Autor.

Todos estos datos fueron obtenidos de la estación meteorológica de la UIS, gracias a la CDMB. Todos los datos fueron directamente introducidos al modelo después de ser extraídos de la estación, con excepción de la Altura de Mezcla y la Estabilidad Atmosférica.

#### 4.2.1.1. Altura de Mezcla

La altura de la capa de mezcla utilizada para condiciones meteorológicas neutras e inestables (categoría A-D) se basa en una estimación del efecto mecánico de la capa de mezcla. Tras realizar un ajuste logarítmico lineal de la velocidad del viento a la ecuación de Randerson, se tiene que la ecuación para obtener la altura de la capa de mezcla es:

$$Z_m = 320U$$

Donde U es la velocidad del viento a 10 m de altura. La altura mecánica de la capa de mezcla es el mínimo valor diario de la altura de la capa de mezcla. Por este motivo, si el valor de  $Z_m$  es menor que la altura de la pluma del penacho, se igualará el valor de  $Z_m$  al valor de la altura de la pluma + 1 (FÍSICA Y SOCIEDAD).

Para condiciones estables, la altura de la capa de mezcla es igual a 10.000 m, para reproducir la mezcla ilimitada y tener una alta probabilidad de mezcla de los contaminantes (MARTÍNEZ, 1999 & FÍSICA Y SOCIEDAD).

#### 4.2.1.2. Estabilidad Atmosférica

Se definen seis clases de estabilidad A-F, donde A es una atmósfera extremadamente inestable y F una atmósfera estable. Para la modelación se estimó la estabilidad atmosférica según las clases de estabilidad propuestas por Pasquill-Gifford-Turner en relación con la velocidad del viento y la radiación solar (Anexo H).

El Software Breeze no acepta estos datos como letras, por tal motivo A será representado con el número 1, B con el 2, C con el 3, así hasta llegar a F el cual será representado con el número 6.

#### 4.2.2. Datos Topográficos

Estos datos se obtuvieron con una herramienta disponible en Google Earth que cuadrícula la imagen que se requiera y poniendo el cursor en cada intersección de estas cuadrículas se

obtenía un dato de altura, al finalizar este proceso se tienen que contabilizar la cantidad de cuadrículas y guardar la imagen para después ingresar esta información al software. (Ver Anexo I).

#### **4.2.3 Ratas de Emisión**

Se encontraron dos clases de emisiones producidas por fuentes puntuales y por fuentes de área, como lo son las carreteras.

##### **4.2.3.1. Emisión Fuentes Puntuales**

Para las fuentes puntuales se recopiló información de muestreos isocinéticos adelantados por CEMEX. S.A. (ver Anexo A)

Tabla 4. Información de fuentes fijas requerida por Breeze.

<b>Fuente</b>	<b>Rata de Emisión (gr/s)</b>	<b>Altura Chimenea (m)</b>	<b>Temperatura (K)</b>	<b>Diámetro de chimenea (m)</b>	<b>Velocidad de salida de gases (m/s)</b>	<b>Elevación (m)</b>
Trituradora	0,0174	2,17	306,944	0,346	19,14	662
Molino 1	0,0057	19,5	321,277	0,32	41,6	655
Molino 2	0,2222	8,25	354,277	0,346	19,14	650
Empaque	0,2123	6,65	306,888	0,775	15,36	642

Fuente: Autor

##### **4.2.3.2. Factores de Emisión para Carreteras**

Para el cálculo de estos factores de emisión fue necesario tener en cuenta la producción de cemento en CEMEX S.A. por Toneladas por Día, cómo también fue necesario trabajar con la cantidad y peso de vehículos que ingresaban y circulaban por las carreteras pavimentadas y no pavimentadas de CEMEX S.A. De igual manera fue de mucha importancia el uso de herramientas como Google Earth, la cual permitió establecer las distancias de las carreteras con su ancho y largo, fragmentadamente, con el fin de ingresarlas al software como fuentes emisoras de área de Material Particulado con las especificaciones exigidas por el Software Breeze, ya que este no permite el ingreso de la totalidad de la carretera sin ser fragmentada en rectángulos que no superen una relación largo:ancho de 1:10.

Para el hallazgo de estos factores se tuvo en cuenta el hecho de que los vehículos entran descargados y salen cargados, lo cual genera una emisión distinta a su paso por el camino, igualmente se incorporó el factor mitigador de la lluvia, que merma de alguna forma la producción de material particulado proveniente de las carreteras.

Existen dos tipos de factores de emisión para carreteras, están los factores para carreteras pavimentadas y para carreteras no pavimentadas, para los dos casos se usaron los datos de precipitación anual.

Las ecuaciones utilizadas para hallar los factores de emisión fueron:

Ecuación 1. Carretera Pavimentada.

$$E = \left[ k \left( \frac{sL}{2} \right)^{0.65} \left( \frac{W}{3} \right)^{1.5} - C \right] \left( 1 - \frac{1.2P}{N} \right)$$

Donde:

$E$  = Factor de Emisión en los mismas unidades de  $k$ .

$k$  = Constante del tamaño de la partícula. Se encuentra en tablas.

$sL$  = Carga de Material Sobre la Superficie ( $g/m^2$ ). Se encuentra en tablas.

$W$  = Peso promedio de vehículos que circulan la carretera (ton).

$C$  = Factor de emisión para flota de vehículos de los 80's para escape, frenos y ruedas. Se encuentra en tablas.

$P$  = Numero de horas con al menos 0.254mm de lluvia.

$N$  = Numero de horas del año.

Las tablas para Carreteras Pavimentadas se encuentran en el Anexo D.

Ecuación 2. Carretera No Pavimentada.

$$E = \left[ k \left( \frac{s}{12} \right)^a \left( \frac{W}{3} \right)^b \right] \left[ \frac{365 - P}{365} \right]$$

Donde:

$k$ ,  $a$  y  $b$  son constantes empíricas. Se encuentran en tabla. (ver anexo E).

$E$  = Factor de Emisión (lb/MVT).

$W$  = Peso promedio de vehículos que circulan la carretera (tons).

$P$  = Numero de días en el año con al menos 0.254mm de lluvia.

Los cálculos de estos factores de emisión se encuentran en el anexo F.

#### **4.2.4 Receptores**

Los receptores fueron ubicados teniendo en cuenta los anteriores muestreos de calidad de aire con HI-VOL hechos por FACOMAT & CIA. LTDA, contratados por la cementera CEMEX S.A.

Se ubicaron las coordenadas de los puntos donde se instalaron los HI-VOL para medición de material particulado, junto con su elevación, para posteriormente ingresar esta información al Software Breeze.

Tabla 5. Información de Receptores requerida por Breeze.

Estación Nº	Coordenada N	Coordenada W	Altitud (m.s.n.m)	Altura sobre el suelo del HI-VOL (m)
1	7°09'29,8"	73°07'51,1"	650	9
2	7°09'30,4"	73°07'53,9"	645	4

Fuente: Autor

### 4.3. ETAPA III: Aplicación del Modelo Breeze ISC pro.

Después de recopilar toda la información correspondiente a la meteorología, topografía y emisiones, y de tener las distancias reales comparadas y validadas con las distancias dadas por el programa Google Earth, se procedió a introducir esta información en el Software ISC. BREEZE.

#### 4.3.1. Manejo del Software Breeze ISC pro

Para el manejo del software BREEZE ISC PRO se establece el siguiente algoritmo que debe seguirse para obtener buenos resultados del modelo.

Figura 2. Algoritmo General.



Fuente: K2 Ingeniería

#### 4.3.1.1 Importar Plano Base

Para dar inicio al modelo es fundamental tener un plano donde situar la topografía y todos los demás datos que se requieren a continuación.

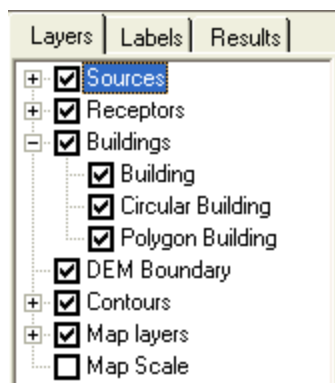
#### 4.3.1.2 Definir Opciones de Control

El siguiente paso es definir el nombre del proyecto, fecha del proyecto, los contaminantes a analizar (NO<sub>x</sub>, CO, SO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>), tipo de terreno donde se realizará la modelación y promedios de los contaminantes a analizar.

#### 4.3.1.3 Introducir Fuentes

En esta fase se introducen todos los datos que se tengan acerca de los contaminantes que se quieren evaluar, coordenadas de las fuentes fijas así como posibles edificaciones que estén dentro del plano y sean de importancia en la dispersión de los contaminantes.

Figura 3. Menú de ISC BREEZE

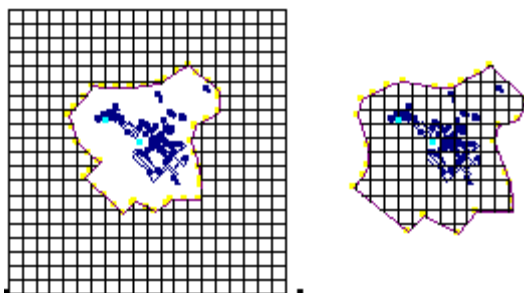


Fuente: <http://www.breeze-software.com/>

#### 4.3.1.4 Introducir Malla de Receptores

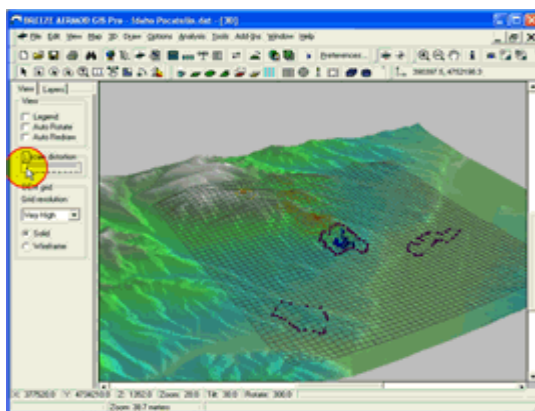
La malla de receptores dará una separación en cuadrículas para así definir el dominio del modelo y obtener datos a diferentes puntos del plano modelado, en esta fase también se añade el archivo topográfico que permitirá que el plano tenga un relieve y esté más acorde con la realidad.

Figura 4. Malla de Receptores.



Fuente: <http://www.breeze-software.com/>

Figura 5. Archivo Topográfico



Fuente: <http://www.breeze-software.com/>

#### 4.3.1.5. Introducir Opciones de Meteorología

Se introduce un archivo de formato ASCII que nos permite tener los datos de precipitación, temperatura, presión, intensidad y dirección del viento.

#### 4.3.1.6. Introducir Opciones de Salida

En esta fase se hace un reconocimiento de los datos, donde el programa evalúa que todos los datos introducidos estén en orden y no presenten ninguna contradicción.

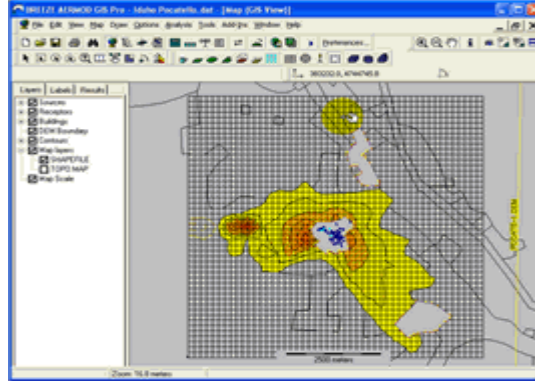
#### 4.3.1.7. Ejecutar el Modelo

Después de que el programa haya verificado que todos los datos estén en orden se procede a dar RUN al programa para que este se ejecute y muestre los resultados.

#### 4.3.1.8. Post Procesamiento de Datos

Es la fase final y aquí se recogen los resultados obtenidos en tablas estadísticas y Curvas Isopletas que arrojan resultados de esta manera:

Figura 6. Curvas Isopletas.



Fuente: <http://www.breeze-software.com/>

Los colores dan la información acerca de la concentración de los contaminantes, el color que tiende más al rojo señala una mayor concentración del contaminante que se evalúa y los colores más claros una concentración más baja del contaminante.

#### **4.4. ETAPA IV: Corrida del Modelo**

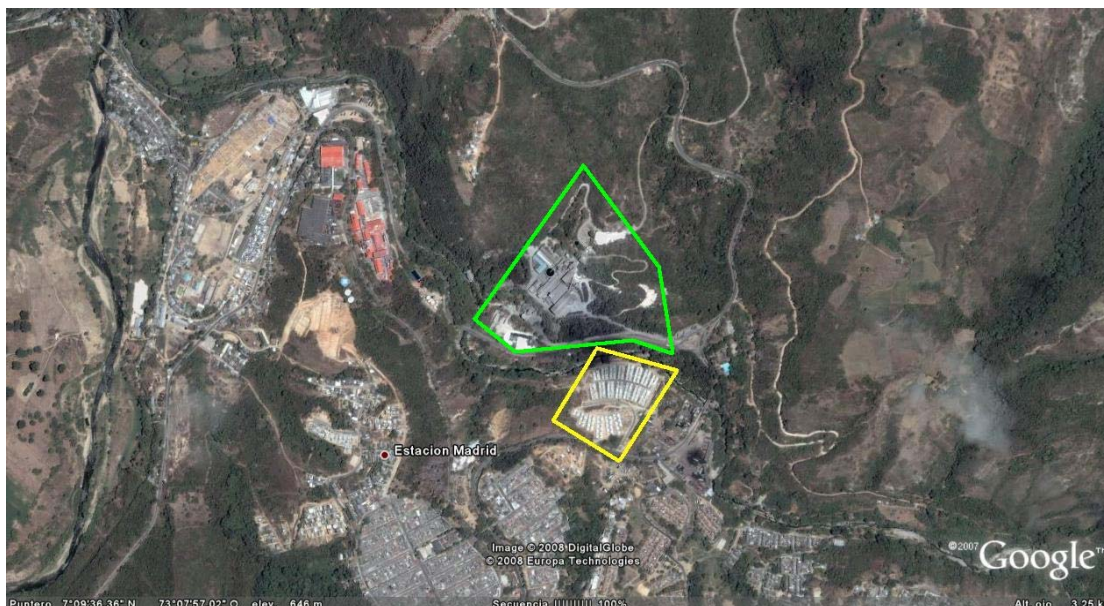
Al finalizar la aplicación del Software de modelación de aire BREEZE, se continuó con la recopilación de los resultados, la organización de estos en gráficas y tablas para su posterior análisis.

#### **4.5. ETAPA V: Análisis de los resultados**

## 5. RESULTADOS Y ANALISIS

### 5.1. AREA DE APLICACIÓN DEL MODELO

Figura 7. Imagen Satelital de la Zona Norte de Bucaramanga.



Fuente: Google Earth, versión gratuita.

El área determinada como principal receptor de emisiones de Material Particulado, PM-10, fue el Barrio Claverianos, que en la Figura 7 aparece delimitado con una línea amarilla, se eligió este sector urbano debido a la proximidad que tiene con la empresa CEMEX. S.A., que en la Figura 7 aparece bordeada con una línea verde. También se determinó zona del barrio claverianos como receptora por los muestreos de calidad de aire anteriormente adelantados allí, por FACOMAT & CIA. LTDA., (ver Anexo B), contratados por la misma cementera, CEMEX. S.A., con colaboración y vigilancia de la Corporación de la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) muestreos que facilitaron la comparación de los datos modelados con los datos reales.

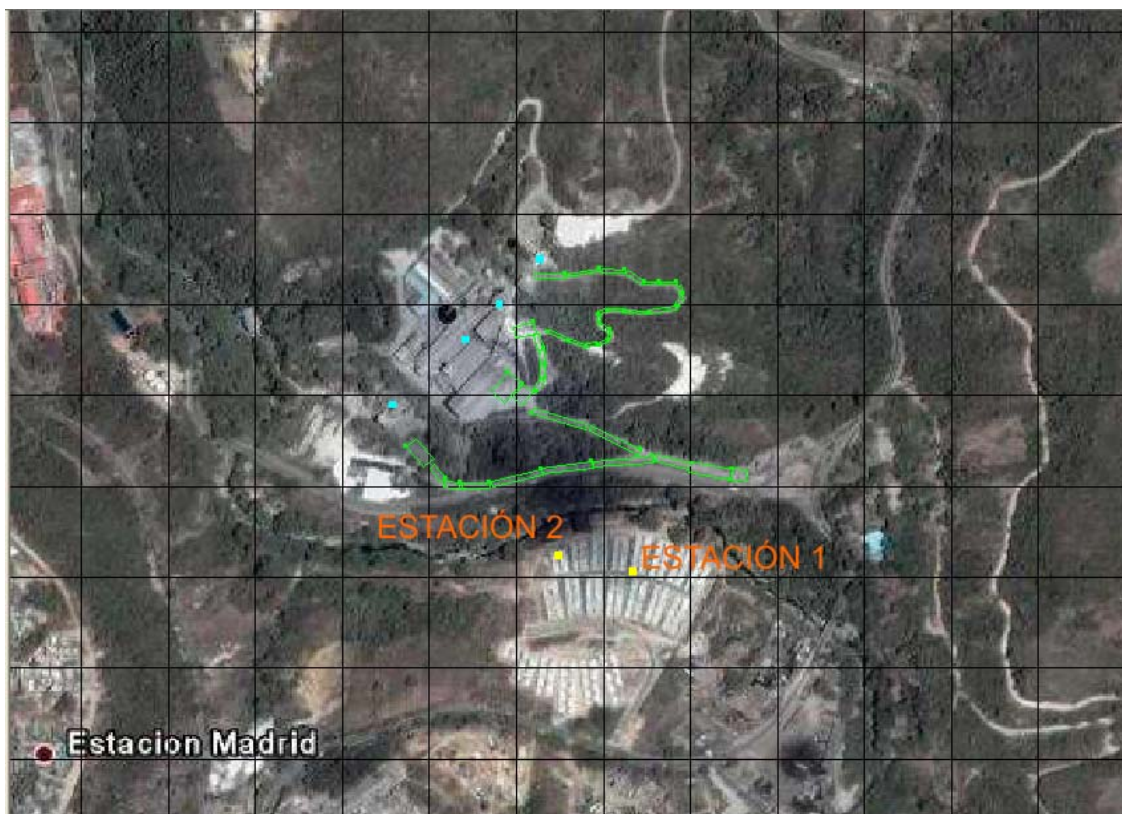
Dentro del área que comprende la planta cementera CEMEX. S.A. se encuentra dos tipos de fuentes de emisión y dos puntos receptores dónde fueron ubicados los muestreadotes de alto volumen, HI-VOL, que están representados en la figura 8 de la siguiente manera:

Fuentes Puntuales: Color Azul Claro.

Fuentes de Área (Carreteras): Color Verde.

Puntos Receptores: Color Amarillo.

Figura 8. Imagen Satelital de la Planta CEMEX. S.A. y Barrio Claverianos.



Fuente: Google Earth, versión gratuita

En la Figura 8. se observa con mayor claridad la escasa distancia, que no supera los 400 metros entre el punto receptor y la fuente contaminante mas lejana, que separa las fuentes emisoras de material particulado a los puntos receptores ubicados dentro del barrio claverianos. Estos puntos receptores se dividen en Estación 1 y Estación 2, como se muestra en la figura 8.

Al interior de la empresa y, representada en la figura 8, con rectángulos verdes, se encuentran las carreteras, las cuales representan un aporte significativo de Material Particulado. Estas se dividen en dos tipos, pavimentadas y no pavimentadas, para cada una existen factores de emisión tomados de la página web oficial de la EPA (Environmental Protection Agency) y que fueron usados en este proyecto con el fin de dar un aporte real a este fenómeno de contaminación producido por el levantamiento del polvo de las carreteras. Igualmente hay que tener en cuenta que dichos factores son, originalmente, hechos para Estados Unidos, y que muchas de las condiciones pueden variar para el caso de ser aplicado en Colombia, aún así se usaron estos factores de emisión por ser los únicos disponibles, a sabiendas del posible error presente en los resultados finales.

Dentro de las fuentes puntuales analizadas existen cuatro, pertenecientes a distintos procesos realizados en la cementera, como lo son una del triturado, dos, de la molienda y mezcla, y una más del empaque. La ubicación de estas fuentes están identificadas en la siguiente imagen (Figura 9.).

Figura 9. Imagen Satelital de la Planta CEMEX. S.A.



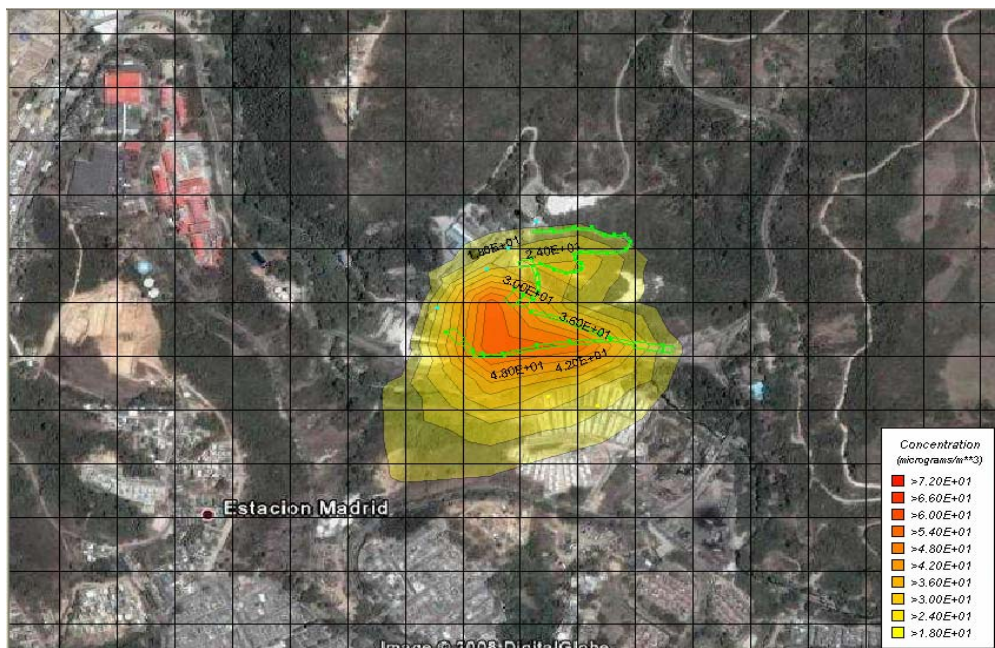
Fuente: Google Earth, versión gratuita

## 5.2. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN

### 5.2.1. Isopletas y Rosa de los vientos

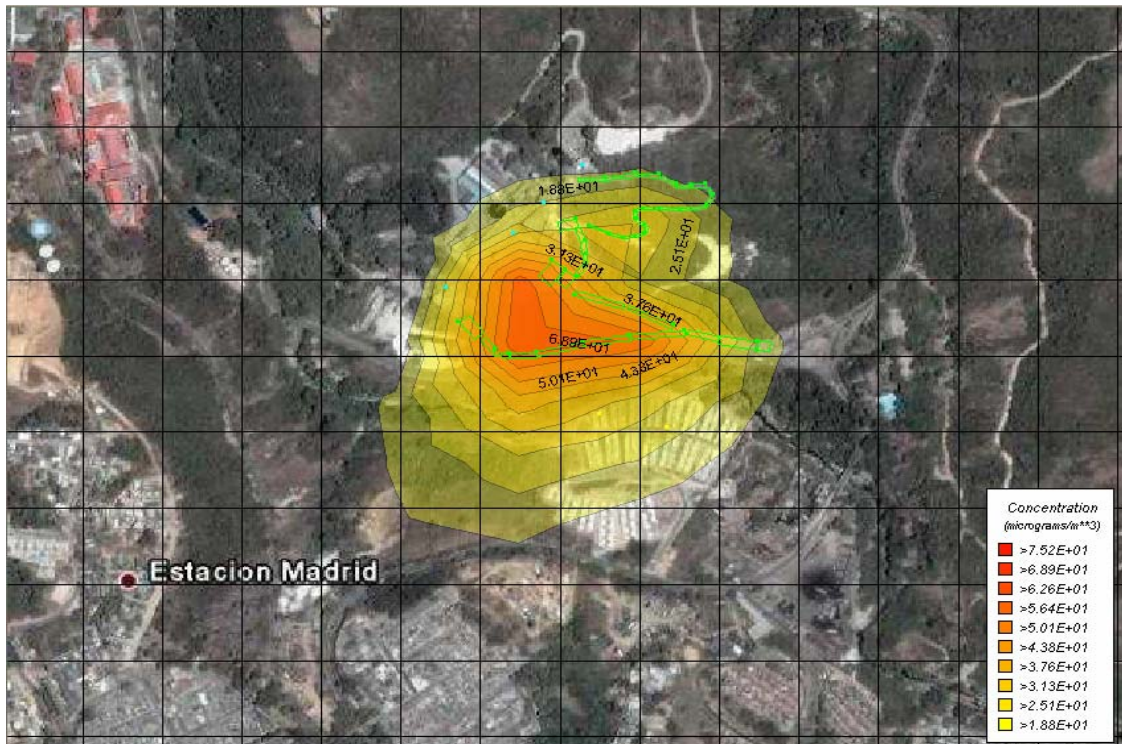
Todos los resultados presentados a continuación fueron modelados para el año 2006

Figura 10. Isopletas Modelación de PM-10, 16 de Noviembre.



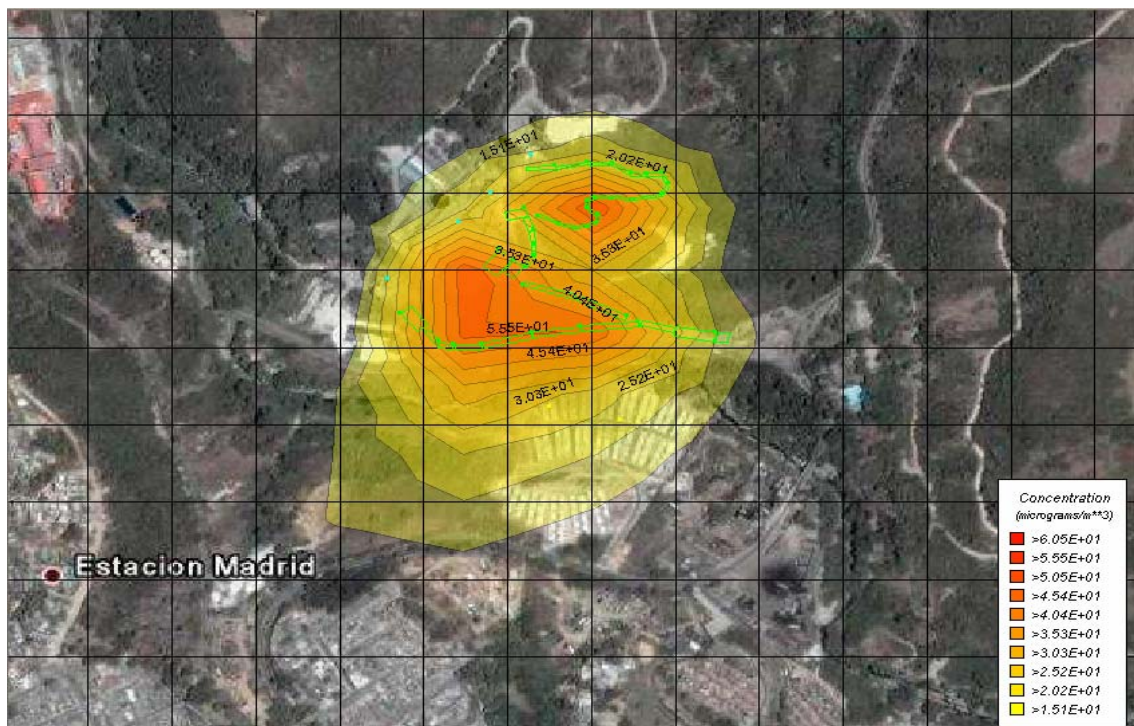
Fuente: Google Earth y Autor.

Figura 11. Isopletas Modelación de PM-10, 17 de Noviembre.



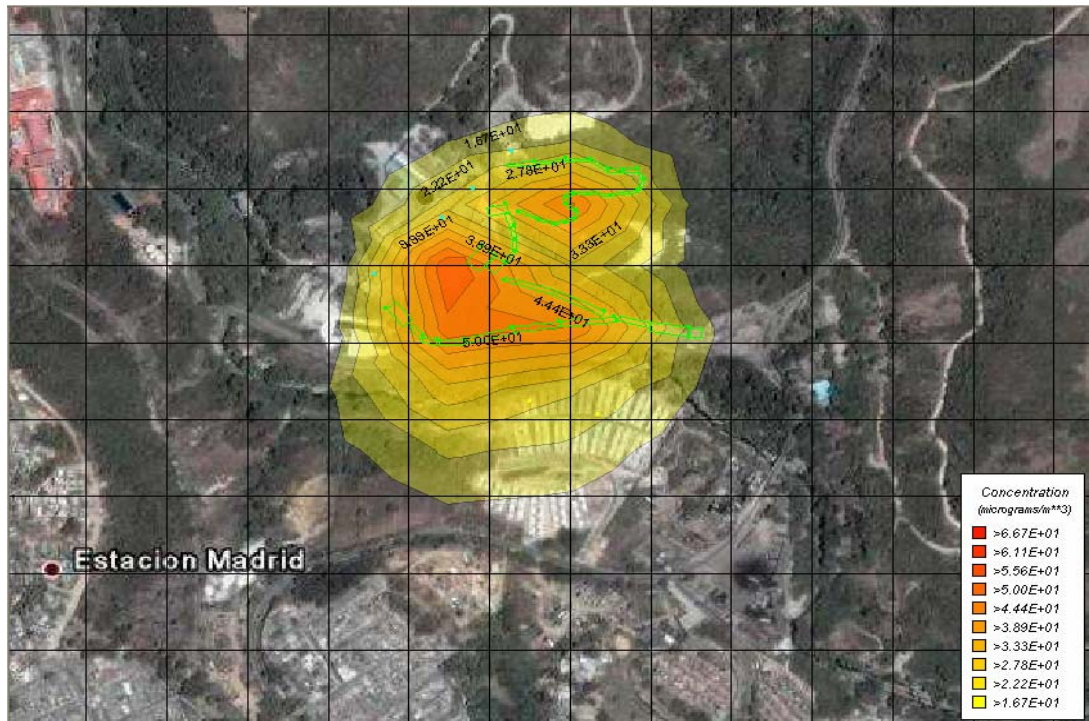
Fuente: Google Earth y Autor.

Figura 12. Isopletas Modelación de PM-10, 19 de Noviembre.



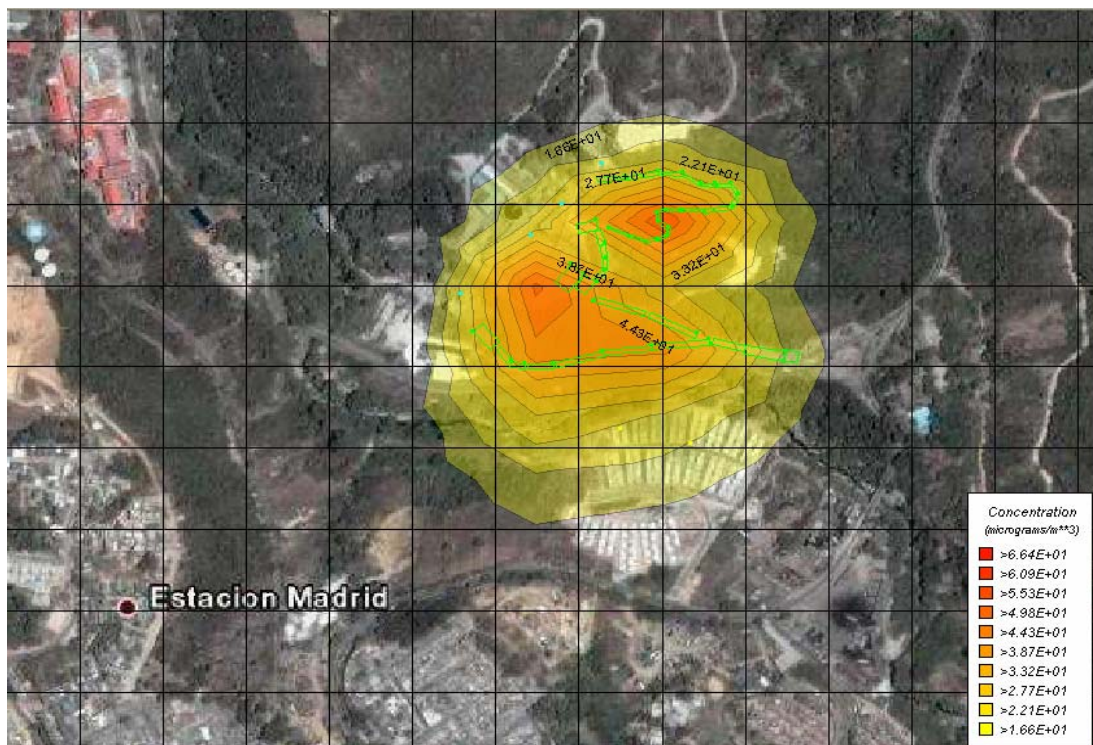
Fuente: Google Earth y Autor.

Figura 13. Isopletas Modelación de PM-10, 20 de Noviembre.



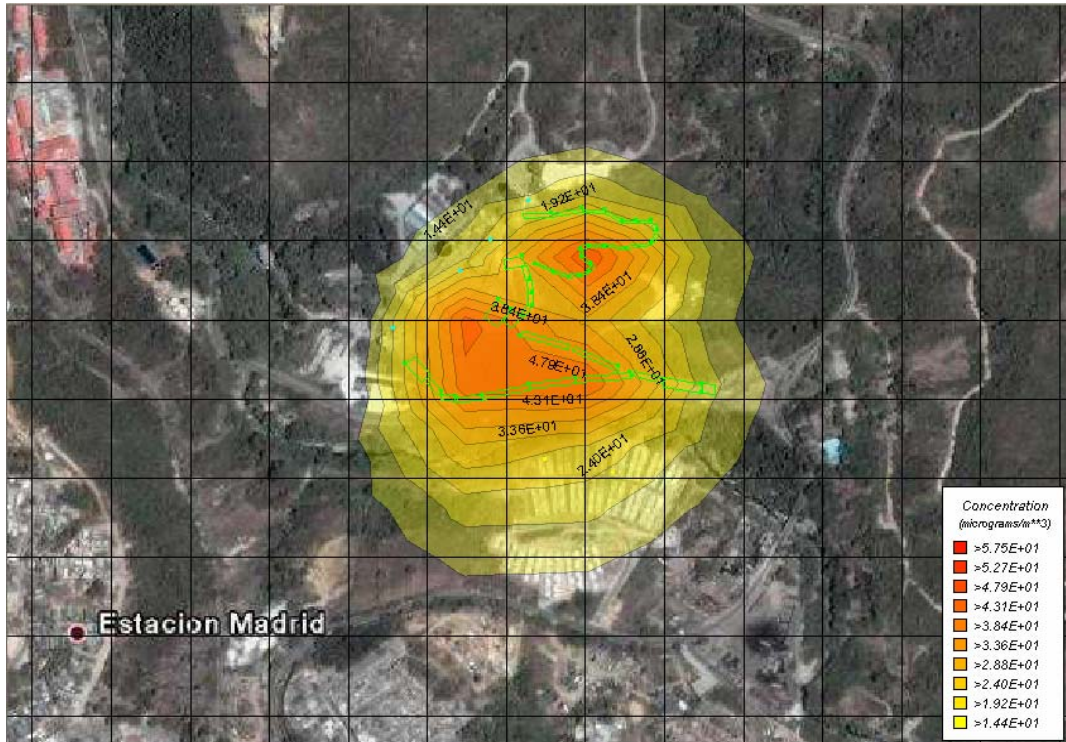
Fuente: Google Earth y Autor.

Figura 14. Isopletas Modelación de PM-10, 22 de Noviembre.



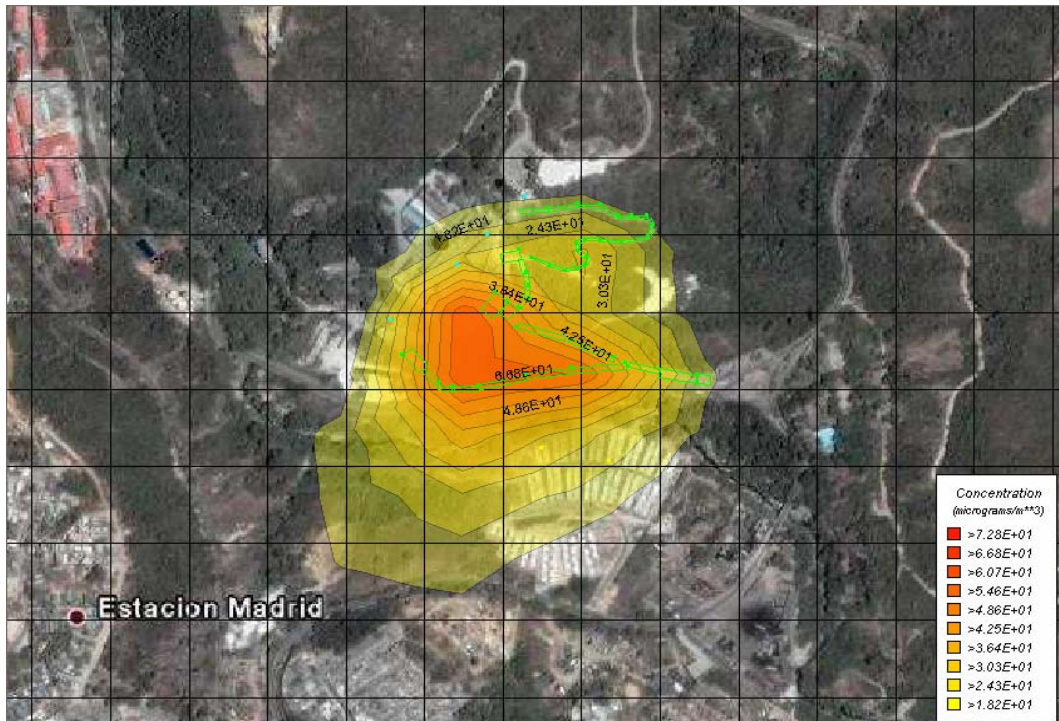
Fuente: Google Earth y Autor.

Figura 15. Isopletas Modelación de PM-10, 23 de Noviembre.



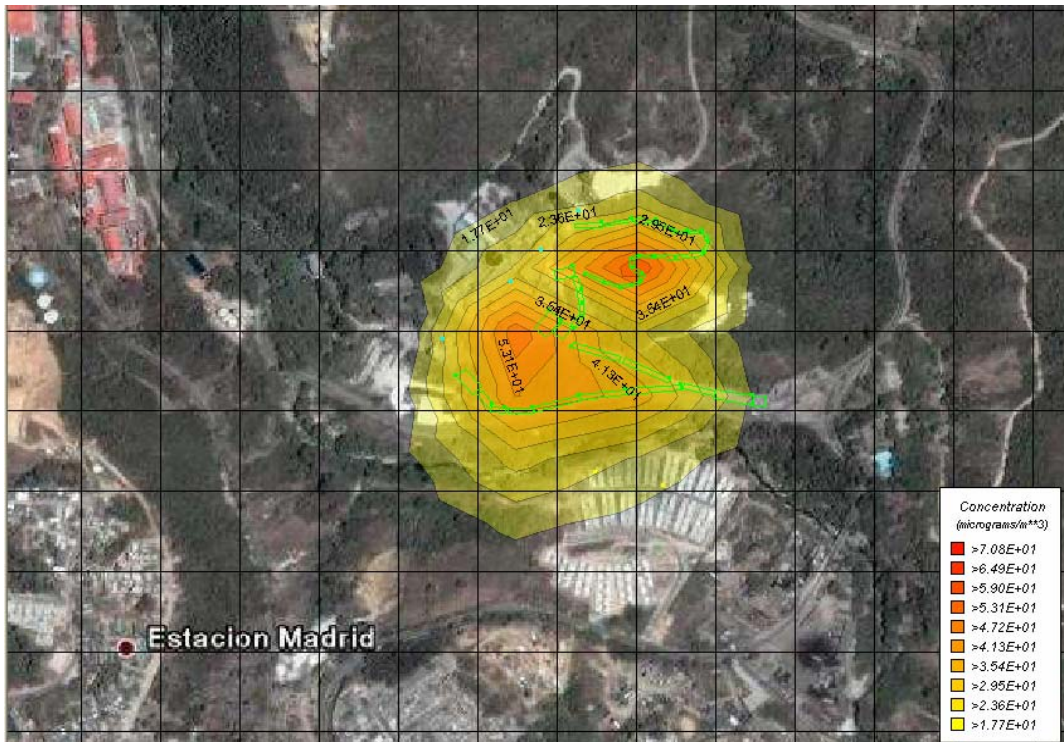
Fuente: Google Earth y Autor.

Figura 16. Isopletas Modelación de PM-10, 24 de Noviembre.



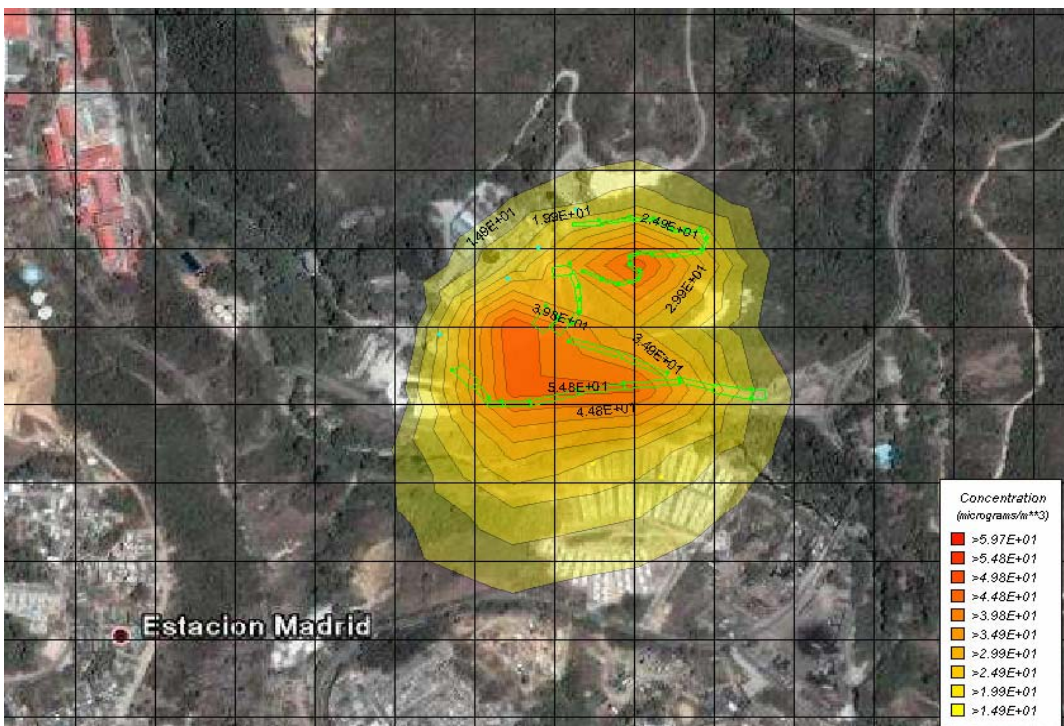
Fuente: Google Earth y Autor.

Figura 17. Isopletas Modelación de PM-10, 25 de Noviembre.



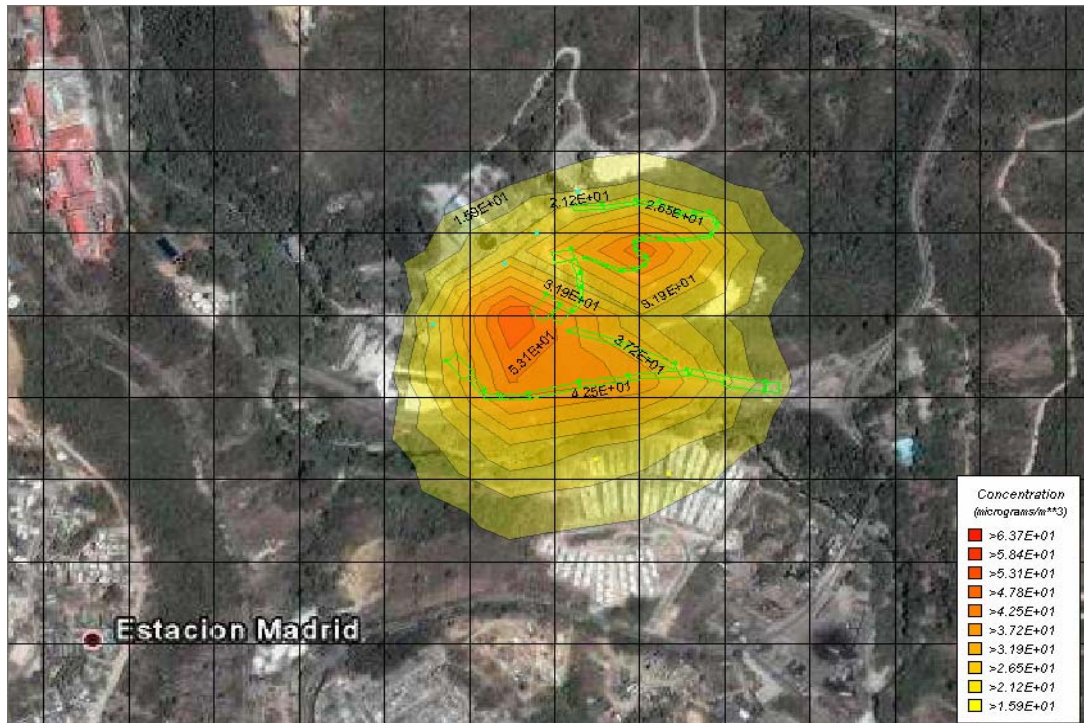
Fuente: Google Earth y Autor.

Figura 18. Isopletas Modelación de PM-10, 26 de Noviembre.



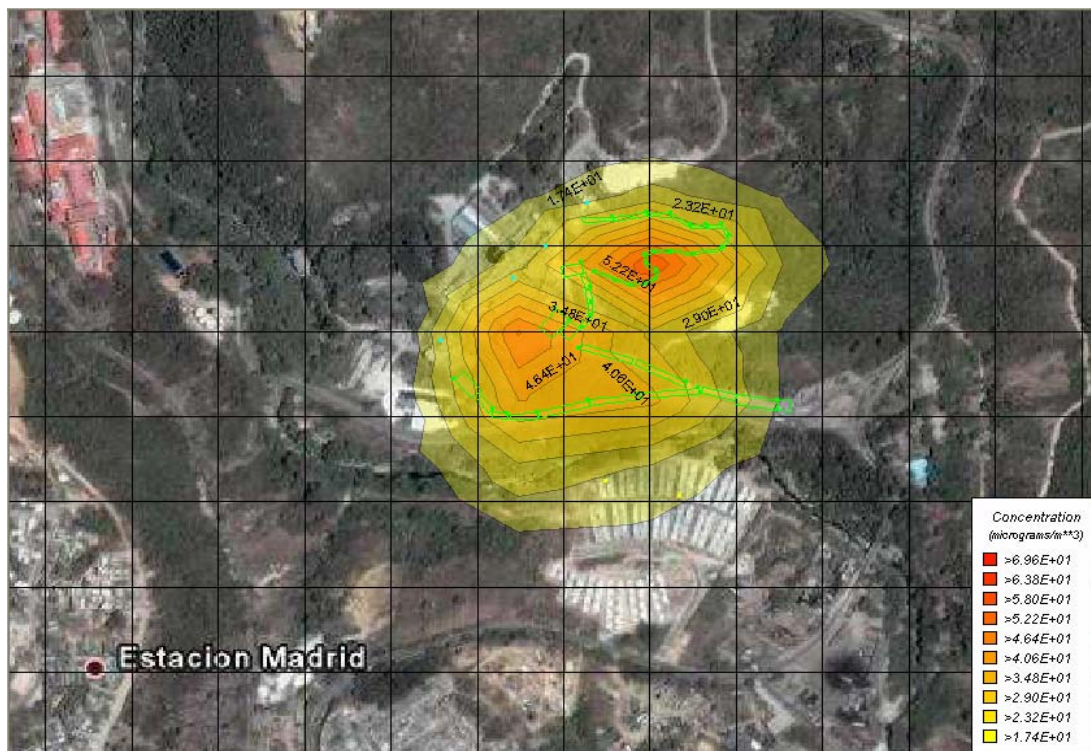
Fuente: Google Earth y Autor.

Figura 19. Isopletas Modelación de PM-10, 27 de Noviembre.



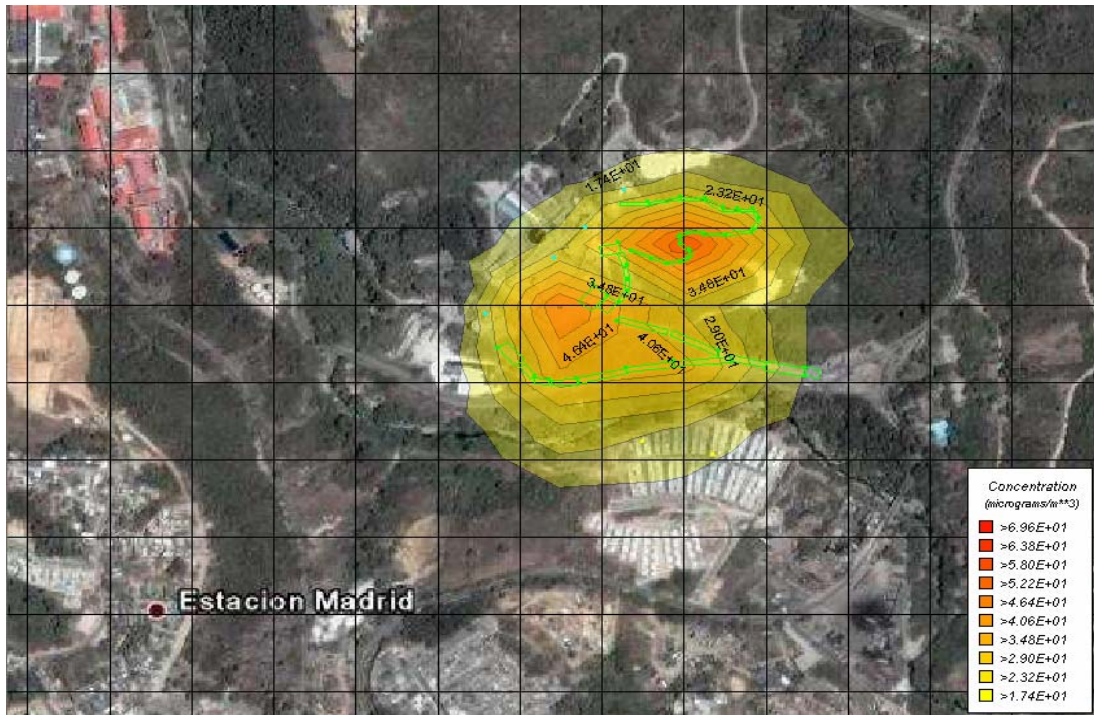
Fuente: Google Earth y Autor.

Figura 20. Isopletas Modelación de PM-10, 28 de Noviembre.



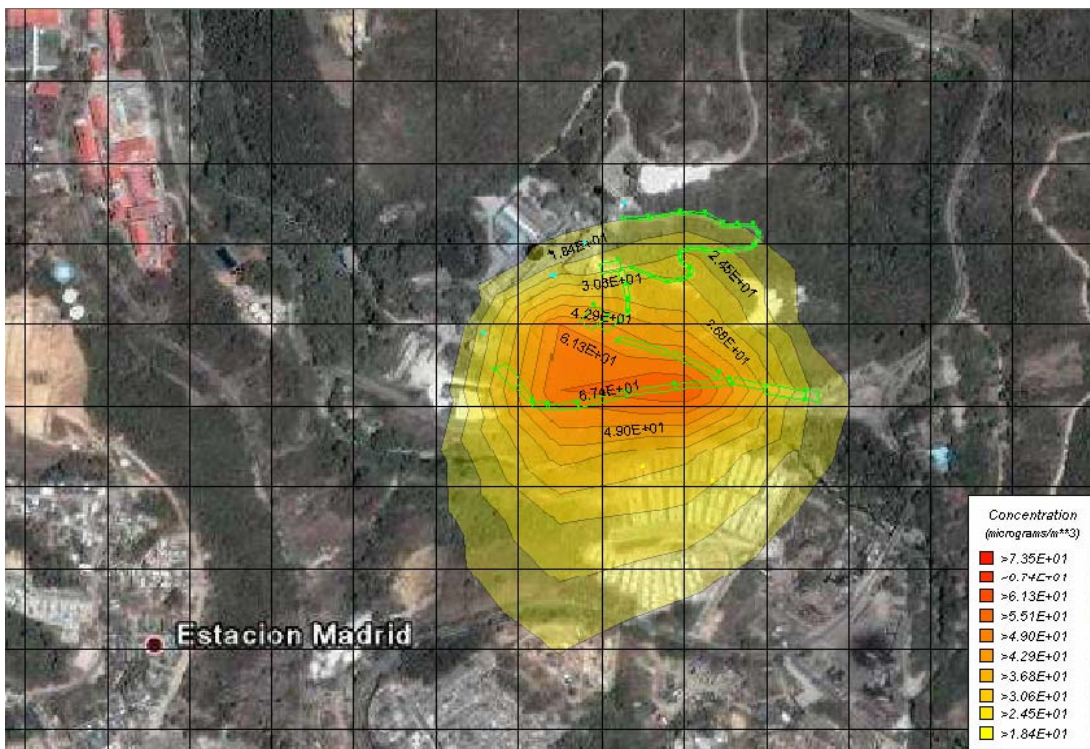
Fuente: Google Earth y Autor.

Figura 21. Isopletas Modelación de PM-10, 29 de Noviembre.



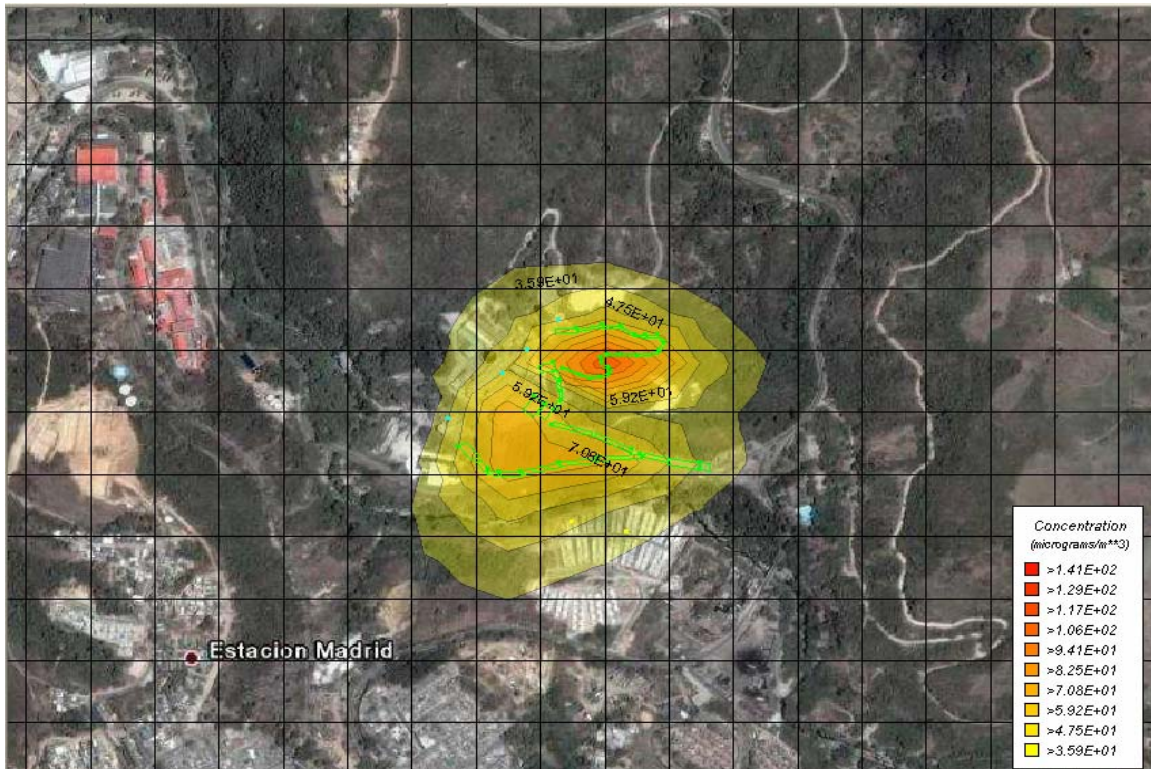
Fuente: Google Earth y Autor.

Figura 22. Isopletas Modelación de PM-10, 1 de Diciembre.



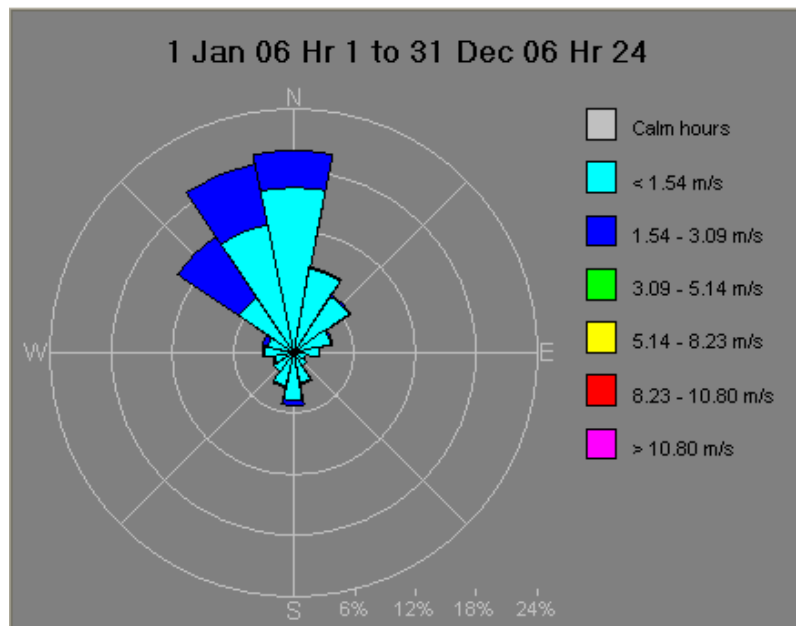
Fuente: Google Earth y Autor.

Figura 23. Isopletas Modelación de PM-10, Año 2006.



Fuente: Google Earth y Autor.

Figura 24. Rosa de los Vientos de Bucaramanga, año 2006.



Fuente: Autor. Software Breeze.

Después de observar las isopletras, se ve una tendencia marcada hacia el sur, lo cual afecta directamente al barrio Claverianos donde se encuentran nuestros puntos receptores. Pero al comparar las isopletras con la rosa de los vientos, se tiene una tendencia aparentemente equívoca ya que guiándonos por la dirección que muestra el viento, el contaminante deberían ir al norte, pero observando la topografía del lugar (ver Anexo I) se tiene que detrás de la empresa CEMEX y a sus alrededores se levantan montañas que influyen en la dirección que toman los contaminantes en ese punto.

En cuanto a las concentraciones, sabiendo que los colores más intensos representan una mayor concentración del contaminante evaluado, en este caso PM-10, se muestra claramente que en la mayoría de los casos la mayor concentración de Material Particulado, PM-10, se queda al interior de las instalaciones de CEMEX, lo cual se haría mucho más evidente de haberse tenido en cuenta la barrera natural representada en árboles y arbustos que ayudan a detener el contaminante, que no se tuvo en cuenta debido a que el modelo ISC BREEZE no contempla dicha opción.

### **5.2.2. Concentraciones de PM-10**

A continuación se muestran los resultados de concentraciones obtenidos por el monitoreo hecho por FACOMAT & CIA. LTDA. (ver Anexo B), en los dos puntos previamente determinados por la empresa, así como también los resultados de concentraciones arrojados por la modelación en los puntos asignados como receptores, que coinciden exactamente con la ubicación real de las estaciones de monitoreo establecidas por la empresa FACOMAT.

Tabla 6. Resultados de muestreo con HI-VOL para la estación 1.

<b>Muestra N°</b>	<b>Fecha</b>	<b>Aportación de CEMEX S.A. µg/m<sup>3</sup></b>
1	16/11/2007	34,05
2	17/11/2007	25,53
3	18/11/2007	0
4	19/11/2007	29,98
5	20/11/2007	33,35
6	21/11/2007	0
7	22/11/2007	21,87
8	23/11/2007	33,11
9	24/11/2007	14,18
10	25/11/2007	15,71
11	26/11/2007	32,82
12	27/11/2007	36,87
13	28/11/2007	31,73
14	29/11/2007	42,43
15	01/12/2007	17,94

Fuente: Autor.

Tabla 7. Resultados de muestreo con HI-VOL para la estación 2.

Muestra N°	Fecha	Aportación de CEMEX S.A. $\mu\text{g}/\text{m}^3$
1	16/11/2007	72,91
2	17/11/2007	32,14
3	18/11/2007	0
4	19/11/2007	28,96
5	20/11/2007	29,01
6	21/11/2007	0
7	22/11/2007	35,27
8	23/11/2007	34,57
9	24/11/2007	34,61
10	25/11/2007	35,39
11	26/11/2007	43,16
12	27/11/2007	22,78
13	28/11/2007	31,07
14	29/11/2007	23,55
15	01/12/2007	23,28

Fuente: Autor.

Los datos de concentración que aparecen en cero, significa que estos días no hubo actividad dentro de la cementera, los datos presentados en estos días, en el estudio realizado por FACOMAT, se tomaron como contaminación de fondo, la cual se restó a los otros días para así tener un dato más aproximado donde solo apareciera el aporte de Material Particulado hecho por CEMEX.

Tabla 8. Resultados de Modelación para Estación 1.

Muestra N°	Fecha	Aportación de CEMEX S.A. $\mu\text{g}/\text{m}^3$
1	16/11/2007	15,66064
2	17/11/2007	17,79084
3	18/11/2007	0
4	19/11/2007	14,357
5	20/11/2007	15,731
6	21/11/2007	0
7	22/11/2007	15,6776
8	23/11/2007	16,38578
9	24/11/2007	15,38369
10	25/11/2007	11,674
11	26/11/2007	16,07425
12	27/11/2007	12,09377
13	28/11/2007	12,18625
14	29/11/2007	12,18625
15	01/12/2007	23,93244

Fuente: Autor.

Tabla 9. Resultados de Modelación para Estación 2.

Muestra N°	Fecha	Aportación de CEMEX S.A. $\mu\text{g}/\text{m}^3$
1	16/11/2007	28,87058
2	17/11/2007	30,42531
3	18/11/2007	0
4	19/11/2007	24,87377
5	20/11/2007	23,29403
6	21/11/2007	0
7	22/11/2007	20,56526
8	23/11/2007	24,12335
9	24/11/2007	26,90731
10	25/11/2007	17,94102
11	26/11/2007	22,68698
12	27/11/2007	18,34125
13	28/11/2007	17,5105
14	29/11/2007	17,5105
15	01/12/2007	34,25687

Fuente: Autor.

Nuevamente aparecen datos en cero que indican que estos días no se hizo modelación ya que ese día la planta no aporta ningún contaminante debido a que no existe producción al interior de esta.

Tabla 10. Porcentajes de Error Estación 1.

Muestra N°	Fecha	Resultados Muestreo. $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Resultados Modelo. $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Porcentaje de Error
1	16/11/2007	34,05	15,66064	54,01%
2	17/11/2007	25,53	17,79084	30,31%
3	18/11/2007	0	0	0
4	19/11/2007	29,98	14,357	52,11%
5	20/11/2007	33,35	15,731	52,83%
6	21/11/2007	0	0	0
7	22/11/2007	21,87	15,6776	28,31%
8	23/11/2007	33,11	16,38578	50,51%
9	24/11/2007	14,18	15,38369	8,49%
10	25/11/2007	15,71	11,674	25,69%
11	26/11/2007	32,82	16,07425	51,02%
12	27/11/2007	36,87	12,09377	67,20%
13	28/11/2007	31,73	12,18625	61,59%
14	29/11/2007	42,43	12,18625	71,28%
15	01/12/2007	17,94	23,93244	33,40%
			Promedio	45,14%

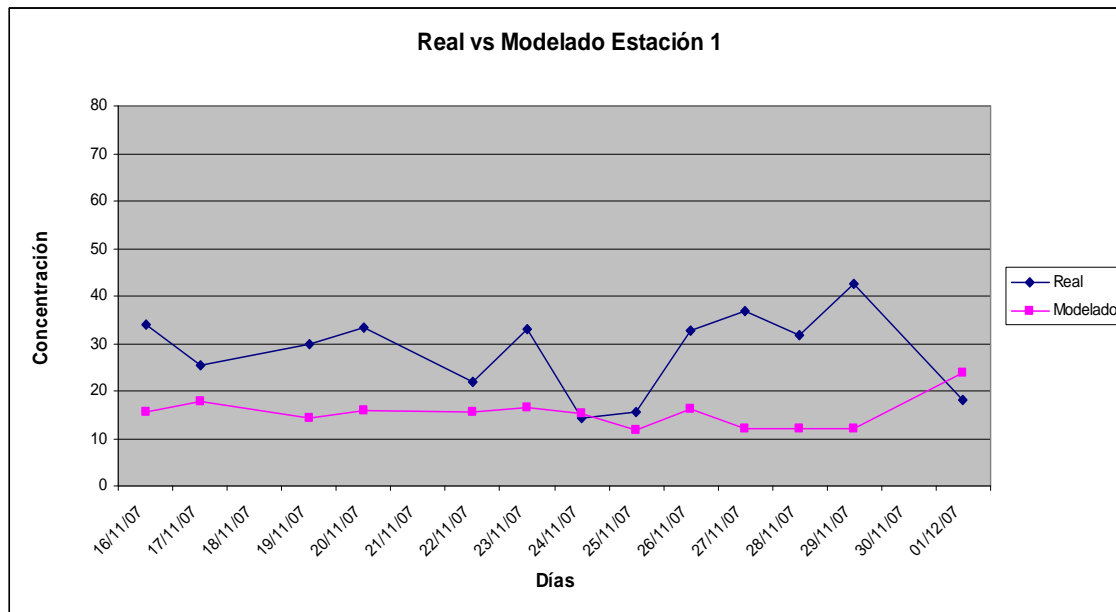
Fuente: Autor.

Tabla 11. Porcentajes de Error Estación 2.

Muestra N°	Fecha	Resultados Muestreo. $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Resultados Modelos. $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Porcentaje de Error
1	16/11/2007	72,91	28,87058	60,40%
2	17/11/2007	32,14	30,42531	5,34%
3	18/11/2007	0	0	0
4	19/11/2007	28,96	24,87377	14,11%
5	20/11/2007	29,01	23,29403	19,70%
6	21/11/2007	0	0	0
7	22/11/2007	35,27	20,56526	41,69%
8	23/11/2007	34,57	24,12335	30,22%
9	24/11/2007	34,61	26,90731	22,26%
10	25/11/2007	35,39	17,94102	49,30%
11	26/11/2007	43,16	22,68698	47,44%
12	27/11/2007	22,78	18,34125	19,49%
13	28/11/2007	31,07	17,5105	43,64%
14	29/11/2007	23,55	17,5105	25,65%
15	01/12/2007	23,28	34,25687	47,15%
			Promedio	32,80%

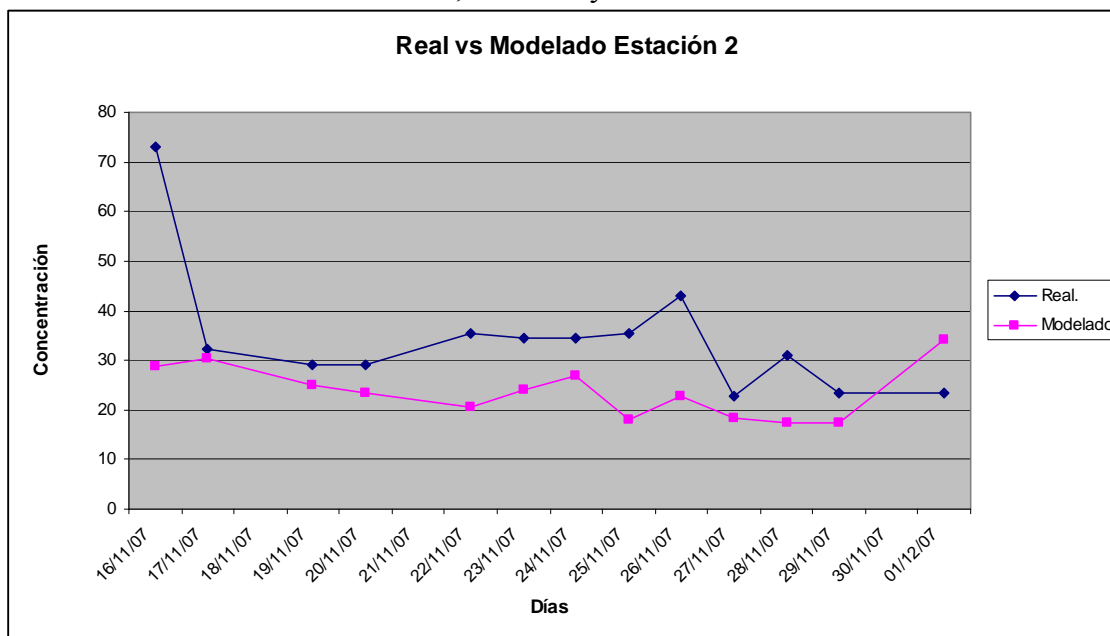
Fuente: Autor.

Gráfica 1. Resultados, HI-VOL y Modelación en Estación 1.



Fuente: Autor.

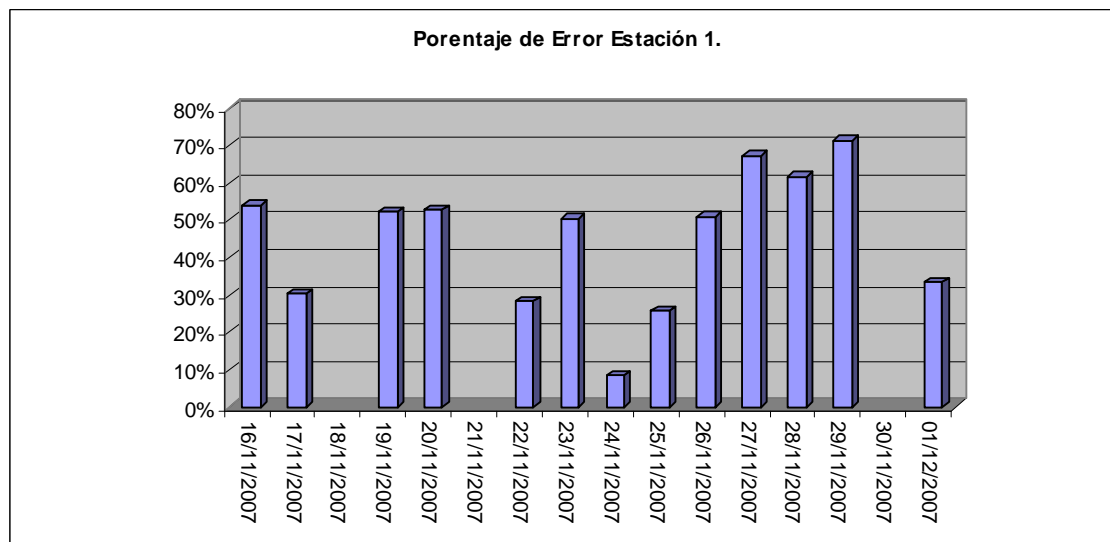
Gráfica 2. Resultados, HI-VOL y Modelación en Estación 2.



Fuente: Autor.

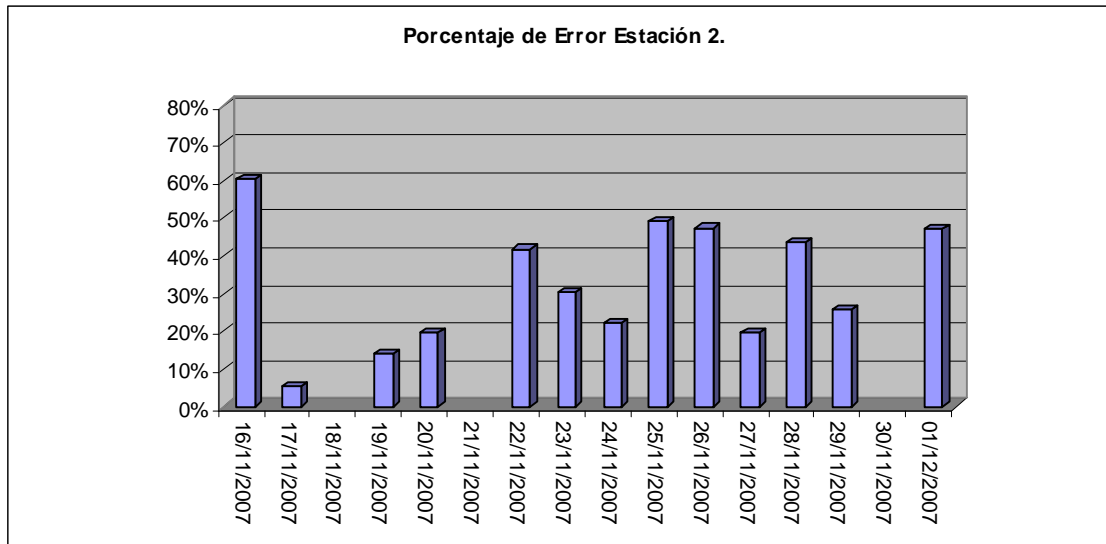
Las Gráfica 1 y Gráfica 2, muestran una comparación entre los datos resultado de la modelación y los datos reales obtenidos por FACOMAT al hacer el muestreo con HI-VOL durante 15 días para dos puntos distintos distribuidos dentro del barrio claverianos (ver figura 8.).

Gráfica 3. Porcentaje de Error Estación 1.



Fuente: Autor.

Gráfica 4. Porcentaje de Error Estación 2.



Fuente: Autor.

En la gráfica 1 se ve una mayor diferencia entre los datos reales a los datos modelados, que claramente arroja un porcentaje de error más alto, con un promedio de 45,15% (Gráfica 3), esto es debido a varios factores que afectan a los datos reales y no son tenidos en cuenta en la modelación. Primero, este punto de muestreo se encuentra alejado de la fuente emisora (Planta CEMEX. S.A.) y, por esto mismo, tiene más obstáculos que se interponen entre la fuente y el receptor, más de los que son tenidos en cuenta en el modelo, en el cual solo se ingresó la topografía como posible interferencia entre el receptor y la fuente que lo contamina. Segundo, es importante tener en cuenta que el barrio claverianos está prácticamente rodeado por la carretera que conduce a la costa atlántica desde Bucaramanga y es frecuentemente transitada por vehículos con altas emisiones de Material Particulado, como lo son buses y camiones, que contribuyen de manera significativa al incremento de estos valores reales y aunque este factor de error se trató de reducir restando la contaminación de fondo, que fue la registrada cuando la empresa no laboraba, a la contaminación registrada en un día laboral dentro de la cementera, esto no reduce el error al cien por ciento debido a que el flujo vehicular no es constante así como la aportación de Material Particulado de este a los puntos receptores. Por último hay que resaltar que el HI-VOL ubicado en este punto llamado Estación 1, se encuentra a 9 metros del suelo, 5 metros más alto que el ubicado en la Estación 2, y esto lo hace más receptivo a otras fuentes provenientes de distintas empresas, y sobre todo, del flujo vehicular que se maneja en la zona.

La segunda gráfica, por el contrario, tiene una mayor cercanía en los datos, esto es debido a la proximidad que esta estación tiene con la empresa, y a que son menos los obstáculos que hay entre receptor y emisor por lo cual el porcentaje de error es considerablemente más bajo, con un promedio de 32,8%, en la Estación 2 (Gráfica 4) que en la Estación 1 (Gráfica 3). Aún así este punto también se verá afectado como el de la Estación 1 por las emisiones

externas a la planta, que, como se explicó en el párrafo anterior, en su gran mayoría son provenientes de las fuentes móviles.

Dentro de la modelación, se manejó un factor de emisión de carreteras hecho para condiciones de Estados Unidos y el cual representa un aporte significativo de contaminante al modelo y puede generar errores en los datos de concentración final. Aunque se tuvo en cuenta para estos datos la precipitación en la Zona de Chimitá, la misma fórmula desarrollada por la EPA, para condiciones de Estados Unidos, no tiene en cuenta, por dar un ejemplo, la rapidez con la cual se pueda evaporar la humedad sobre las carreteras en estas latitudes, lo cual, para nuestra zona, significa que el suelo se seca más rápido incrementando la generación de material particulado en mayor cantidad que lo señalado por los factores de emisión tomados de la Agencia para el Medio Ambiente de los Estados Unidos.

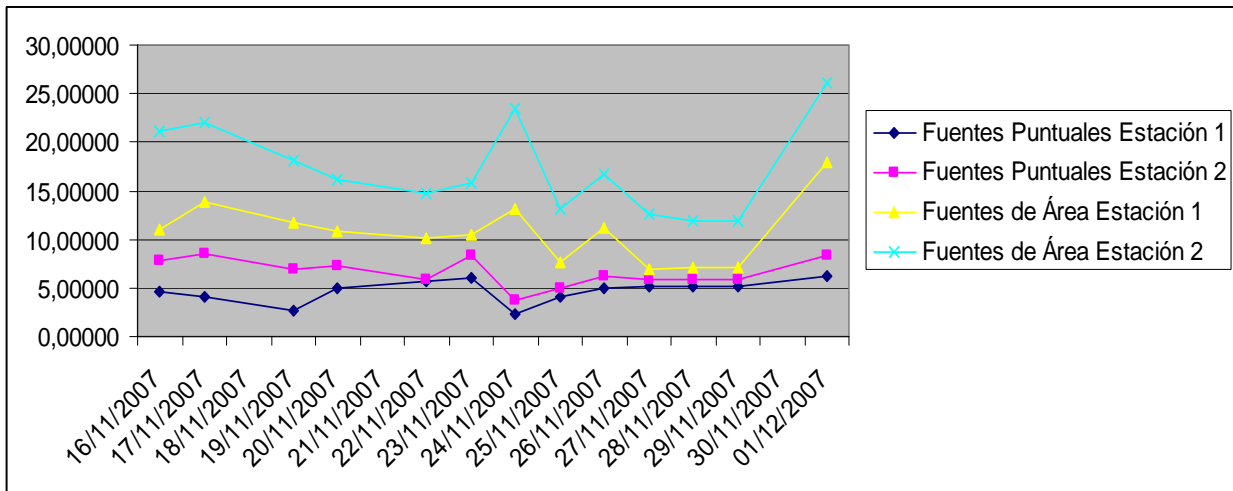
Con todo lo dicho anteriormente sobre los problemas generadores de estos porcentajes de error, es importante apuntar que, según un estudio hecho con las mismas características que el que se presenta aquí, los porcentajes de error aceptables eran del 30% para modelaciones de este tipo, lo cual deja este estudio con porcentajes muy cercanos a esta cifra logrando clasificar los resultados como satisfactorios.

Tabla 12. Comparación de Aporte Fuentes Puntuales Vs. Fuentes de Área

Día	Aporte Fuentes Puntuales ( $\mu/m^3$ )		Aporte Fuentes de Área ( $\mu/m^3$ )	
	Estación 1	Estación 2	Estación 1	Estación 2
16/11/2007	4.69154	7.87419	11.02818	21.08442
17/11/2007	4.07825	8.50819	13.80335	22.03352
18/11/2007	0	0	0	0
19/11/2007	2.75078	6.90228	11.67735	18.05762
20/11/2007	4.93804	7.26473	10.84751	16.13681
21/11/2007	0	0	0	0
22/11/2007	5.68432	5.88066	10.06041	14.78523
23/11/2007	6.06141	8.42820	10.40907	15.82075
24/11/2007	2.33389	3.77981	13.15291	23.35918
25/11/2007	4.06250	4.92342	7.66182	13.07201
26/11/2007	5.00218	6.12753	11.15608	16.65789
27/11/2007	5.11681	5.79475	7.01138	12.66650
28/11/2007	5.11897	5.79489	7.10171	11.83562
29/11/2007	5.11897	5.79489	7.10171	11.83562
01/12/2007	6.24399	8.40902	17.86948	26.02969
Concentración Promedio	4,70782	6,57558	10,68315	17,18268

Fuente: Autor.

Gráfica 5. Comparación de Aporte Fuentes Puntuales Vs. Fuentes de Área



Fuente: Autor.

En la tabla 12 y la gráfica 5 se muestra con claridad el aporte mayoritario por parte de las emisiones de área, representadas en las carreteras al interior de CEMEX S.A., ya que superan considerablemente las emisiones por fuentes puntuales, esto se debe básicamente al control que hay en las emisiones puntuales y a la falta de control existente en las carreteras, que hasta hace muy poco se detectó como una fuente importante de la producción de Material Particulado.

La continua circulación vehicular y el peso que estos vehículos tienen junto con la carga que llevan, así como la actividad que se desarrolla al interior de esta empresa, hacen que cada camión o camioneta que circule por estas vías genere una polvareda considerable que termina perjudicando de manera constante a la población aledaña del barrio claverianos.

### 5.2.3. Índices de Calidad del Aire IBUCA

El índice de Calidad del Aire IBUCA es usado por la Corporación de Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDBM) para determinar la peligrosidad del aire respirado, este índice trabaja con una norma más estricta para Material Particulado Menor a Diez Micras, PM-10, con un valor máximo permisible de  $134 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que la legislación Colombiana, y en general, la legislación mundial, hablan de un valor máximo permisible de  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . (ver anexo C).

Tabla 13. Índices de Calida del Aire IBUCA

IBUCA	DESCRIPTOR	CALIFICACION EPIDEMIOLOGICA	COLOR
0 – 1.25	Bueno	La calidad de aire es considerada como satisfactoria y la afectación en la contaminación del aire es pequeña y no evidencia ningún efecto en la salud humana.	
1.26 – 2.50	Moderado	La calidad de aire es aceptable y no tiene ningún efecto sobre la población en general.	
2.51 – 7.50	Regular	Aumento de molestias en personas con padecimientos respiratorios y cardiovasculares; aparición de ligeras molestias en la población en general.	
7.51 – 10.00	Malo	Agravamiento significativo de la salud en personas con enfermedades cardíacas o respiratorias. Afectación de la población sana.	
> 10.00	Peligroso	Alto riesgo para la salud de la población. Aparición de efectos al nivel de daño.	

Fuente: IBUCA.

Tabla 14. Índices de calidad de aire IBUCA para Datos Reales Estación 1.

Muestra N°	Fecha	Datos Reales $\mu\text{g}/\text{m}^3$	IBUCA	Descriptor	Color
1	16/11/2007	34,05	2,54	Regular	
2	17/11/2007	25,53	1,91	Moderado	
4	19/11/2007	29,98	2,24	Moderado	
5	20/11/2007	33,35	2,49	Moderado	
7	22/11/2007	21,87	1,63	Moderado	
8	23/11/2007	33,11	2,47	Moderado	
9	24/11/2007	14,18	1,06	Bueno	
10	25/11/2007	15,71	1,17	Bueno	
11	26/11/2007	32,82	2,45	Moderado	
12	27/11/2007	36,87	2,75	Regular	
13	28/11/2007	31,73	2,37	Moderado	
14	29/11/2007	42,43	3,17	Regular	
15	01/12/2007	17,94	1,34	Moderado	
Fuente: Autor.		Promedio	2,12	Moderado	

Tabla 15. Índices de calidad de aire IBUCA para Datos Modelados Estación 1.

Muestra N°	Fecha	Datos Modelados $\mu\text{g}/\text{m}^3$	IBUCA	Descriptor	Color
1	16/11/2007	15,66	1,17	Bueno	
2	17/11/2007	17,79	1,33	Moderado	
4	19/11/2007	14,36	1,07	Bueno	
5	20/11/2007	15,73	1,17	Bueno	
7	22/11/2007	15,68	1,17	Bueno	
8	23/11/2007	16,39	1,22	Bueno	
9	24/11/2007	15,38	1,15	Bueno	
10	25/11/2007	11,67	0,87	Bueno	
11	26/11/2007	16,07	1,20	Bueno	
12	27/11/2007	12,09	0,90	Bueno	
13	28/11/2007	12,19	0,91	Bueno	
14	29/11/2007	12,19	0,91	Bueno	
15	01/12/2007	23,93	1,79	Moderado	
Fuente: Autor.		Promedio	1,14	Bueno	

Comparando los valores del índice IBUCA arrojados para la Estación 1 para los datos reales como para los datos modelados, se evidencia la diferencia entre estos valores, cuestión ya antes mencionada, cuando se habló del alto porcentaje de error presente en esta estación. Aún así se puede ver que el aporte de la empresa cementera CEMEX. S. A. no supera los límites permisibles, más estrictos, usados por el cálculo del Índice de Calidad de Aire IBUCA.

Tabla 16. Índices de calidad de aire IBUCA para Datos Reales Estación 2.

Muestra N°	Fecha	Datos Reales $\mu\text{g}/\text{m}^3$	IBUCA	Descriptor	Color
1	16/11/2007	72,91	5,44	Regular	
2	17/11/2007	32,14	2,40	Moderado	
4	19/11/2007	28,96	2,16	Moderado	
5	20/11/2007	29,01	2,16	Moderado	
7	22/11/2007	35,27	2,63	Regular	
8	23/11/2007	34,57	2,58	Regular	
9	24/11/2007	34,61	2,58	Regular	
10	25/11/2007	35,39	2,64	Regular	
11	26/11/2007	43,16	3,22	Regular	
12	27/11/2007	22,78	1,70	Moderado	
13	28/11/2007	31,07	2,32	Moderado	
14	29/11/2007	23,55	1,76	Moderado	
15	01/12/2007	23,28	1,74	Moderado	
Fuente: Autor.		Promedio	2,56	Regular	

Tabla 17. Índices de calidad de aire IBUCA para Datos Modelados Estación 2.

Muestra N°	Fecha	Datos Modelados $\mu\text{g}/\text{m}^3$	IBUCA	Descriptor	Color
1	16/11/2007	28,87	2,15	Moderado	
2	17/11/2007	30,43	2,27	Moderado	
4	19/11/2007	24,87	1,86	Moderado	
5	20/11/2007	23,29	1,74	Moderado	
7	22/11/2007	20,57	1,53	Moderado	
8	23/11/2007	24,12	1,80	Moderado	
9	24/11/2007	26,91	2,01	Moderado	
10	25/11/2007	17,94	1,34	Moderado	
11	26/11/2007	22,69	1,69	Moderado	
12	27/11/2007	18,34	1,37	Moderado	
13	28/11/2007	17,51	1,31	Moderado	
14	29/11/2007	17,51	1,31	Moderado	
15	01/12/2007	34,26	2,56	Regular	
Fuente: Autor.		Promedio	1,76	Moderado	

Para el caso de la Estación 2 ya se observa más coherencia entre los datos modelados y reales y esto plasma en los resultados para el índice IBUCA, el cual muestra, igual que la anterior estación, que la calidad del aire no supera nunca el estado regular, para la definición establecida para el cálculo de este índice de calidad de aire.

## 6. CONCLUSIONES

- Debido a la falta de procesos de combustión al interior de la cementera CEMEX S.A., ya que no existe proceso con horno clinker, son los procesos de triturado, molienda, empaque y la circulación vehicular los que generan la contaminación por Material Particulado.
- Se implementó de manera satisfactoria el Software Breeze ISC para modelación de fuentes fijas y fuentes de área, arrojando resultados con porcentajes de error admisibles y mostrando una dispersión de los contaminantes constante hacia el sur de la Cementera CEMEX S.A.
- Se determinó el Barrio Claverianos como el receptor más afectado por la contaminación de Material Particulado, PM-10, esto debido a su proximidad a la planta cementera y por ser el barrio habitado más cercano a las emisiones de material particulado, lo que incrementa su vulnerabilidad. Lo anterior se vio reflejado en la recomendación de la CDMB para tener en cuenta este sector.
- Los datos arrojaron las fuentes de área de las carreteras como el mayor aportante de Material Particulado, PM-10, por encima de las fuentes puntuales debido a los escasos controles que existen sobre esta fuente.
- Las concentraciones de Material Particulado a las que se encuentran expuestos los habitantes del Barrio Claverianos no superaron, en ningún momento de la modelación, los límites máximos permisibles establecidos por la Resolución 601 de Abril 4 del 2006 de  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , arrojando valores máximos obtenidos en campo de  $42.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $72.91 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para la estación 1 y la estación 2 respectivamente, y valores máximos modelados de  $23.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $34.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para la estación 1 y estación 2 respectivamente. De igual forma los valores calculados del índice IBUCA confirman que la calidad de aire en la zona de estudio fue en la mayor parte de la modelación buena y moderada; unas pocas veces la calidad de aire llegó a ser Regular. Estos resultados se deben a que la mayor parte del material particulado emitido por la cementera se queda al interior de las instalaciones de esta, por la vegetación presente en la zona que sirve como barrera natural, protegiendo a las poblaciones cercanas.
- Los altos porcentajes de error presentes después de comparar los datos reales con los modelados se deben, sin lugar a dudas, a los aportes de contaminante de otras fuentes, como lo son los automóviles y diferentes empresas del sector industrial, también a que los factores de emisión usados para carreteras fueron tomados de la USEPA para condiciones en Estados Unidos, las cuales pueden diferir de las nuestras, en términos de meteorología y de parque automotor. Los valores máximos son 45.14% y 32.8% para la estación 1 y 2 respectivamente. Cabe aclarar que dichos porcentajes de error son aceptables para trabajos de este tipo y por consiguiente no resta validez a los resultados arrojados por la modelación de material particulado realizada en la cementera CEMEX. S.A.

## **7. RECOMENDACIONES**

Para modelaciones futuras sería importante establecer valores para la emisión de carretera. Esto implica una alta inversión, debido a que es necesario establecer las emisiones producidas por los vehículos, así como también medir el material particulado que vuelve a suspenderse. De esta manera se minimizaría el porcentaje de error arrojando datos más acordes con los reales.

Es recomendable tener una estación meteorológica dentro del área que se pretende modelar. Esto no se pudo lograr en este trabajo debido a que la estación meteorológica debe estar generando información como mínimo un año, y la que se instaló en CEMEX solo operó unos cuantos meses. Por tal razón se recurrió a datos meteorológicos de otra estación, ubicada a una distancia considerable de la planta.

En cuanto los datos arrojados por el presente trabajo, se recomienda a la empresa CEMEX. S.A. el cerramiento de los sitios de actividad que generen polvo, como también la instalación de lavaderos de llantas en diferentes puntos de las carreteras internas de la empresa. Así mismo, se insta a la empresa a continuar con la conservación del material forestal presente al interior de las instalaciones para que esta continúe su labor como barrera natural.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- Bedoya, J., Boshell, F., Centina, J., & Saavedra, E. (1993). Conferencias. Seminario Taller de Contaminación Atmosférica (Modelos de Dispersión de Contaminantes). Fundación Universitaria de Boyacá.
- Casal, J., Montiel, H., Planas, E. & VÍLCHEZ, J. A. Análisis del riesgo en instalaciones industriales. Editorial Alfaomega. 2001. pp. 207-242.
- De Nevers, N. (1998). Modelos de concentración de los contaminantes del aire. Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire. McGraw Hill.
- Espert, A.V., & López, J.A. (2004). Integración en un contexto global de los estudios de la contaminación atmosférica. Dispersión de contaminantes en la atmósfera. (España) Alfaomega.
- FÍSICA Y SOCIEDAD. Altura de la capa de mezcla. [Online]. [Citado Abril 17, 2007]. Disponible en: <http://www.fisicaysociedad.es/view/default.asp?cat=282&id=170>
- Henao, C.E. (1993). Generalidades y fuentes de generación de Material Particulado. Contaminación del aire por material particulado, zonas urbanas complejos industriales o mineros, dispersión y monitoria. Asociación de Ingenieros Sanitarios de Antioquia.
- Martínez, Álvaro I. Modelamiento de emisiones del crematorio y el incinerador Jardines la Colina. Bucaramanga, Diciembre de 1999. 20 p.
- Reed, W.R., & Westman, E.C. (2005). A model for predicting the dispersion of dust from a haul truck. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. 19, 66-74.
- REPUBLICA DE COLOMBIA. MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Normas para la Protección y el Control de la Calidad del Aire (segunda parte). 58 p.
- REPÚBLICA DE COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Contaminación y Salud. [Online]. [Citado Abril 20, 2006]. Disponible en: [http://www.minambiente.gov.co/noticias\\_home\\_2006/febrero/020206\\_contaminacion\\_del\\_aire/contaminacion\\_del\\_aire.htm](http://www.minambiente.gov.co/noticias_home_2006/febrero/020206_contaminacion_del_aire/contaminacion_del_aire.htm)
- REPUBLICA DE COLOMBIA. MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Resolución 601 del 4 de Abril de 2006. [Online]. [Citado Abril 9, 2007]. Disponible en: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=19983>

REPÚBLICA DE COLOMBIA. PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA. Decreto 979 de Abril 3 de 2006. [Online]. [Citado Abril 25, 2007]. Disponible en: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Normal.jsp?i=19973>

Turner, D. Bruce. Workbook Atmospheric Dispersion Estimates. An introduction to dispersion modeling. Lewis Publishers. Second edition. 1994. 76 p.

Trinity Consultants. (2001). BREEZE ISC GIS PRO. [Computer Software]. <http://www.breeze-software.com/>

<http://www.breeze-software.com/prod/brzSoftware.asp?P=AERMOD-ISC&T=5&T2=2>  
[Septiembre 1, 2007]

<http://www.epa.gov/ebtpages/air.html> [Septiembre 6, 2007]

# **ANEXOS**

**ANEXO A**  
**RESULTADOS MUESTREO**  
**ISOCINÉTICO CEMEX S.A.**

---

## 1 EMISION DE CONTAMINANTES

La PLANTA BUCARAMANGA de CEMEX COLOMBIA S.A., es una planta de **CEMENTO**, que por condiciones de mercado solo esta operando las áreas de molienda y empaque que tiene como fuentes de emisión fijas puntuales principales las chimeneas de evacuación de empaque, molino de cemento 1 y 2 y trituradora.

La fuente que se evalúa por muestreo directo es la chimenea del molino de cemento 1, debido a que es la única que cumple con los requisitos normativos para tal fin, la emisión de las demás fuentes se realiza por factores de emisión y para efectos del modelo de dispersión se corre el método 2 de la US EPA en cada fuente. Los muestreos en chimenea se realizaron siguiendo la metodología descrita en el Quality Assurance Handbook for Air pollution Measurement Systems: Volume III, Stationary Source-Specific Methods<sup>1</sup>.

### 1.1 OBJETIVOS

#### 1.1.1 General

Determinar la tasa de emisión másica de contaminantes en cada chimenea y las variables físicas a utilizar en la aplicación del modelo de dispersión.

#### 1.1.2 Específicos

- Determinar la tasa de emisión de material particulado evacuado al aire ambiente por intermedio de las chimeneas
- Determinar la velocidad de los gases en cada chimenea
- Determinar la temperatura de los gases en cada chimenea
- Calcular la norma de emisión y verificar su cumplimiento

---

<sup>1</sup> Documento EPA/600/R-94/038c

## 1.2 EMISION CHIMENEA MOLINO DE CEMENTO 1.

La evaluación técnica de la emisión de contaminantes expulsadas al aire ambiente por intermedio de la chimenea del molino de cemento 1, después de pasar por el sistema de control (filtros de mangas), se realizó el 3 de diciembre de 2005.

### 1.2.1 LOCALIZACIÓN Y NÚMERO DE PUNTOS. Método 1.

La figura 1-1 muestra las dimensiones de la sección transversal de la chimenea del horno, en la figura 1-2, se ve la distancia del niple a los disturbios anterior y posterior, valores que se pueden observar en la tabla 1-1. Dimensiones y en la tabla 1-2, se presentan las distancias para la marca de la sonda.

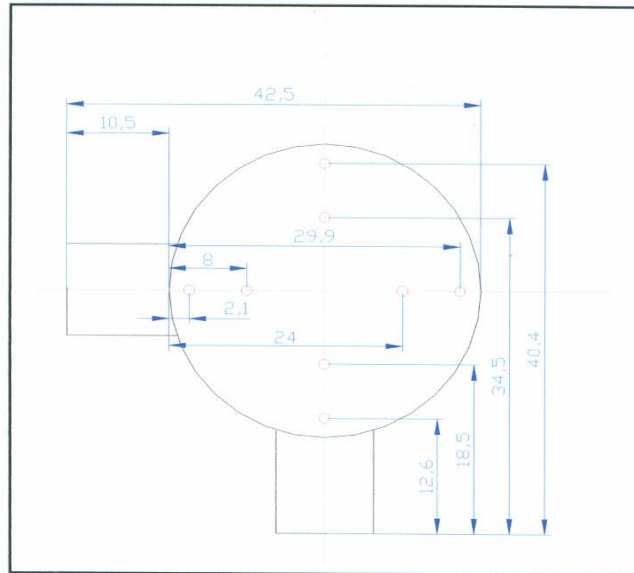
**Tabla 1-1. Dimensiones de la chimenea**

De A	Símbolo	Distancia	Unidad
Niple-Pared interior opuesta	$L_{fw}$	0.425	metros
Niple-Pared interior contigua	$L_{nw}$	0.105	metros
Diámetro interno	$D=L_{fw}-L_{nw}$	0.32	metros
Área	$A_s$	0.8657	Pies <sup>2</sup>
Distancia al disturbio anterior	B	3.9	metros
Distancia al disturbio posterior	A	5.5	metros
Relación B/D	$B_D$	12.2	Diámetros
Relación A/D	$A_D$	17.2	Diámetros
<b>Número de puntos a muestrear</b>			<b>8</b>

**Tabla 1-2. Marca de la Sonda.**

Diámetro de la chimenea		32	cm
Niple + Lamina		10.5	cm
Punto No.	porcentaje del diámetro	Distancia interna cm	Marca Sonda cm
1	6.7	2.1	12.6
2	25.0	8.0	18.5
3	75.0	24.0	34.5
4	93.3	29.9	40.4

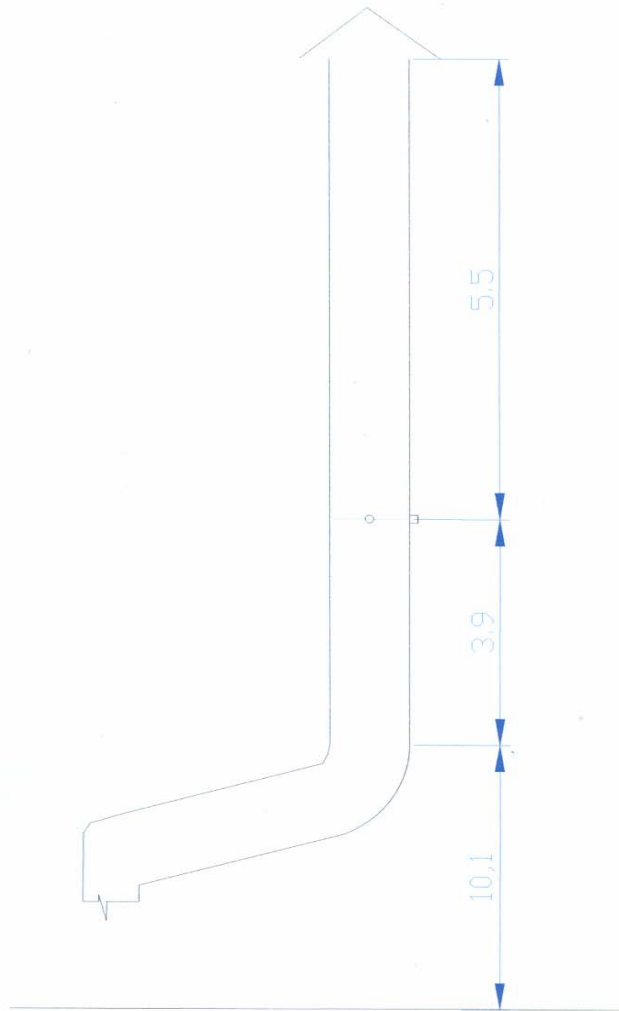
Figura 1-1. Chimenea cemento 1, sección transversal, longitud en cm.



### 1.2.2 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE LOS GASES. Método 2.

En la tabla 1-3 se presenta la información obtenida en campo y los respectivos cálculos, con el fin de calcular la velocidad del gas en el ducto y el flujo volumétrico, parámetros necesarios para determinar el diámetro de la boquilla a utilizar en el muestreo definitivo y la ecuación isocinética de trabajo.

Figura 1-2. Chimenea, vista frontal, metros.



**Tabla 1-3. Muestreo preliminar.**

PUNTO No.	Cabeza Velocidad $\Delta P_s$ "H <sub>2</sub> O	Presión Estática $P_g$ "H <sub>2</sub> O	Tem. Chimenea (ts) °F	Temperatura medidor	
				Entrada °F	Salida °F
1	3,54331	4,09449	116,6	75,2	75,2
2	4,17323	4,33071	118,4	75,2	75,2
3	5,98425	5,51181	118,4	77,0	77,0
4	5,74803	5,03937	118,4	77,0	77,0
5	3,70079	4,17323	118,4	78,8	78,8
6	4,56693	4,64567	120,2	78,8	78,8
7	5,59055	5,35433	120,2	78,8	78,8
8	5,78740	5,00000	120,2	80,6	80,6
promedios	4,83995	4,76870	118,9	77,7	77,7

La velocidad de los gases en chimenea ( $V_s$ ) esta dada por la siguiente expresión:

$$V_s = K_p \times C_p \times (\sqrt{\Delta P_s}) \times \sqrt{\frac{T_s}{P_s \times M_s}}$$

$$V_s = 136.47 \frac{ft}{s}$$

$K_p = 85.4860$

$C_p = 0.85$  (coeficiente del tubo de pitot)

$\Delta P_s =$  cabeza de velocidad promedio, tabla 1-3.

$T_s =$  temperatura absoluta en la chimenea promedio, tabla 1-3.

$P_s =$  presión en la chimenea

$M_s =$  peso molecular del gas en la chimenea a condiciones húmedas (método 3)

$$P_s = P_b + \frac{P_g}{13.6}$$

$$P_s = 28.264" Hg$$

$P_g =$  presión estática, tabla 1-3.

$P_b = 27.9134$  (presión barométrica, tabla 1-4.)

**Tabla 1-4. Variables para cálculo. M2.**

Variable	Símbolo	Valor
Presión Barométrica	$P_b$	27.9134 "Hg

Variable	Símbolo	Valor
Caudal en el Medidor <sup>2</sup>	Qm	0.75 cfm
Temperatura absoluta en la chimenea	Ts	578.85 °R
Temperatura absoluta en el medidor	Tm.	537.675 °R
Humedad de los gases en la chimenea <sup>3</sup>	B'ws	6.82 %
Peso molecular del gas seco <sup>4</sup>	Md	28.84 g/g-mol

### 1.2.3 PESO MOLECULAR DEL GAS. Método 3.

El peso molecular del gas seco se obtuvo siguiendo el método 3 US EPA, mediante muestreador Orsat, resultados que se pueden ver en la tabla 1-5.

**Tabla 1-5. Composición del gas.**

Composición	Símbolo	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Unidades
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	0	0	0	%
Oxígeno	O <sub>2</sub>	21	21	21	%
Monóxido de carbono	CO	0	0	0	%
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	79	79	79	%

$$Md = (\%CO_2 \times 0.44) + (\%O_2 \times 0.32) + (\%CO \times 0.28) + (\%N_2 \times 0.28)$$

$$Md = 28.84 \frac{lb}{lb.mol}$$

Md= Peso molecular del gas seco.

$$Ms = Md \times (1 - B'ws) + 18 \times B'ws$$

$$Ms = 28.1009 \frac{lb}{lb.mol}$$

Ms= Peso molecular del gas húmedo.

<sup>2</sup> Ver anexo: CARTA DE CALIBRACIÓN

<sup>3</sup> Ver método 4

<sup>4</sup> Ver método 3

B'ws= Humedad del gas en chimenea, Tabla 1-4.

#### 1.2.4 HUMEDAD DE LOS GASES. Método 4.

La tabla 1-6 presenta la información de campo, las tablas 1-7, 1-8 y 1-9 presentan las variables para cálculo y la información de laboratorio, la tabla 1-10 contiene los resultados de la aplicación del método 4.

**Tabla 1-6. Información de campo. M4.**

Punto No.	Tiempo	Temp. Chimenea Ts	Presión estática Pg	$\Delta H$	Medidor de gas Vm	$\Delta V$	Temperatura en el medidor Tm	
							Min.	°F
					5885,2358		Entrada	salida
1	3,45	116,6	4,0945	1,5748	5887,9718	2,7341	75,2	75,2
2	3,45	118,4	4,3307	1,5748	5890,7059	2,7341	75,2	75,2
3	3,45	118,4	5,5118	1,5748	5893,4399	2,7341	77,0	77,0
4	3,45	118,4	5,0394	1,5748	5896,1740	2,7341	77,0	77,0
5	3,45	118,4	4,1732	1,5748	5898,9080	2,7341	78,8	78,8
6	3,45	120,2	4,6457	1,5748	5901,6421	2,7341	78,8	78,8
7	3,45	120,2	5,3543	1,5748	5904,3761	2,7341	78,8	78,8
8	3,45	120,2	5,0000	1,5748	5907,1088	2,7326	80,6	80,6
Prom.	27,6	118,85	4,769	1,575	21,8710		77,675	77,675
°R		578,85					537,675	537,675

**Tabla 1-7. Variables para cálculo. M4.**

Variabes	Símbolo	Valor	Unidades
Volumen total en el medidor	Vm	21,871	dcf
Temperatura promedio en el medidor	Tm	77,675	°F
Temperatura promedio en la chimenea	Ts	118,850	°F
Presión barométrica	Pb	27,91338583	" Hg
Presión estática	Pg	4,769	" H <sub>2</sub> O
Presión en el orificio	$\Delta H$	1,575	" H <sub>2</sub> O
Coficiente de calibración del medidor	Y	0,995	

**Tabla 1-8. Contenido de humedad en burbujeadores.**

Contenido de humedad	Símbolo	Burbujeador 1	Burbujeador 2	burbujeador 3
Volumen final ml	Vf	119	107	1
Volumen inicial ml	Vi	100	100	0
Volumen neto ml	Vn	19	7	1
Volumen neto total ml.	Vn	27		

**Tabla 1-9. Contenido de humedad en la silica gel. M4.**

Contenido de humedad	Símbolo	Burbujeador 4	Unidades
Peso final	Wf	204,1	g
Peso inicial	Wi	200	g
Peso neto	Wn	4,1	g

**Tabla 1-10. Resultados. M4.**

Variables	Símbolo	Valor	Unidades
Presión en el medidor	Pm	28,02918018	" Hg
Volumen estándar total en el medidor	Vm (sd)	20,01156858	sdef
Volumen de agua estándar en burbujeadores	Vw (sd)	1,464205	ml
<b>Contenido de humedad en el gas</b>	<b>B'ws</b>	<b>0,068179383</b>	<b>Fracción</b>

**Cálculos.**

$$Pm = Pb + \frac{\Delta H}{13.6}$$

$$Vm(sd) = \frac{17.64 \times Y \times Vm \times Pm}{Tm}$$

Tm= Temperatura en el medidor en °R.

$$Vw(sd) = 0.04707 \times (Vf - Vi) + 0.04715 \times (Wf - Wi)$$

$$B'ws = \frac{Vw(sd)}{Vm(sd) + Vw(sd)}$$

**1.2.5 MATERIAL PARTICULADO. Método 5.**

Diámetro de la boquilla. Dn.

La boquilla a utilizar en el muestreo definitivo se calcula mediante la siguiente expresión teniendo en cuenta las variables obtenidas en los métodos 2, 3 y 4.

$$Dn = \sqrt{\frac{0.0358 \times Qm \times Pm}{Tm \times Cp \times (1 - B'ws)}} \sqrt{\frac{Ts \times Ms}{Ps \times \Delta P}}$$

$$Dn = 0.1389''$$

El diámetro de la boquilla utilizado es 0.126".

Ecuación isocinética de trabajo.

$$\Delta H = K \times \Delta P$$

$$\Delta H = 0.2318 \times \Delta P$$

$$K = 846.72 \times Dn^4 \times \Delta H @ \times Cp^2 \times (1 - B'ws)^2 \times \frac{Md \times Tm \times Ps}{Ms \times Ts \times Pm}$$

Tabla 1-11. Datos de campo muestreo definitivo.

No. punto transv.	Tiempo muestra (t),min	succión bomba "Hg	Cabeza vel. tubo pitot ΔPs "H <sub>2</sub> O	Dif.Pres Orif.gas seco ΔH "H <sub>2</sub> O	temperaturas				temp medidor seco		volumen gas seco (Vm) ft <sup>3</sup>
					chimenea °F	sonda °F	caja filtro °F	ult.burb. °F	entrada °F	salida °F	
Inicial											5907.10877
1	7,5	2,20	3,70	0,858	122,00	260,60	255,20	44,60	80,60	82,40	5911,29653
2	7,5	2,50	4,17	0,967	122,00	266,00	255,20	44,60	82,40	84,20	5915,74559
3	7,5	2,80	5,20	1,204	122,00	269,60	257,00	46,40	84,20	84,20	5920,41358
4	7,5	3,20	5,43	1,259	122,00	266,00	257,00	48,20	86,00	86,00	5925,54059
5	7,5	1,80	3,31	0,766	122,00	267,80	260,60	48,20	87,80	86,00	5929,64361
6	7,5	2,50	3,94	0,912	122,00	269,60	258,80	48,20	86,00	86,00	5934,20566
7	7,5	3,50	5,67	1,314	123,80	269,60	257,00	48,20	86,00	86,00	5939,62928
8	7,5	3,30	5,51	1,277	122,00	260,60	257,00	48,20	86,00	86,00	5944,69979
Promed.	60	3,50	4,62	1,07	122,23	266,23	257,23	48,20	84,88	85,10	37,59103
°R					582,225				544,875	545,1	

Tabla 1-12. Variables para cálculos. M5.

Variable	Símbolo	Valor	Unidad
Coefficiente del tubo pitot	Cp	0.85	

Variable	Símbolo	Valor	Unidad
$\Delta H@$ , para 0.75 cfm	$\Delta H@$	1.8029	"H <sub>2</sub> O
Contenido de humedad (inicial)	B'ws	6.82	%
Peso molecular seco	Md	28.84	Lb/lb.mol
Coefficiente de calibración del medidor	Y	0.995	
Presión barométrica	Pb	27.9134	" Hg

**Cálculos.**

- Presión en la chimenea. Ps.

$$Ps = Pb + \frac{Pg}{13.6}$$

$$Ps = 28.264" Hg$$

- Presión en el medidor. Pm.

$$Pm = Pb + \frac{\Delta H}{13.6}$$

$$Pm = 27.9921" Hg$$

- Volumen del medidor de gas estándar. Vm (sd).

$$Vm(sd) = \frac{17.64 \times Y \times Vm \times Pm}{Tm}$$

$$Vm(sd) = 33.8886dscf$$

- Volumen de agua estándar. Vw (sd).

**Tabla 1-13. Agua colectada, muestreo definitivo. M5.**

	Símbolo	Agua burbujeadores 1-3.	Silica gel Burbujeador 4.
Volumen o peso inicial	Vi o Wi	200	200
Volumen o peso final	Vf o Wf	246	205.8

	Símbolo	Agua burbujeadores 1-3.	Silica gel Burbujeador 4.
Diferencia		46	5.8

$$Vw(sd) = 0.04707 \times (Vf - Vi) + 0.04715 \times (Wf - Wi)$$

$$Vw(sd) = 2.4387 \text{ ccf}$$

- Contenido de humedad. B'ws.

$$B'ws = \frac{Vw(sd)}{Vm(sd) + Vw(sd)}$$

$$B'ws = 0.0671 = 6.71\%$$

- Velocidad del gas en chimenea. Vs.

$$Vs = Kp \times Cp \times (\sqrt{\Delta Ps}) \times \sqrt{\frac{Ts}{Ps Ms}}$$

$$Vs = 133.6392 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

- Caudal estándar. Qsd

$$Qsd = (1 - B'ws) \times Vs \times As \frac{528 \times Ps}{29.92 \times Ts}$$

$$Qsd = 92.4549 \frac{\text{dscf}}{\text{s}}$$

- Peso total de la muestra. Mn.

Tabla 1-14. Material particulado colectado.

	Unidades	Filtro. Mf.	Ciclón. Mc.	Lavado. Mp.
Peso inicial	g.	0.2921	0	101.4872
Peso final	g.	0.4912	0	101.4884
Peso muestra	mg.	0.9	0	1.2
<b>Peso total. Mn.</b>	<b>mg.</b>	<b>2.1</b>		

- Concentración estándar. Csd.

$$Csd = \frac{Mn}{Vm(sd)}$$

$$Csd = 0.062 \frac{mg}{dscf}$$

- Tasa de emisión a condiciones estándar. RE.

$$RE = Csd \times Qsd$$

$$RE = 5.7292 \frac{mg}{s} = 0.0206 \frac{Kg}{h}$$

- Isocinetismo por punto. Ip.

$$Ip = \frac{K4 \times Ts \times Vm(sd)}{\theta \times Vs \times Ps \times An \times (1 - B'ws)}$$

Tabla 1-15. Isocinetismo por punto.

Punto	Isocinetismo	Punto	Isocinetismo
1	102,0	5	104,6
2	101,7	6	106,8
3	95,5	7	106,1
4	102,3	8	100,5

Tabla 1-16. Constantes

Símbolo	Valor
Kp	85.4860
K1	0.0471
K2	0.0472
K3	0.0027
K4	0.0945

$A_n = 8.657 \times 10^{-5} \text{ ft}^2$  (área de la boquilla).

- Isocinetismo general. I.

$$I = \frac{100 \times T_s \left( K_3 \times V_{lc} + Y \times \left( \frac{V_m}{T_m} \right) \times P_m \right)}{60 \times \theta \times V_s \times P_s \times A_n}$$

$$I = 101.88\%$$

### 1.3 EMISIONES MOLINO DE CEMENTO 2

La evaluación de la emisión de material particulado expulsadas al aire ambiente por intermedio de la chimenea del FILTRO DE MANGAS, utilizado como sistema de control, se realizo mediante la aplicación del factor de emisión mas critico, para 5 tn/h, como capacidad máxima de ese molino.

El calculo de la velocidad y la temperatura de los gases en chimenea, se realizo mediante la aplicación del método 2 de la US EPA.

#### 1.3.1 LOCALIZACIÓN Y NÚMERO DE PUNTOS. Método 1.

La figura 1-3 muestra las dimensiones de la sección transversal de la chimenea del horno y la ubicación de los puntos dentro de la chimenea.

En la figura 1-4, se ve la distancia del niple a los disturbios anterior y posterior, valores que se pueden observar en la tabla 1-17. Dimensiones y en la tabla 1-18, se presentan las distancias para la marca de la sonda.

Figura 1-3. Chimenea molino cemento 2, sección transversal, longitud en cm.

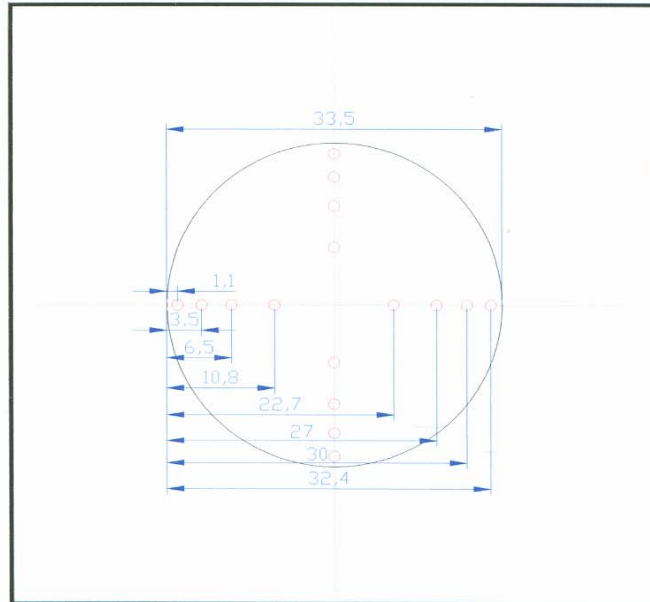


Tabla 1-17. Dimensiones de la chimenea

De A	Símbolo	Distancia	Unidad
Niple-Pared interior opuesta	$L_{fw}$	0.335	metros
Niple-Pared interior contigua	$L_{nw}$	0.0	metros
Diámetro interno	$D=L_{fw}-L_{nw}$	0.335	metros
Área	$A_s$	0.9487	Pies <sup>2</sup>
Distancia al disturbio anterior	B	1.05	metros
Distancia al disturbio posterior	A	0.47	metros
Relación B/D	$B_D$	3.13	Diámetros
Relación A/D	$A_D$	1.4	Diámetros
<b>Número de puntos a muestrear (para velocidad)</b>			<b>16</b>

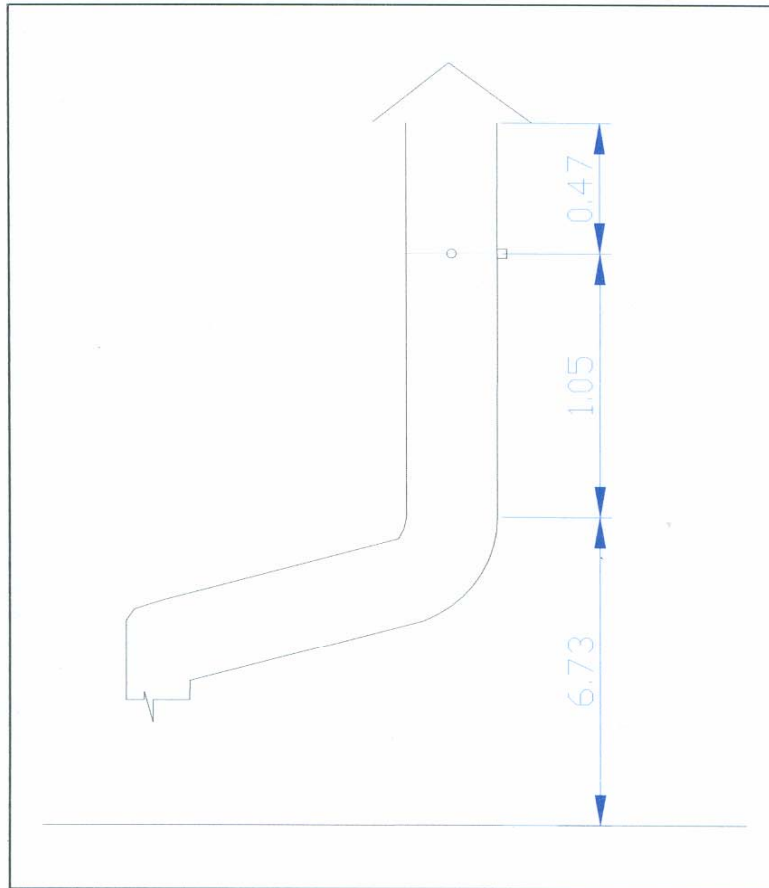
Tabla 1-18. Marca de la Sonda.

Diámetro de la chimenea		0.335	metros
Niple + Lamina		0.0	metros
Punto No.	porcentaje del diámetro	Distancia interna cm	Marca Sonda cm
1	3.2	1.1	1.1
2	10.5	3.5	3.5
3	19.4	6.5	6.5
4	32.3	10.8	10.8

Diámetro de la chimenea		0.335	metros
Niple + Lamina		0.0	metros
Punto No.	porcentaje del diámetro	Distancia interna cm	Marca Sonda cm
5	67.7	22.7	22.7
6	80.6	27.0	27.0
7	89.5	30.0	30.0
8	96.8	32.4	32.4

**Figura 1-4. Chimenea, vista frontal.**

Medidas en metros



**1.3.2 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE LOS GASES.**  
**Método 2.**

En la tabla 1-19 se presenta la información obtenida en campo y los respectivos cálculos, con el fin de calcular la velocidad del gas en el ducto.

**Tabla 1-19. Muestreo preliminar.**

PUNTO No.	Cabeza Velocidad $\Delta P_s$ "H <sub>2</sub> O	Presión Estática P <sub>g</sub> "H <sub>2</sub> O	Tem. Chimenea (ts) °F	Temperatura medidor	
				Entrada °F	Salida °F
1	0,96457	1,18110	176,0	84,2	84,2
2	1,41732	1,33858	177,8	84,2	84,2
3	1,49606	1,18110	176,0	84,2	84,2
4	1,41732	1,10236	177,8	84,2	84,2
5	1,41732	1,06299	179,6	84,2	84,2
6	1,45669	1,06299	179,6	84,2	84,2
7	1,49606	1,10236	179,6	84,2	84,2
8	1,37795	1,06299	179,6	84,2	84,2
9	1,02362	1,06299	176,0	84,2	84,2
10	1,29921	1,18110	177,8	84,2	84,2
11	1,37795	1,02362	177,8	84,2	84,2
12	1,25984	0,96457	177,8	84,2	84,2
13	1,37795	1,02362	177,8	84,2	84,2
14	1,65354	1,18110	179,6	84,2	84,2
15	1,49606	1,18110	179,6	84,2	84,2
16	1,14173	1,14173	179,6	84,2	84,2
promedios	1,34850	1,11590	178,3	84,2	84,2

La velocidad de los gases en chimenea (V<sub>s</sub>) esta dada por la siguiente expresión:

$$V_s = K_p \times C_p \times (\sqrt{\Delta P_s}) \times \sqrt{\frac{T_s}{P_s \times M_s}}$$

$$V_s = 76.0144 \frac{ft}{s}$$

K<sub>p</sub>= 85.4860

C<sub>p</sub>= 0.85 (coeficiente del tubo de pitot)

ΔP<sub>s</sub>= cabeza de velocidad promedio, tabla 1-19.

T<sub>s</sub>= temperatura absoluta en la chimenea promedio, tabla 1-19.

P<sub>s</sub>= presión en la chimenea

Ms= peso molecular del gas en la chimenea a condiciones húmedas (método 3)

$$P_s = P_b + \frac{P_g}{13.6}$$

$$P_s = 28.6545'' Hg$$

Pg= presión estática, tabla 1-19.

Pb= 27.9134 (presión barométrica, tabla 1-20.)

**Tabla 1-20. Variables para cálculo. M2.**

Variable	Símbolo	Valor
Presión Barométrica	Pb	27.91338583 "Hg
Caudal en el Medidor <sup>5</sup>	Qm	0.75 cfm
Temperatura absoluta en la chimenea	Ts	638.25 °R
Temperatura absoluta en el medidor	Tm.	544.2 °R
Peso molecular del gas seco <sup>6</sup>	Md	28.84 g/g-mol

### 1.3.3 PESO MOLECULAR DEL GAS. Método 3.

El peso molecular del gas seco se obtuvo siguiendo el método 3 US EPA, mediante muestreador Orsat, resultados que se pueden ver en la tabla 1-21.

**Tabla 1-21. Composición del gas.**

Composición	Símbolo	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Unidades
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	0	0	0	%
Oxígeno	O <sub>2</sub>	21	21	21	%
Monóxido de carbono	CO	0	0	0	%
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	79	79	79	%

$$Md = (\%CO_2 \times 0.44) + (\%O_2 \times 0.32) + (\%CO \times 0.28) + (\%N_2 \times 0.28)$$

<sup>5</sup> Ver anexo: CARTA DE CALIBRACIÓN

<sup>6</sup> Ver método 3

---

$$Md = 28.84 \frac{lb}{lb.mol}$$

Md= Peso molecular del gas seco.

#### 1.3.4 MATERIAL PARTICULADO. Factores de emisión.

De acuerdo con la tabla 11-6-3 del documento AP42 de la US EPA, el mayor factor de emisión para molienda de cemento es 0.16 kg MP / Mg de material procesado. El molino de cemento 2, tiene una capacidad máxima de 5 Mg/h, lo que quiere decir que la emisión máxima de material particulado en este molino es de 0.8 kg/h.

### 1.4 EMISIONES TRITURADORA

La evaluación de la emisión de material particulado expulsadas al aire ambiente por intermedio de la chimenea del FILTRO DE MANGAS, utilizado como sistema de control, se realizo mediante la aplicación del factor de emisión mas critico, para 80 tn/h, como capacidad máxima de trituración.

El calculo de la velocidad y la temperatura de los gases en chimenea, se realizo mediante la aplicación del método 2 de la US EPA.

Los resultados de la aplicación del método 2 de la US EPA, no son confiables, debido a que la ubicación de los niples o puertos para muestreo no cumplen con las distancias mínimas requeridas respecto a los disturbios anterior y posterior, de acuerdo con los criterios descritos en el método 1, de la US EPA.

#### 1.4.1 LOCALIZACIÓN Y NÚMERO DE PUNTOS. Método 1.

La figura 1-5 muestra las dimensiones de la sección transversal de la chimenea del horno y la ubicación de los puntos dentro de la chimenea.

En la figura 1-6, se ve la distancia del niple a los disturbios anterior y posterior, valores que se pueden observar en la tabla 1-22, y en la 1-23, se presentan las distancias para la marca de la sonda.

Figura 1-5. Chimenea trituradora, sección transversal, longitud en cm.

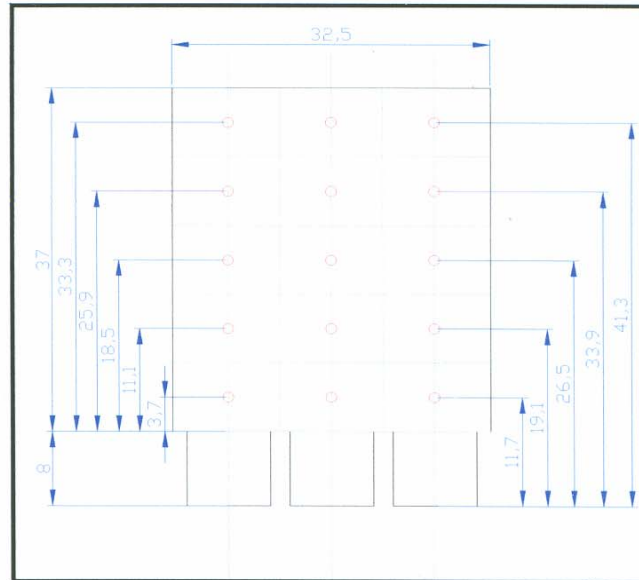


Tabla 1-22. Dimensiones de la chimenea

De A	Símbolo	Distancia	Unidad
Niple-Pared interior opuesta	$L_{fw}$	0.45	metros
Niple-Pared interior contigua	$L_{nw}$	0.08	metros
Largo	$L=L_{fw}-L_{nw}$	0.37	metros
Ancho	W	0.325	metros
Área	$A_s$	1.1732	Pies <sup>2</sup>
Diámetro equivalente	D	0.346	metros
Distancia al disturbio anterior	B	0.48	metros
Distancia al disturbio posterior	A	0.54	metros
Relación B/D	$B_D$	1.39	Diámetros
Relación A/D	$A_D$	1.56	Diámetros
<b>Número de puntos a muestrear (para velocidad)</b>			<b>16</b>

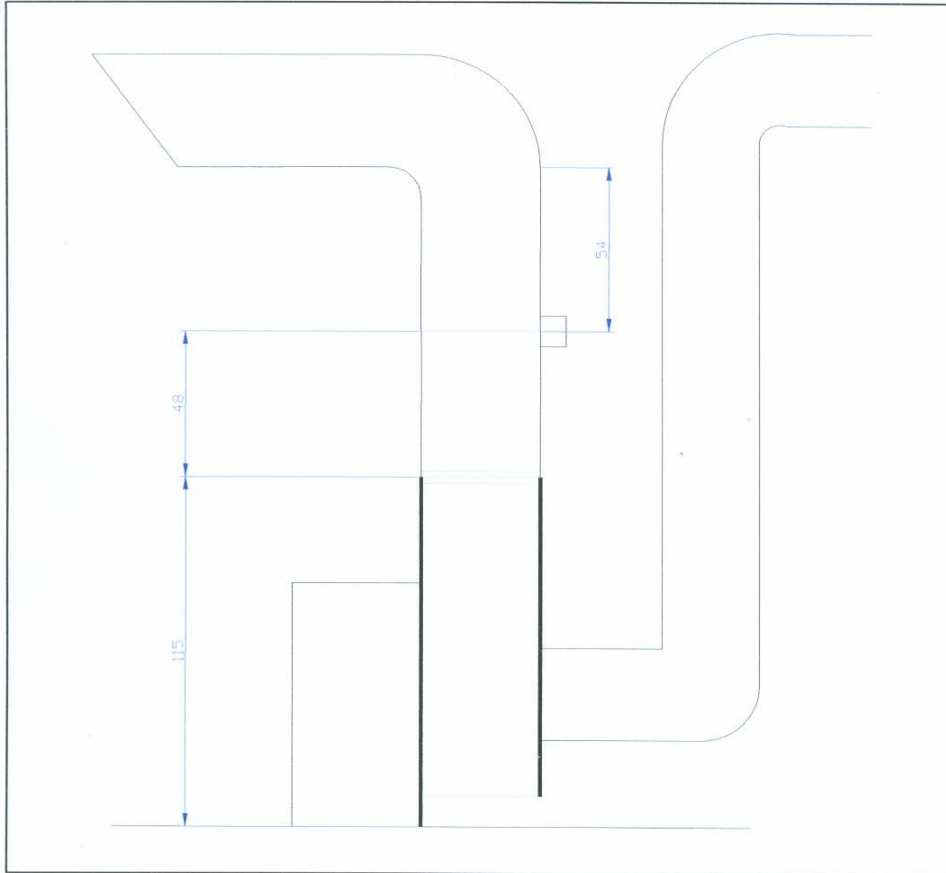
El número de puntos a muestrear es 16, que correspondería a una matriz 4x4, pero debido a que no hay espacio para localizar 4 niples, se tomo una matriz 3x5, ubicando 3 niples en una cara, como se puede ver en la figura 1-5.

**Tabla 1-23. Marca de la Sonda.**

Largo de la chimenea		0.37	metros
Niple + Lamina		0.08	metros
Punto No.	porcentaje del diámetro	Distancia interna cm	Marca Sonda cm
1	10	3.7	11.7
2	30	11.1	19.1
3	50	18.5	26.5
4	70	25.9	33.9
5	90	33.3	41.3

**Figura 1-6. Chimenea, vista frontal.**

Medidas en centímetros



## 1.4.2 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE LOS GASES.

### Método 2.

En la tabla 1-24 se presenta la información obtenida en campo y los respectivos cálculos, con el fin de calcular la velocidad del gas en el ducto.

Tabla 1-24. Muestreo preliminar.

PUNTO No.	Cabeza Velocidad $\Delta P_s$ "H <sub>2</sub> O	Presión Estática Pg "H <sub>2</sub> O	Tem. Chimenea (ts) °F	Temperatura medidor	
				Entrada °F	Salida °F
1	4,56693	2,36220	93,2	32,0	32,0
2	4,56693	2,36220	95,0	32,0	32,0
3	5,51181	2,91339	95,0	32,0	32,0
4	5,11811	2,36220	95,0	32,0	32,0
5	4,72441	3,93701	95,0	32,0	32,0
6	1,65354	-1,88976	93,2	32,0	32,0
7	0,59055	-1,81102	93,2	32,0	32,0
8	0,39370	-1,57480	93,2	32,0	32,0
9	0,31496	-1,57480	93,2	32,0	32,0
10	1,18110	-1,57480	93,2	32,0	32,0
11	0,00000	-0,94488	91,4	32,0	32,0
12	0,00000	-0,98425	91,4	32,0	32,0
13	0,00000	-0,90551	91,4	32,0	32,0
14	0,00000	-0,82677	91,4	32,0	32,0
15	0,00000	-0,55118	91,4	32,0	32,0
promedios	1,05234	0,08661	93,1	32,0	32,0

Las grandes variaciones en  $\Delta P$  y  $P_g$ , se presentan por comportamiento inestable, debido a condiciones de flujo ciclónico, por la incorrecta localización de los puertos de muestreo.

La velocidad de los gases en chimenea va a dar como resultado, valores aproximados con bajas características de confiabilidad.

La velocidad de los gases en chimenea ( $V_s$ ) esta dada por la siguiente expresión:

$$V_s = K_p \times C_p \times (\sqrt{\Delta P_s}) \times \sqrt{\frac{T_s}{P_s \times M_s}}$$

$$V_s = 62.79 \frac{ft}{s}$$

$K_p = 85.4860$

$C_p = 0.85$  (coeficiente del tubo de pitot)

$\Delta P_s =$  cabeza de velocidad promedio, tabla 1-24.

$T_s =$  temperatura absoluta en la chimenea promedio, tabla 1-24.

$P_s =$  presión en la chimenea

$M_s =$  peso molecular del gas en la chimenea a condiciones húmedas (método 3)

$$P_s = P_b + \frac{P_g}{13.6}$$

$$P_s = 27.6835'' Hg$$

$P_g =$  presión estática, tabla 1-24.

$P_b = 27.6772$  (presión barométrica, tabla 1-25.)

**Tabla 1-25. Variables para cálculo. M2.**

Variable	Símbolo	Valor
Presión Barométrica	$P_b$	27.67716535 "Hg
Caudal en el Medidor <sup>7</sup>	$Q_m$	0.75 cfm
Temperatura absoluta en la chimenea	$T_s$	553.08 °R
Temperatura absoluta en el medidor	$T_m$	492.0d °R
Peso molecular del gas seco <sup>8</sup>	$M_d$	28.84 g/g-mol

### 1.4.3 PESO MOLECULAR DEL GAS. Método 3.

El peso molecular del gas seco se obtuvo siguiendo el método 3 US EPA, mediante muestreador Orsat, resultados que se pueden ver en la tabla 1-26.

**Tabla 1-26. Composición del gas.**

Composición	Símbolo	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Unidades
Dióxido de carbono	$CO_2$	0	0	0	%
Oxígeno	$O_2$	21	21	21	%
Monóxido de carbono	$CO$	0	0	0	%
Nitrógeno	$N_2$	79	79	79	%

<sup>7</sup> Ver anexo: CARTA DE CALIBRACIÓN

<sup>8</sup> Ver método 3

$$Md = (\%CO_2 \times 0.44) + (\%O_2 \times 0.32) + (\%CO \times 0.28) + (\%N_2 \times 0.28)$$
$$Md = 28.84 \frac{lb}{lb.mol}$$

Md= Peso molecular del gas seco.

#### 1.4.4 MATERIAL PARTICULADO. Factores de emisión.

De acuerdo con la tabla 11-6-3 del documento AP42 de la US EPA, la suma de los factores de emisión para trituración primaria, cernido o cribado, transferencia y trituración secundaria con filtro de mangas es de 0.000785 kg de material particulado por megagramo de material procesado.

Como la capacidad de la trituradora es de 80 tn/h, entonces la emisión máxima de material particulado en este molino es de 0.0628 kg/h.

### 1.5 EMISION EN EMPAQUE

La evaluación de la emisión de material particulado expulsadas al aire ambiente por intermedio de la chimenea del FILTRO DE MANGAS, utilizado como sistema de control, en el área de empaque, se realizo mediante la aplicación de factores de emisión, suministrados por el fabricante de los filtros de mangas<sup>9</sup>.

El calculo de la velocidad y la temperatura de los gases en chimenea, se realizo mediante la aplicación del método 2 de la US EPA.

#### 1.5.1 LOCALIZACIÓN Y NÚMERO DE PUNTOS. Método 1.

La figura 1-7 muestra las dimensiones de la sección transversal de la chimenea del horno y la ubicación de los puntos dentro de la chimenea.

En la figura 1-8, se ve la distancia del niple a los disturbios anterior y posterior, valores que se pueden observar en la tabla 1-27. Dimensiones y en la tabla 1-28, se presentan las distancias para la marca de la sonda.

---

<sup>9</sup> Según CEMEX, Colombia S.A.

Figura 1-7. Chimenea empaque, sección transversal, longitud en cm.

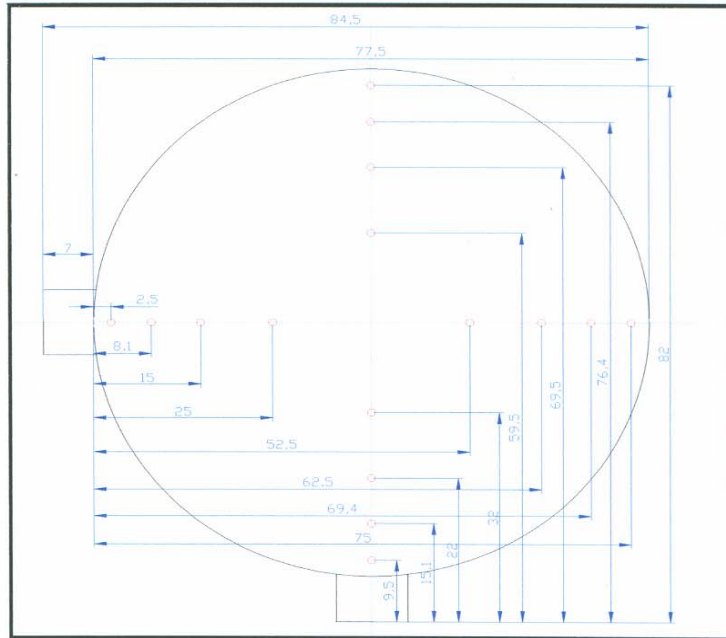


Tabla 1-27. Dimensiones de la chimenea

De A	Símbolo	Distancia	Unidad
Niple-Pared interior opuesta	$L_{fw}$	0.845	metros
Niple-Pared interior contigua	$L_{nw}$	0.07	metros
Diámetro interno	$D=L_{fw}-L_{nw}$	0.775	metros
Área	$A_s$	5.0777	Pies <sup>2</sup>
Distancia al disturbio anterior	B	1.75	metros
Distancia al disturbio posterior	A	2.0	metros
Relación B/D	$B_D$	2.26	Diámetros
Relación A/D	$A_D$	2.58	Diámetros
<b>Número de puntos a muestrear (para velocidad)</b>			<b>16</b>

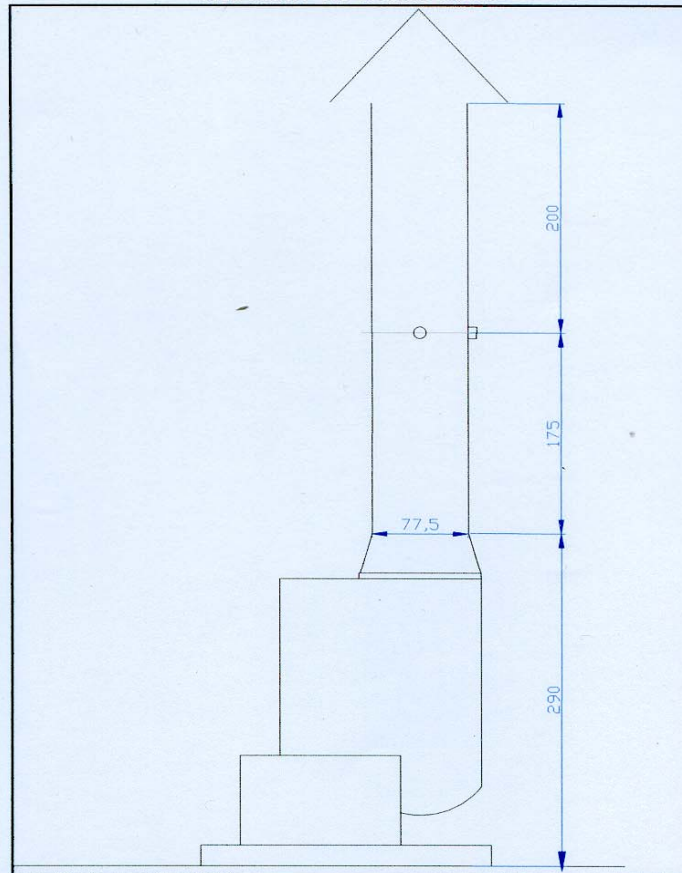
Tabla 1-28. Marca de la Sonda.

Diámetro de la chimenea		0.775	metros
Niple + Lamina		0.07	metros
Punto No.	porcentaje del diámetro	Distancia interna cm	Marca Sonda cm
1	3.2	2.5	9.5
2	10.5	8.1	15.1

Diámetro de la chimenea		0.775	metros
Niple + Lamina		0.07	metros
Punto No.	porcentaje del diámetro	Distancia interna cm	Marca Sonda cm
3	19.4	15.0	22.0
4	32.3	25.0	32.0
5	67.7	52.5	59.5
6	80.6	62.5	69.5
7	89.5	69.4	76.4
8	96.8	75.0	82.0

**Figura 1-8. Chimenea, vista frontal.**

Medidas en centímetros



## 1.5.2 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE LOS GASES.

### Método 2.

En la tabla 1-29 se presenta la información obtenida en campo y los respectivos cálculos, con el fin de calcular la velocidad del gas en el ducto.

Tabla 1-29. Muestreo preliminar.

PUNTO No.	Cabeza Velocidad $\Delta P_s$ "H <sub>2</sub> O	Presión Estática P <sub>g</sub> "H <sub>2</sub> O	Tem. Chimenea (ts) °F	Temperatura medidor	
				Entrada °F	Salida °F
1	0,49213	0,53150	93,2	32,0	32,0
2	0,61024	0,57087	93,2	32,0	32,0
3	0,53150	0,53150	93,2	32,0	32,0
4	0,53150	0,51181	91,4	32,0	32,0
5	0,57087	0,57087	93,2	32,0	32,0
6	0,72835	0,68898	93,2	32,0	32,0
7	0,90551	0,84646	93,2	32,0	32,0
8	0,96457	0,82677	93,2	32,0	32,0
9	0,66929	0,64961	91,4	32,0	32,0
10	0,66929	0,57087	93,2	32,0	32,0
11	0,61024	0,53150	93,2	32,0	32,0
12	0,55118	0,51181	93,2	32,0	32,0
13	0,72835	0,64961	93,2	32,0	32,0
14	0,86614	0,74803	93,2	32,0	32,0
15	0,84646	0,76772	93,2	32,0	32,0
16	0,86614	0,74803	93,2	32,0	32,0
promedios	0,68870	0,64099	93,0	32,0	32,0

La velocidad de los gases en chimenea (V<sub>s</sub>) esta dada por la siguiente expresión:

$$V_s = K_p \times C_p \times (\sqrt{\Delta P_s}) \times \sqrt{\frac{T_s}{P_s \times M_s}}$$

$$V_s = 50.39 \frac{ft}{s}$$

K<sub>p</sub>= 85.4860

C<sub>p</sub>= 0.85 (coeficiente del tubo de pitot)

ΔP<sub>s</sub>= cabeza de velocidad promedio, tabla 1-29.

T<sub>s</sub>= temperatura absoluta en la chimenea promedio, tabla 1-29.

P<sub>s</sub>= presión en la chimenea

Ms= peso molecular del gas en la chimenea a condiciones húmedas (método 3)

$$Ps = Pb + \frac{Pg}{13.6}$$

$$Ps = 28.118'' Hg$$

Pg= presión estática, tabla 1-29.

Pb= 28.0709 (presión barométrica, tabla 1-30.)

➤ Caudal estándar. Qsd

$$Qsd = (1 - B'ws) \times Vs \times As \frac{528 \times Ps}{29.92 \times Ts}$$

$$Qsd = 214.2 \frac{dscf}{s}$$

Para B'ws=6.71%

Luego,

$$Qsd = 21838.6 \frac{m^3}{h}$$

Tabla 1-30. Variables para cálculo. M2.

Variable	Símbolo	Valor
Presión Barométrica	Pb	28.07086614 "Hg
Caudal en el Medidor <sup>10</sup>	Qm	0.75 cfm
Temperatura absoluta en la chimenea	Ts	552.975 °R
Temperatura absoluta en el medidor	Tm.	492.0 °R
Peso molecular del gas seco <sup>11</sup>	Md	28.84 g/g-mol

### 1.5.3 PESO MOLECULAR DEL GAS. Método 3.

El peso molecular del gas seco se obtuvo siguiendo el método 3 US EPA, mediante muestreador Orsat, resultados que se pueden ver en la tabla 1-31.

<sup>10</sup> Ver anexo: CARTA DE CALIBRACIÓN

<sup>11</sup> Ver método 3

Tabla 1-31. Composición del gas.

Composición	Símbolo	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Unidades
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	0	0	0	%
Oxígeno	O <sub>2</sub>	21	21	21	%
Monóxido de carbono	CO	0	0	0	%
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	79	79	79	%

$$Md = (\%CO_2 \times 0.44) + (\%O_2 \times 0.32) + (\%CO \times 0.28) + (\%N_2 \times 0.28)$$

$$Md = 28.84 \frac{lb}{lb.mol}$$

Md= Peso molecular del gas seco.

#### 1.5.4 MATERIAL PARTICULADO. Factores de emisión.

Debido a que la US EPA no tiene factores de emisión para empaque de cemento, se utiliza como factor de emisión<sup>12</sup> 35 mg/m<sup>3</sup> N para aproximar el resultado.

Teniendo en cuenta que el caudal a condiciones estándar en la chimenea de empaque es de 21838.6 m<sup>3</sup>, entonces la emisión de material particulado es:

$$E = 35 \frac{mg}{m^3} \times 21838.6 \frac{m^3}{h}$$

$$E = 764351 \frac{mg}{h}$$

#### 1.5.5 Norma de emisión CEMEX Colombia S.A. Planta Bucaramanga.

La norma de emisión para la chimenea del colector del molino de cemento que funciona en Cemex Colombia S.A. - Planta Bucaramanga se

<sup>12</sup> Factor de emisión suministrado por CEMEX Colombia S.A., de acuerdo con el fabricante de los filtros de mangas.

interpreta según el artículo 61 del decreto 02 de 1982, (Norma para molienda y empaque en plantas de cemento) y no se corrige por altura sobre el nivel del mar ni por altura de descarga.

Artículo 61, Decreto 02 de 1982

Producción nominal de cemento <sup>13</sup>	Norma de emisión E	Norma de emisión E
tn/hora	kg/tn	Kg/h
18	1.0	18

Artículo 111, Decreto 948 de 1995 EFECTO BURBUJA

**Tabla 1-32. Emisión de material particulado a comparar con la norma**

Dispositivo	Símbolo	Emisión	Unidad
Chimenea del molino de cemento 1.	Ec1	0.0206	kg/h
Chimenea del molino de cemento 2.	Ec2	0.8	kg/h
Chimenea de trituración	Et	0.0628	kg/h
Chimenea de empaque	Ee	0.76	kg/h
<b>Emisión total (EFECTO BURBUJA)</b>	<b>E</b>	<b>1.6434</b>	<b>kg/h</b>

<sup>13</sup> Información tomada del estudio de fecha 18-09-2002, suministrado por CEMEX Colombia S.A.

**ANEXO B**  
**RESULTADOS MUESTREO**  
**CALIDAD DE AIRE CEMEX S.A.**

---

## 1 CALIDAD DEL AIRE

### 1.1 OBJETIVOS

#### 1.1.1 Objetivo general

- Monitorear la contaminación atmosférica por material particulado respirable inferior a 10 micras (PM10) en el barrio Claverianos de la ciudad de Bucaramanga (Etapa 2), siguiendo los lineamientos de la resolución 601 expedida por el ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

#### 1.1.2 Objetivos específicos

- Cuantificar la concentración estándar de material particulado respirable, inferior a 10 micras (PM10) en las estaciones de monitoreo ubicadas en el Barrio Claverianos, cercano a la planta Bucaramanga de Cemex Colombia S.A.
- Verificar el cumplimiento de la Norma de calidad del aire de acuerdo a la concentración estándar diaria y determinar la capacidad de asimilación del aire ambiente, en el sector de estudio.

### 1.2 LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO

Se localizaron dos estaciones (2) de monitoreo de calidad del aire PM-10 en el Barrio Claverianos en la terraza de la casa de Sandra, ubicada en la Cra 20 F # 25 n – 33 estación 1, La estación 2 en Cra 20B No 22 M2 18, de acuerdo con las recomendaciones y la participación de funcionarios de la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (**CDMB**) y teniendo en cuenta los protocolos de calidad del aire.

Estación No.	Localización	Dirección
1	Barrio Claverianos	Cra 20 F # 25 n – 33
2	Barrio Claverianos	Cra 20B N – 22 M2 18

### 1.3 PARÁMETROS A EVALUAR

Se evaluaron las partículas suspendidas en su fracción respirable (PM-10), que consisten en una compleja mezcla de partículas sólidas y líquidas de sustancias orgánicas e inorgánicas de suspensión en el aire. Las partículas se clasifican en función de su diámetro aerodinámico en PM<sub>10</sub> (diámetro < 10 μ), dichas partículas debido a su tamaño son más peligrosas porque una vez inhaladas pueden llegar a las zonas periféricas de los bronquiolos y alterar el intercambio pulmonar.

En la tabla 1-1 se presentan los parámetros evaluados de acuerdo con la información correspondiente al número de muestras y simbología.

**Tabla 1- 1. Parámetros evaluados**

Estación	PARÁMETRO	SIMBOLO	Control de Flujo	No. DE MUESTRAS
1	Partículas < a 10 micras	PM -10	Volumétrico	15
2	Partículas < a 10 micras	PM -10	Másico	15

### 1.4 EVALUACION DE PM -10

El monitoreo se desarrollo desde el 16 de Noviembre hasta el 2 de Diciembre de 2007 durante 15 muestras en periodos de 24 horas, tal como lo exige la resolución 601 del 4 de abril de 2006 del Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial.

#### 1.4.1 Calibración Estación 1.

Para efectos de garantizar la calidad de los datos obtenidos durante el período de muestreo, se realizó la calibración de los equipos antes de iniciar el período de monitoreo, siguiendo los procedimientos del Quality Assurance Handbook Vol 2 Part II, y la NTC 3704 de calidad del aire.

La CDMB estuvo realizando el proceso de auditoria durante el tiempo de monitoreo para garantizar el procedimiento establecido en los protocolos de calidad del aire.

El equipo localizado en el Barrio Claverianos. Estación 1, es de control de flujo volumétrico.

Tabla 1- 2. PM 10 – Información para calibración Estación 1

Presión atmosférica	699 mmHg		
Temperatura ambiental 1ª. Calibración	299 °K		
Calibración 1, muestras:	1 a 15		
Calibrador <sup>1</sup>	m	B	R
	0,9792797	-0,0506497	0,9999952

Tabla 1- 3. Calibración Estación 1

Posición	Δ H2O Pulgadas	Qa (formula) m <sup>3</sup> /min	Qa / (Ta) <sup>1/2</sup> (X)	Δ H2O Pulgadas	Pf milímetros de Hg	Po/Pa (Y)	Qa (tabla) m <sup>3</sup> /min	Diff %
1	3,25	<b>1,255736</b>	<b>0,072621</b>	8,40	15,67671	0,978	1,287	2,23
2	3,15	<b>1,237068</b>	<b>0,071542</b>	11,60	21,64879	0,969	1,272	2,75
3	3,10	<b>1,227623</b>	<b>0,070995</b>	15,10	28,18075	0,960	1,260	2,61
4	3,00	<b>1,208502</b>	<b>0,069889</b>	18,30	34,15283	0,951	1,247	3,14
5	2,90	<b>1,189059</b>	<b>0,068765</b>	24,80	46,28361	0,934	1,224	2,86

De acuerdo a la Norma Técnica Colombiana NTC 3704, numeral 3.7.2.5, se requiere que al menos cinco tasas de flujo diferentes pero constantes, igualmente distribuidas, con por lo menos tres en el intervalo de tasa de flujo especificado deben estar entre **1,1 y 1,7 m<sup>3</sup>/min.**

Para realizar el modelo de regresión lineal de la forma  $y = mx + b$ , se tomaron los valores de  $y = P1/Pa$  y en  $x = Qa(\text{orifice})/[Ta]^{1/2}$ ; estableciendo así, la siguiente relación:

$$P1/Pa = m * [Qa(\text{orifice})]/[Ta]^{1/2} + b .$$

Donde,

P1/Pa= Presión de estancamiento

Qa = Tasa de flujo del orificio en m<sup>3</sup>/min.

Ta= Temperatura ambiente en grados Kelvin

m y b = Pendiente e intercepto del calibrador a condiciones actuales.

<sup>1</sup> Ver ANEXO 1: CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN, Condiciones locales

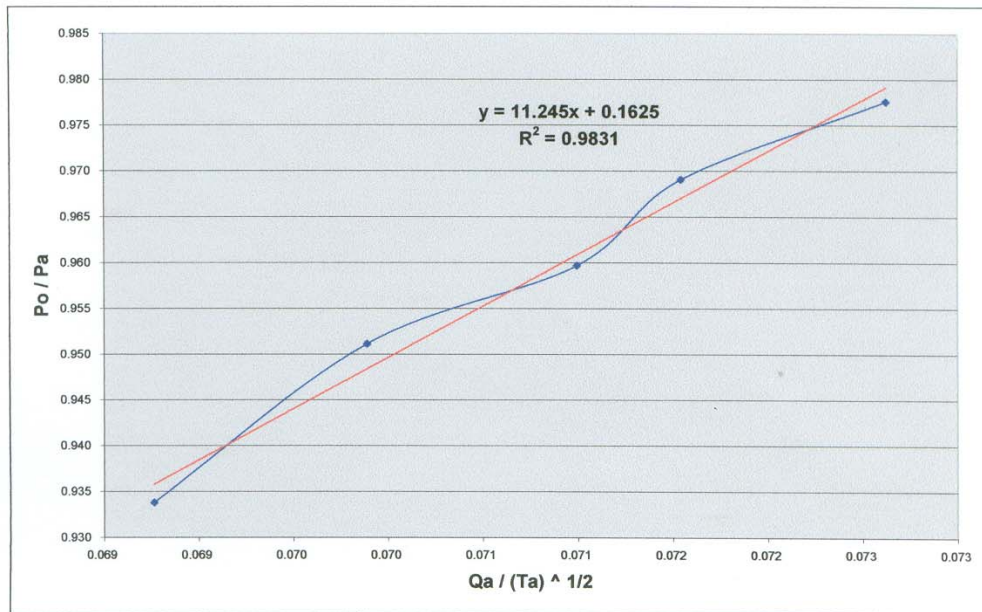
“Tomado del *Quality Assurance Handbook, Vol. II, Part II 2.11-PM10 High Volume*, numeral 2.4.4 Generation of Calibration Relationship—VFC Sampler”

Tabla 1- 4. Resultados de la calibración Estación 1.

Muestreador	M	B	R
	11,24514434	0,16250811	0,99150057

Obteniendo así, la siguiente curva de calibración:

Grafica 1- 1. Curva de calibración Estación 1



Donde,

$$Q_{actO} = \frac{\sqrt{\Delta H_2O \times \frac{T_a}{P_a}} - b}{m}$$

$$Pf = \Delta H_2O \times \frac{25.4}{13.6}$$

$$\frac{Po}{Pa} = \left(1 - \frac{Pf}{Pa}\right)$$

$$\%diferencia = \left(\frac{Q_{actM} - Q_{actO}}{Q_{actO}}\right) \times 100$$

$$Q_{std} = Q \alpha \times \frac{Pa}{Pstd} \times \frac{Tsd}{Ta}$$

- Q<sub>actO</sub> = Caudal actual calculado a partir del orificio
- Q<sub>actM</sub> = Caudal actual tomado de la tabla de calibración de fabrica del muestreador
- Pf = Presión en el muestreador en mmHg
- Q<sub>std</sub> = Caudal estándar en m<sup>3</sup>/min a 760 mmHg y 25 grados centígrados.
- Pa = Presión barométrica local en mm de Hg
- Ta = Temperatura local en grados kelvin
- Pstd = Presión estándar 760 mm de Hg
- Tstd = Temperatura estándar 298 grados kelvin
- Q<sub>std</sub> = Caudal calculado a condiciones estándar (760 mmHg y 298°K)

#### 1.4.2 Concentración a condiciones estándar, Estación 1

La tabla 1-5 muestra la información obtenida en campo para la estación 1, y en la tabla 1-6 se presenta la información de laboratorio y cálculos de concentración de Material Particulado inferior a 10 micras (PM-10), expresadas a condiciones estándar.

Usando los coeficientes obtenidos a partir de la ecuación de calibración, se obtienen los caudales de trabajo a condiciones de presión y temperatura locales, ese caudal actual, se corrige a condiciones estándar para luego multiplicarlo por el tiempo de cada muestra y así obtener el volumen muestreado a condiciones estándar, finalmente se halla la concentración a condiciones estándar dividiendo la diferencia entre los pesos final e inicial de las muestras entre el volumen estándar.

**Tabla 1- 5. MP - Información de campo Estación 1. Barrio Claverianos**

Muestra No.	Fecha	Tiempo de Muestra minutos	$\Delta H_2O$ Inicial Pulgadas	$\Delta H_2O$ Final Pulgadas	$\Delta H_2O$ Promedio	Qact m <sup>3</sup> /min
1	16/11/2007	1389,6	24,6	26,5	25,6	<b>1,183</b>
2	17/11/2007	1441,8	24,0	26,1	25,1	<b>1,185</b>
3	18/11/2007	1441,2	23,1	25,4	24,3	<b>1,188</b>
4	19/11/2007	1434,6	23,1	26,6	24,9	<b>1,186</b>
5	20/11/2007	1440,0	23,2	25,8	24,5	<b>1,187</b>
6	21/11/2007	1424,4	23,4	24,9	24,2	<b>1,189</b>
7	22/11/2007	1288,8	22,5	26,3	24,4	<b>1,188</b>
8	23/11/2007	1429,8	22,8	26,4	24,6	<b>1,187</b>
9	24/11/2007	1435,8	23,1	25,4	24,3	<b>1,188</b>
10	25/11/2007	1432,8	23,2	24,4	23,8	<b>1,190</b>
11	26/11/2007	1434,6	21,4	25,1	23,3	<b>1,192</b>
12	27/11/2007	1436,4	22,8	24,8	23,8	<b>1,190</b>
13	28/11/2007	1435,8	21,6	23,0	22,3	<b>1,196</b>
14	29/11/2007	1431,0	19,2	23,8	21,5	<b>1,200</b>
15	01/12/2007	1433,4	21,8	22,9	22,4	<b>1,196</b>

Para cálculos posteriores, la tasa de flujo actual promedio a la cual trabaja el muestreador, Qa, es calculado a partir de los coeficientes de la calibración.

Reemplazando en la ecuación:

$$Qa \text{ (muestreador)} = [ (P1 / Pav ) * b ] [ Tav ]^{1/2} * 1/m$$

Donde,

Qa = Tasa de flujo promedio actual, expresado en m<sup>3</sup>/min.

P1 / Pav = Presión de estancamiento promedio durante el periodo de muestreo

Tav = Temperatura ambiente promedio durante el periodo de muestreo, expresada en grados Kelvin (K = C + 273)

b = Intercepto de la relación de calibración del muestreador

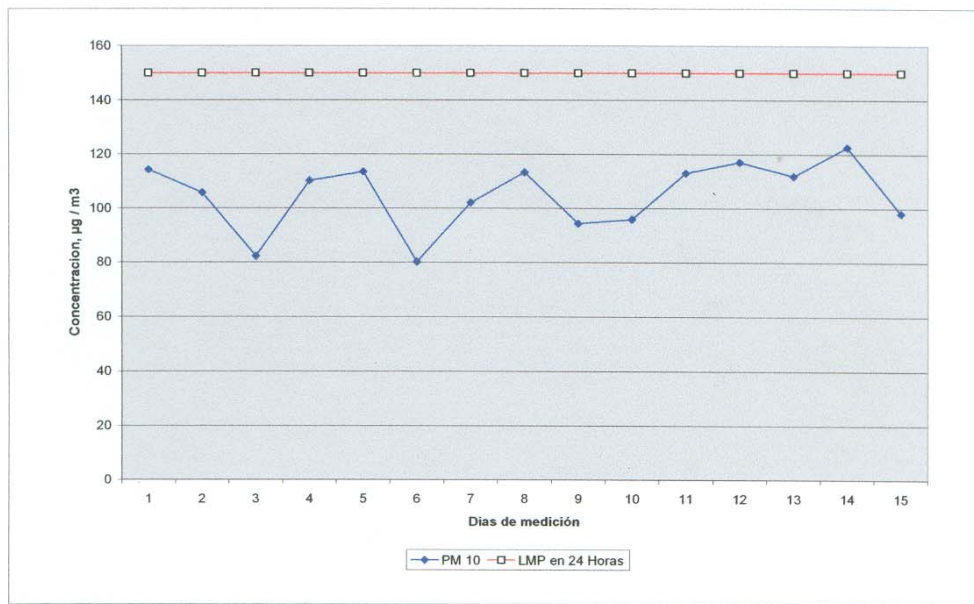
m = Pendiente de la relación de calibración del muestreador

**Tabla 1- 6. MP - Información de laboratorio y cálculos de concentración. Estación 1.**

Muestra No.	Qstd m <sup>3</sup> /min	Peso Inicial Filtro $\mu g$	Peso Final Filtro $\mu g$	Peso muestra $\mu g$	Volumen estándar m <sup>3</sup>	Concentr. Estándar $\mu g/m^3$
1	1,081	4502300	4673850	171550	1501,76	<b>114,23</b>

2	1,083	4483650	4648650	165000	1560,88	<b>105,71</b>
3	1,082	4618700	4746950	128250	1559,36	<b>82,25</b>
4	1,078	4608350	4778700	170350	1546,43	<b>110,16</b>
5	1,076	4630850	4806700	175850	1548,99	<b>113,53</b>
6	1,077	4630750	4753750	123000	1534,07	<b>80,18</b>
7	1,080	4625650	4767650	142000	1391,43	<b>102,05</b>
8	1,081	4635800	4810850	175050	1545,15	<b>113,29</b>
9	1,080	4651100	4797450	146350	1550,94	<b>94,36</b>
10	1,077	4696000	4843900	147900	1542,43	<b>95,89</b>
11	1,077	4678550	4853100	174550	1544,75	<b>113,00</b>
12	1,077	4691850	4872850	181000	1546,30	<b>117,05</b>
13	1,086	4340900	4515350	174450	1558,80	<b>111,91</b>
14	1,098	4361600	4554200	192600	1570,86	<b>122,61</b>
15	1,096	4322300	4476500	154200	1571,54	<b>98,12</b>

**Gráfica 1-2 Concentración PM10. Estación 1. Barrio Claverianos**



### 1.4.3 Calibración Estación 2.

Para efectos de garantizar la calidad de los datos obtenidos durante el período de muestreo, se realizó la calibración del equipo antes de iniciar el período de monitoreo, siguiendo los procedimientos de calibración indicados en el Quality Assurance Handbook Vol 2 Part II, para muestreadores de control de flujo másico MFC.

El equipo localizado en el Barrio Claverianos. Estación 2, es de control de flujo másico.

**Tabla 1- 7. PM 10 – Información para calibración. Estación 2**

Presión atmosférica	699 mmHg		
Temperatura ambiental 1ª. Calibración	301 °K		
Calibración 1, muestras:	1 a 15		
Calibrador <sup>2</sup>	M	B	R
	0,9792797	-0,0506497	0,9999952

**Tabla 1- 8. Calibración Estación 2**

Posición	Δ H2O Pulgadas	Qa (formula) m <sup>3</sup> /min	I Carta de Flujo	Lectura de flujo corregida IC
1	6,5	1,71359	<b>55</b>	36,09
2	5,9	1,63283	<b>53</b>	34,78
3	4,5	1,42666	<b>46</b>	30,19
4	3,5	1,25881	<b>40</b>	26,25
5	2,2	0,99909	<b>33</b>	21,66

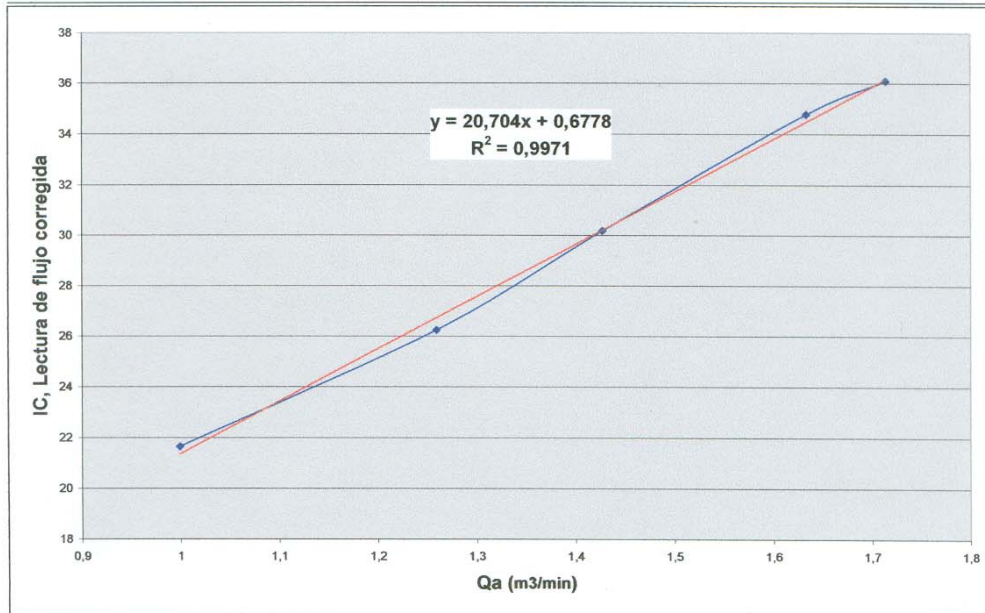
**Tabla 1- 9. Resultados de la calibración 1. Estación 2**

Muestreador	M	B	R	SFR	SSP
	20,70428350	0,677757885	0,99853775	1.241	38.32

Obteniendo así, la siguiente curva de calibración:

**Grafica 1- 3. Curva de calibración, Estación 2**

<sup>2</sup> Ver ANEXO 1: CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN, Condiciones locales



Donde,

La rata de flujo a condiciones reales a través del calibrador para cada punto se calculo a partir de la siguiente ecuación:

$$Q_a = [ [.H(T_a/P_a)]^{0.5} - b ] / m$$

Donde:

$Q_a$  = Caudal real a través del calibrador ( $m^3/min$ ).

$.H$  = Caída de presión a través del calibrador (pulgadas de agua).

$P_a$  = Presión barométrica (mm Hg).

$T_a$  = Temperatura ambiente (K).

$b, m$  = Constantes del kit de calibración a condiciones actuales.

$$.P_{ext} = [.P(T_a + 30)/P_a]^{0.5}$$

Donde:

$.P_{ext}$  = Lectura manométrica transformada

$.P$  = Indicación de la rata de flujo a través del muestreador (pulgadas de agua).

$P_a$  = Presión barométrica (mm Hg).

---

Ta = Temperatura ambiente (K).

Una adecuada aproximación al valor de la temperatura del aire a la salida del motor se obtiene adicionando 30 K al valor de la temperatura ambiente (Ta), ó Construir la curva de calibración del equipo graficando el caudal a condiciones reales (Qa), eje x, versus el flujo (corregido), eje y. De ahí se calcula la pendiente, el intercepto y el coeficiente de correlación de la curva. El coeficiente de correlación nunca debe ser menor a 0.990.

Luego se realiza el ajuste del controlador de flujo al cual debe trabajar durante los días de monitoreo. (Determinación del Set Point).

$$SSP = [Pa / (Ta + 30)] [m(1.13) + b ]2$$

Donde:

SSP = Set Point del muestreador (pulgadas de agua).

Pa = Presión barométrica (mm Hg).

Ta = Temperatura ambiente (K).

b, m = Constantes del equipo muestreador de alto volumen.

El valor de 1.13 m<sup>3</sup>/min corresponde al valor ideal del flujo de muestreo.

“Tomado del *Quality Assurance Handbook, Vol. II, Part II* 2.11–PM10 High Volume, numeral 2.3.3 Cálculos para calibración de muestreadores de flujo Másico, MFC”

#### 1.4.4 Concentración estándar, Estación 2.

La tabla 1-10 muestra la información obtenida en campo para la estación 2 Barrio Claverianos y en la Tabla 1-11 se presenta la información de laboratorio y cálculos de concentración de Material Particulado inferior a 10 micras (PM-10), expresadas a condiciones estándar.

Usando los coeficientes obtenidos a partir de la ecuación de calibración, se obtienen los caudales de trabajo a condiciones de presión y temperatura locales, ese caudal actual, se corrige a condiciones estándar para luego multiplicarlo por el tiempo de cada muestra y así obtener el volumen muestreado a condiciones estándar, finalmente

se halla la concentración a condiciones estándar dividiendo la diferencia entre los pesos final e inicial de las muestras entre el volumen estándar.

**Tabla 1- 10. Información de campo Estación 2.**

Muestra No.	Fecha	Tiempo de Muestra minutos	Carta de Flujo Inicial CFM	Carta de Flujo Final CFM	$\Delta H_2O$ Promedio	<b>Qact</b> m <sup>3</sup> /min
1	16/11/2007	1308,61	40	40	40,0	<b>1,2947</b>
2	17/11/2007	1530,55	37	37	37,0	<b>1,1952</b>
3	18/11/2007	1487,89	36	35	35,5	<b>1,1472</b>
4	19/11/2007	1577,31	38	37	37,5	<b>1,2146</b>
5	20/11/2007	1506,34	37	37	37,0	<b>1,1998</b>
6	21/11/2007	1569,27	37	37	37,0	<b>1,1998</b>
7	22/11/2007	1487,33	37	37	37,0	<b>1,1998</b>
8	23/11/2007	1565,23	37	37	37,0	<b>1,2007</b>
9	24/11/2007	1595,85	37	38	37,5	<b>1,2211</b>
10	25/11/2007	1559,28	37	37	37,0	<b>1,2063</b>
11	26/11/2007	1619,73	37	39	38,0	<b>1,2379</b>
12	27/11/2007	1571,59	37	37	37,0	<b>1,2026</b>
13	28/11/2007	1570,68	37	37	37,0	<b>1,1989</b>
14	29/11/2007	1563,47	37	37	37,0	<b>1,1989</b>
15	30/11/2007	1673,87	38	41	39,5	<b>1,2841</b>

Para los periodos de muestra siguientes, la tasa de flujo actual promedio a la cual trabaja el muestreador,  $Q_a$ , es calculado a partir de los coeficientes de la calibración.

Reemplazando en la ecuación:

$$Q_a = [ (P1 / P_{av}) * b ] [ T_{av} ]^{1/2} * 1/m$$

Donde,

$Q_a$  = Tasa de flujo promedio actual, expresado en m<sup>3</sup>/min.

$P1 / P_{av}$  = Presión de estancamiento promedio durante el periodo de muestreo

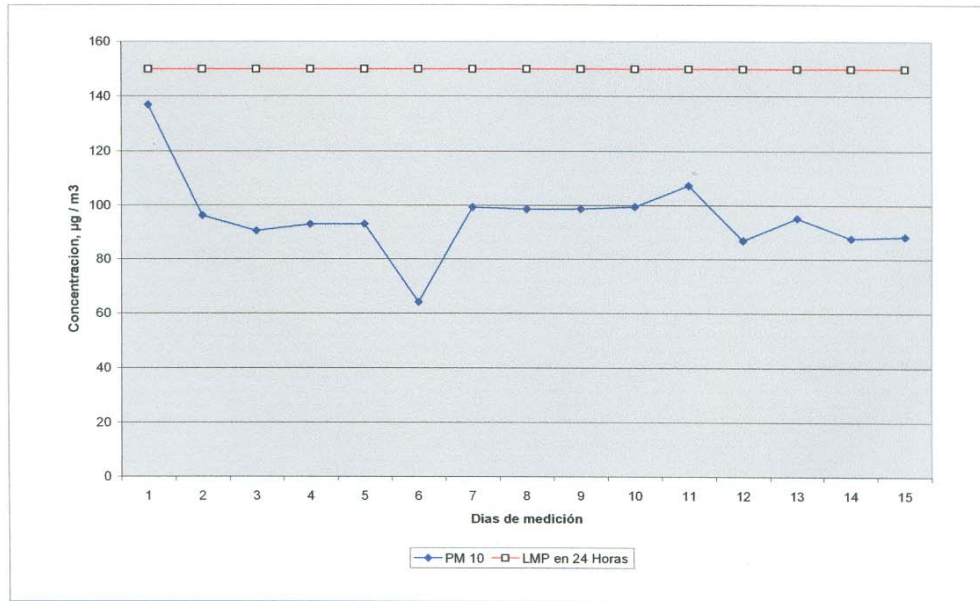
$T_{av}$  = Temperatura ambiente promedio durante el periodo de muestreo, expresada en grados Kelvin ( $K = C + 273$ )

b = Intercepto de la relación de calibración del muestreador  
m = Pendiente de la relación de calibración del muestreador

**Tabla 1- 11. Información de laboratorio y cálculos de concentración. Estación 2**

Muestra No.	Qstd m <sup>3</sup> /min	Peso Inicial Filtro µg	Peso Final Filtro µg	Peso muestra µg	Volumen estándar m <sup>3</sup>	Concentr. Estándar µg/m <sup>3</sup>
1	1,179	4432450	4612000	179550	1501,76	<b>137,21</b>
2	1,088	4475400	4623000	147600	1560,88	<b>96,44</b>
3	1,045	4619900	4754900	135000	1559,36	<b>90,73</b>
4	1,106	4615000	4762100	147100	1546,43	<b>93,26</b>
5	1,093	4632850	4773400	140550	1548,99	<b>93,31</b>
6	1,093	4651750	4752650	100900	1534,07	<b>64,30</b>
7	1,093	4619500	4767600	148100	1391,43	<b>99,57</b>
8	1,093	4633800	4788550	154750	1545,15	<b>98,87</b>
9	1,112	4620750	4778600	157850	1550,94	<b>98,91</b>
10	1,098	4693800	4849250	155450	1542,43	<b>99,69</b>
11	1,127	4705100	4879150	174050	1544,75	<b>107,46</b>
12	1,095	4691150	4828000	136850	1546,30	<b>87,08</b>
13	1,092	4356300	4506100	149800	1558,80	<b>95,37</b>
14	1,092	4363750	4501100	137350	1570,86	<b>87,85</b>
15	1,169	4341550	4488150	146600	1571,54	<b>87,58</b>

**Gráfica 1- 4. Concentración PM10. Estación 2**



## 1.5 ESTADISTICA DESCRIPTIVA.

La estadística descriptiva sirve para determinar el comportamiento y análisis de datos de concentración a condiciones estándar.

Por medio de análisis estadísticos se determinaron las principales medidas de tendencia central de los datos de concentración de PM-10 como se muestra en la tabla 1-12.

**Tabla 1- 12. Estadística Estación 1 y 2**

<b>Concentración PM 10, Aire, µg/m3</b>		
	Est 1	Est 2
Media	104,96	95,84
Error típico	3,24	3,87
Mediana	110,16	95,37
Desviación estándar	12,56	14,97
Varianza de la muestra	157,63	224,07
Curtosis	-0,20	4,88
Coficiente de asimetría	-0,79	0,96
Rango	42,43	72,91

---

Mínimo	80,18	64,30
Máximo	122,61	137,21
Suma	1574,33	1437,62
Cuenta	15	15
Nivel de confianza (99,0%)	9,65	11,51
CV	11,96%	15,62%

# ANEXOS

## **CERTIFICADOS DE CALIBRACION**

TEMPERATURE °C Flow rate m3/min (actual)

Po/Pa	-32	-30	-28	-26	-24	-22	-20	-18	-16	-14	-12	-10	-8	Po/Pa
0.930	1.106	1.110	1.114	1.118	1.122	1.126	1.130	1.134	1.138	1.142	1.146	1.150	1.154	0.930
0.931	1.107	1.111	1.115	1.119	1.123	1.128	1.132	1.136	1.139	1.143	1.147	1.151	1.155	0.931
0.932	1.108	1.113	1.117	1.121	1.125	1.129	1.133	1.137	1.141	1.145	1.149	1.153	1.157	0.932
0.933	1.110	1.114	1.118	1.122	1.126	1.130	1.134	1.138	1.142	1.146	1.150	1.154	1.158	0.933
0.934	1.111	1.115	1.119	1.123	1.127	1.131	1.135	1.139	1.143	1.147	1.151	1.155	1.159	0.934
0.935	1.112	1.116	1.120	1.125	1.129	1.133	1.137	1.141	1.145	1.149	1.153	1.157	1.160	0.935
0.936	1.113	1.118	1.122	1.126	1.130	1.134	1.138	1.142	1.146	1.150	1.154	1.158	1.162	0.936
0.937	1.115	1.119	1.123	1.127	1.131	1.135	1.139	1.143	1.147	1.151	1.155	1.159	1.163	0.937
0.938	1.116	1.120	1.124	1.128	1.132	1.136	1.140	1.144	1.148	1.152	1.156	1.160	1.164	0.938
0.939	1.117	1.121	1.125	1.130	1.134	1.138	1.142	1.146	1.150	1.154	1.158	1.162	1.166	0.939
0.940	1.118	1.123	1.127	1.131	1.135	1.139	1.143	1.147	1.151	1.155	1.159	1.163	1.167	0.940
0.941	1.120	1.124	1.128	1.132	1.136	1.140	1.144	1.148	1.152	1.156	1.160	1.164	1.168	0.941
0.942	1.121	1.125	1.129	1.133	1.137	1.142	1.146	1.150	1.154	1.158	1.162	1.166	1.170	0.942
0.943	1.122	1.126	1.131	1.135	1.139	1.143	1.147	1.151	1.155	1.159	1.163	1.167	1.171	0.943
0.944	1.123	1.128	1.132	1.136	1.140	1.144	1.148	1.152	1.156	1.160	1.164	1.168	1.172	0.944
0.945	1.125	1.129	1.133	1.137	1.141	1.145	1.149	1.153	1.157	1.162	1.166	1.170	1.173	0.945
0.946	1.126	1.130	1.134	1.138	1.143	1.147	1.151	1.155	1.159	1.163	1.167	1.171	1.175	0.946
0.947	1.127	1.131	1.136	1.140	1.144	1.148	1.152	1.156	1.160	1.164	1.168	1.172	1.176	0.947
0.948	1.128	1.133	1.137	1.141	1.145	1.149	1.153	1.157	1.161	1.165	1.169	1.173	1.177	0.948
0.949	1.130	1.134	1.138	1.142	1.146	1.150	1.155	1.159	1.163	1.167	1.171	1.175	1.179	0.949
0.950	1.131	1.135	1.139	1.143	1.148	1.152	1.156	1.160	1.164	1.168	1.172	1.176	1.180	0.950
0.951	1.132	1.136	1.141	1.145	1.149	1.153	1.157	1.161	1.165	1.169	1.173	1.177	1.181	0.951
0.952	1.133	1.138	1.142	1.146	1.150	1.154	1.158	1.162	1.166	1.171	1.175	1.179	1.183	0.952
0.953	1.135	1.139	1.143	1.147	1.151	1.156	1.160	1.164	1.168	1.172	1.176	1.180	1.184	0.953
0.954	1.136	1.140	1.144	1.149	1.153	1.157	1.161	1.165	1.169	1.173	1.177	1.181	1.185	0.954
0.955	1.137	1.141	1.146	1.150	1.154	1.158	1.162	1.166	1.170	1.174	1.178	1.182	1.187	0.955
0.956	1.138	1.143	1.147	1.151	1.155	1.159	1.163	1.168	1.172	1.176	1.180	1.184	1.188	0.956
0.957	1.140	1.144	1.148	1.152	1.156	1.161	1.165	1.169	1.173	1.177	1.181	1.185	1.189	0.957
0.958	1.141	1.145	1.149	1.154	1.158	1.162	1.166	1.170	1.174	1.178	1.182	1.186	1.190	0.958
0.959	1.142	1.146	1.151	1.155	1.159	1.163	1.167	1.171	1.175	1.180	1.184	1.188	1.192	0.959
0.960	1.143	1.148	1.152	1.156	1.160	1.164	1.169	1.173	1.177	1.181	1.185	1.189	1.193	0.960
0.961	1.145	1.149	1.153	1.157	1.162	1.166	1.170	1.174	1.178	1.182	1.186	1.190	1.194	0.961
0.962	1.146	1.150	1.154	1.159	1.163	1.167	1.171	1.175	1.179	1.183	1.188	1.192	1.196	0.962
0.963	1.147	1.151	1.156	1.160	1.164	1.168	1.172	1.177	1.181	1.185	1.189	1.193	1.197	0.963
0.964	1.148	1.153	1.157	1.161	1.165	1.170	1.174	1.178	1.182	1.186	1.190	1.194	1.198	0.964
0.965	1.150	1.154	1.158	1.162	1.167	1.171	1.175	1.179	1.183	1.187	1.191	1.195	1.200	0.965
0.966	1.151	1.155	1.159	1.164	1.168	1.172	1.176	1.180	1.184	1.189	1.193	1.197	1.201	0.966
0.967	1.152	1.156	1.161	1.165	1.169	1.173	1.177	1.182	1.186	1.190	1.194	1.198	1.202	0.967
0.968	1.153	1.158	1.162	1.166	1.170	1.175	1.179	1.183	1.187	1.191	1.195	1.199	1.203	0.968
0.969	1.155	1.159	1.163	1.167	1.172	1.176	1.180	1.184	1.188	1.192	1.197	1.201	1.205	0.969
0.970	1.156	1.160	1.165	1.169	1.173	1.177	1.181	1.185	1.190	1.194	1.198	1.202	1.206	0.970
0.971	1.157	1.162	1.166	1.170	1.174	1.178	1.183	1.187	1.191	1.195	1.199	1.203	1.207	0.971
0.972	1.158	1.163	1.167	1.171	1.175	1.180	1.184	1.188	1.192	1.196	1.200	1.205	1.209	0.972
0.973	1.160	1.164	1.168	1.173	1.177	1.181	1.185	1.189	1.194	1.198	1.202	1.206	1.210	0.973
0.974	1.161	1.165	1.170	1.174	1.178	1.182	1.186	1.191	1.195	1.199	1.203	1.207	1.211	0.974
0.975	1.162	1.167	1.171	1.175	1.179	1.184	1.188	1.192	1.196	1.200	1.204	1.208	1.213	0.975
0.976	1.163	1.168	1.172	1.176	1.181	1.185	1.189	1.193	1.197	1.202	1.206	1.210	1.214	0.976
0.977	1.165	1.169	1.173	1.178	1.182	1.186	1.190	1.194	1.199	1.203	1.207	1.211	1.215	0.977
0.978	1.166	1.170	1.175	1.179	1.183	1.187	1.192	1.196	1.200	1.204	1.208	1.212	1.217	0.978
0.979	1.167	1.172	1.176	1.180	1.184	1.189	1.193	1.197	1.201	1.205	1.210	1.214	1.218	0.979

TEMPERATURE °C Flow rate m3/min (actual)

Po/Pa	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	Po/Pa
0.930	1.153	1.162	1.166	1.169	1.173	1.177	1.181	1.185	1.188	1.192	1.196	1.200	1.203	0.930
0.931	1.159	1.163	1.167	1.171	1.175	1.178	1.182	1.186	1.190	1.194	1.197	1.201	1.205	0.931
0.932	1.160	1.164	1.168	1.172	1.176	1.180	1.184	1.187	1.191	1.195	1.199	1.202	1.206	0.932
0.933	1.162	1.166	1.170	1.173	1.177	1.181	1.185	1.189	1.192	1.196	1.200	1.204	1.208	0.933
0.934	1.163	1.167	1.171	1.175	1.179	1.182	1.186	1.190	1.194	1.198	1.201	1.205	1.209	0.934
0.935	1.164	1.168	1.172	1.176	1.180	1.184	1.188	1.191	1.195	1.199	1.203	1.207	1.210	0.935
0.936	1.165	1.170	1.173	1.177	1.181	1.185	1.189	1.193	1.197	1.200	1.204	1.208	1.212	0.936
0.937	1.167	1.171	1.175	1.179	1.183	1.186	1.190	1.194	1.198	1.202	1.205	1.209	1.213	0.937
0.938	1.168	1.172	1.176	1.180	1.184	1.188	1.192	1.195	1.199	1.203	1.207	1.211	1.214	0.938
0.939	1.170	1.174	1.177	1.181	1.185	1.189	1.193	1.197	1.201	1.204	1.208	1.212	1.216	0.939
0.940	1.171	1.175	1.179	1.183	1.187	1.190	1.194	1.198	1.202	1.206	1.209	1.213	1.217	0.940
0.941	1.172	1.176	1.180	1.184	1.188	1.192	1.196	1.199	1.203	1.207	1.211	1.215	1.218	0.941
0.942	1.174	1.177	1.181	1.185	1.189	1.193	1.197	1.201	1.205	1.208	1.212	1.216	1.220	0.942
0.943	1.175	1.179	1.183	1.187	1.190	1.194	1.198	1.202	1.206	1.210	1.214	1.217	1.221	0.943
0.944	1.176	1.180	1.184	1.188	1.192	1.196	1.200	1.203	1.207	1.211	1.215	1.219	1.222	0.944
0.945	1.177	1.181	1.185	1.189	1.193	1.197	1.201	1.205	1.209	1.212	1.216	1.220	1.224	0.945
0.946	1.179	1.183	1.187	1.191	1.194	1.198	1.202	1.206	1.210	1.214	1.218	1.221	1.225	0.946
0.947	1.180	1.184	1.188	1.192	1.196	1.200	1.204	1.207	1.211	1.215	1.219	1.223	1.227	0.947
0.948	1.181	1.185	1.189	1.193	1.197	1.201	1.205	1.209	1.213	1.216	1.220	1.224	1.228	0.948
0.949	1.183	1.187	1.191	1.195	1.198	1.202	1.206	1.210	1.214	1.218	1.222	1.225	1.229	0.949
0.950	1.184	1.188	1.192	1.196	1.200	1.204	1.208	1.211	1.215	1.219	1.223	1.227	1.231	0.950
0.951	1.185	1.189	1.193	1.197	1.201	1.205	1.209	1.213	1.217	1.221	1.224	1.228	1.232	0.951
0.952	1.187	1.191	1.195	1.198	1.202	1.206	1.210	1.214	1.218	1.222	1.226	1.230	1.233	0.952
0.953	1.188	1.192	1.196	1.200	1.204	1.208	1.212	1.215	1.219	1.223	1.227	1.231	1.235	0.953
0.954	1.189	1.193	1.197	1.201	1.205	1.209	1.213	1.217	1.221	1.225	1.228	1.232	1.236	0.954
0.955	1.191	1.195	1.198	1.202	1.206	1.210	1.214	1.218	1.222	1.226	1.230	1.234	1.237	0.955
0.956	1.192	1.196	1.200	1.204	1.208	1.212	1.216	1.219	1.223	1.227	1.231	1.235	1.239	0.956
0.957	1.193	1.197	1.201	1.205	1.209	1.213	1.217	1.221	1.225	1.229	1.232	1.236	1.240	0.957
0.958	1.194	1.198	1.202	1.206	1.210	1.214	1.218	1.222	1.226	1.230	1.234	1.238	1.242	0.958
0.959	1.196	1.200	1.204	1.208	1.212	1.216	1.220	1.223	1.227	1.231	1.235	1.239	1.243	0.959
0.960	1.197	1.201	1.205	1.209	1.213	1.217	1.221	1.225	1.229	1.233	1.237	1.240	1.244	0.960
0.961	1.198	1.202	1.206	1.210	1.214	1.218	1.222	1.226	1.230	1.234	1.238	1.242	1.246	0.961
0.962	1.200	1.204	1.208	1.212	1.216	1.220	1.224	1.228	1.231	1.235	1.239	1.243	1.247	0.962
0.963	1.201	1.205	1.209	1.213	1.217	1.221	1.225	1.229	1.233	1.237	1.241	1.244	1.248	0.963
0.964	1.202	1.206	1.210	1.214	1.218	1.222	1.226	1.230	1.234	1.238	1.242	1.246	1.250	0.964
0.965	1.204	1.208	1.212	1.216	1.220	1.224	1.228	1.232	1.235	1.239	1.243	1.247	1.251	0.965
0.966	1.205	1.209	1.213	1.217	1.221	1.225	1.229	1.233	1.237	1.241	1.245	1.249	1.252	0.966
0.967	1.206	1.210	1.214	1.218	1.222	1.226	1.230	1.234	1.238	1.242	1.246	1.250	1.254	0.967
0.968	1.208	1.212	1.216	1.220	1.224	1.228	1.232	1.236	1.239	1.243	1.247	1.251	1.255	0.968
0.969	1.209	1.213	1.217	1.221	1.225	1.229	1.233	1.237	1.241	1.245	1.249	1.253	1.256	0.969
0.970	1.210	1.214	1.218	1.222	1.226	1.230	1.234	1.238	1.242	1.246	1.250	1.254	1.258	0.970
0.971	1.211	1.216	1.220	1.224	1.228	1.232	1.236	1.240	1.244	1.247	1.251	1.255	1.259	0.971
0.972	1.213	1.217	1.221	1.225	1.229	1.233	1.237	1.241	1.245	1.249	1.253	1.257	1.261	0.972
0.973	1.214	1.218	1.222	1.226	1.230	1.234	1.238	1.242	1.246	1.250	1.254	1.258	1.262	0.973
0.974	1.215	1.219	1.224	1.228	1.232	1.236	1.240	1.244	1.248	1.252	1.255	1.259	1.263	0.974
0.975	1.217	1.221	1.225	1.229	1.233	1.237	1.241	1.245	1.249	1.253	1.257	1.261	1.265	0.975
0.976	1.218	1.222	1.226	1.230	1.234	1.238	1.242	1.246	1.250	1.254	1.258	1.262	1.266	0.976
0.977	1.219	1.223	1.227	1.232	1.236	1.240	1.244	1.248	1.252	1.256	1.260	1.263	1.267	0.977
0.978	1.221	1.225	1.229	1.233	1.237	1.241	1.245	1.249	1.253	1.257	1.261	1.265	1.269	0.978
0.979	1.222	1.226	1.230	1.234	1.238	1.242	1.246	1.250	1.254	1.258	1.262	1.266	1.270	0.979

## TEMPERATURE °C Flow rate m3/min (actual)

Po/Pa	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	Po/Pa
0.930	1.200	1.203	1.207	1.211	1.215	1.218	1.222	1.226	1.229	1.233	1.236	1.240	1.244	0.930
0.931	1.201	1.205	1.209	1.212	1.216	1.220	1.223	1.227	1.231	1.234	1.238	1.241	1.245	0.931
0.932	1.202	1.206	1.210	1.214	1.217	1.221	1.225	1.228	1.232	1.236	1.239	1.243	1.247	0.932
0.933	1.204	1.208	1.211	1.215	1.219	1.222	1.226	1.230	1.233	1.237	1.241	1.244	1.248	0.933
0.934	1.205	1.209	1.213	1.216	1.220	1.224	1.227	1.231	1.235	1.238	1.242	1.246	1.249	0.934
0.935	1.207	1.210	1.214	1.218	1.221	1.225	1.229	1.233	1.236	1.240	1.243	1.247	1.251	0.935
0.936	1.208	1.212	1.215	1.219	1.223	1.227	1.230	1.234	1.238	1.241	1.245	1.248	1.252	0.936
0.937	1.209	1.213	1.217	1.220	1.224	1.228	1.232	1.235	1.239	1.243	1.246	1.250	1.254	0.937
0.938	1.211	1.214	1.218	1.222	1.226	1.229	1.233	1.237	1.240	1.244	1.248	1.251	1.255	0.938
0.939	1.212	1.216	1.219	1.223	1.227	1.231	1.234	1.238	1.242	1.245	1.249	1.253	1.256	0.939
0.940	1.213	1.217	1.221	1.225	1.228	1.232	1.236	1.239	1.243	1.247	1.250	1.254	1.258	0.940
0.941	1.215	1.218	1.222	1.226	1.230	1.233	1.237	1.241	1.244	1.248	1.252	1.255	1.259	0.941
0.942	1.216	1.220	1.224	1.227	1.231	1.235	1.238	1.242	1.246	1.250	1.253	1.257	1.261	0.942
0.943	1.217	1.221	1.225	1.229	1.232	1.236	1.240	1.244	1.247	1.251	1.255	1.258	1.262	0.943
0.944	1.219	1.222	1.226	1.230	1.234	1.238	1.241	1.245	1.249	1.252	1.256	1.260	1.263	0.944
0.945	1.220	1.224	1.228	1.231	1.235	1.239	1.243	1.246	1.250	1.254	1.257	1.261	1.265	0.945
0.946	1.221	1.225	1.229	1.233	1.237	1.240	1.244	1.248	1.251	1.255	1.259	1.262	1.266	0.946
0.947	1.223	1.227	1.230	1.234	1.238	1.242	1.245	1.249	1.253	1.257	1.260	1.264	1.268	0.947
0.948	1.224	1.228	1.232	1.236	1.239	1.243	1.247	1.251	1.254	1.258	1.262	1.265	1.269	0.948
0.949	1.225	1.229	1.233	1.237	1.241	1.244	1.248	1.252	1.256	1.259	1.263	1.267	1.270	0.949
0.950	1.227	1.231	1.234	1.238	1.242	1.246	1.250	1.253	1.257	1.261	1.264	1.268	1.272	0.950
0.951	1.228	1.232	1.236	1.240	1.243	1.247	1.251	1.255	1.258	1.262	1.266	1.270	1.273	0.951
0.952	1.230	1.233	1.237	1.241	1.245	1.249	1.252	1.256	1.260	1.263	1.267	1.271	1.275	0.952
0.953	1.231	1.235	1.239	1.242	1.246	1.250	1.254	1.257	1.261	1.265	1.269	1.272	1.276	0.953
0.954	1.232	1.236	1.240	1.244	1.248	1.251	1.255	1.259	1.263	1.266	1.270	1.274	1.277	0.954
0.955	1.234	1.237	1.241	1.245	1.249	1.253	1.256	1.260	1.264	1.268	1.271	1.275	1.279	0.955
0.956	1.235	1.239	1.243	1.246	1.250	1.254	1.258	1.262	1.265	1.269	1.273	1.277	1.280	0.956
0.957	1.236	1.240	1.244	1.248	1.252	1.255	1.259	1.263	1.267	1.270	1.274	1.278	1.282	0.957
0.958	1.238	1.242	1.245	1.249	1.253	1.257	1.261	1.264	1.268	1.272	1.276	1.279	1.283	0.958
0.959	1.239	1.243	1.247	1.251	1.254	1.258	1.262	1.266	1.269	1.273	1.277	1.281	1.284	0.959
0.960	1.240	1.244	1.248	1.252	1.256	1.260	1.263	1.267	1.271	1.275	1.278	1.282	1.286	0.960
0.961	1.242	1.246	1.249	1.253	1.257	1.261	1.265	1.269	1.272	1.276	1.280	1.284	1.287	0.961
0.962	1.243	1.247	1.251	1.255	1.258	1.262	1.266	1.270	1.274	1.277	1.281	1.285	1.289	0.962
0.963	1.244	1.248	1.252	1.256	1.260	1.264	1.267	1.271	1.275	1.279	1.283	1.286	1.290	0.963
0.964	1.246	1.250	1.254	1.257	1.261	1.265	1.269	1.273	1.276	1.280	1.284	1.288	1.291	0.964
0.965	1.247	1.251	1.255	1.259	1.263	1.266	1.270	1.274	1.278	1.282	1.285	1.289	1.293	0.965
0.966	1.249	1.252	1.256	1.260	1.264	1.268	1.272	1.275	1.279	1.283	1.287	1.291	1.294	0.966
0.967	1.250	1.254	1.258	1.262	1.265	1.269	1.273	1.277	1.281	1.284	1.288	1.292	1.296	0.967
0.968	1.251	1.255	1.259	1.263	1.267	1.271	1.274	1.278	1.282	1.286	1.290	1.293	1.297	0.968
0.969	1.253	1.256	1.260	1.264	1.268	1.272	1.276	1.280	1.283	1.287	1.291	1.295	1.298	0.969
0.970	1.254	1.258	1.262	1.266	1.269	1.273	1.277	1.281	1.285	1.289	1.292	1.296	1.300	0.970
0.971	1.255	1.259	1.263	1.267	1.271	1.275	1.279	1.282	1.286	1.290	1.294	1.298	1.301	0.971
0.972	1.257	1.261	1.264	1.268	1.272	1.276	1.280	1.284	1.288	1.291	1.295	1.299	1.303	0.972
0.973	1.258	1.262	1.266	1.270	1.274	1.277	1.281	1.285	1.289	1.293	1.297	1.300	1.304	0.973
0.974	1.259	1.263	1.267	1.271	1.275	1.279	1.283	1.287	1.290	1.294	1.298	1.302	1.306	0.974
0.975	1.261	1.265	1.269	1.272	1.276	1.280	1.284	1.288	1.292	1.296	1.299	1.303	1.307	0.975
0.976	1.262	1.266	1.270	1.274	1.278	1.282	1.285	1.289	1.293	1.297	1.301	1.305	1.308	0.976
0.977	1.263	1.267	1.271	1.275	1.279	1.283	1.287	1.291	1.295	1.298	1.302	1.306	1.310	0.977
0.978	1.265	1.269	1.273	1.277	1.280	1.284	1.288	1.292	1.296	1.300	1.304	1.307	1.311	0.978
0.979	1.266	1.270	1.274	1.278	1.282	1.286	1.290	1.293	1.297	1.301	1.305	1.309	1.313	0.979

TEMPERATURE °C Flow rate m3/min (actual)

Po/Pa	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	Po/Pa
0.930	1.218	1.222	1.226	1.229	1.233	1.236	1.240	1.244	1.247	1.251	1.254	1.258	1.262	0.930
0.931	1.220	1.223	1.227	1.231	1.234	1.238	1.241	1.245	1.249	1.252	1.256	1.259	1.263	0.931
0.932	1.221	1.225	1.228	1.232	1.236	1.239	1.243	1.247	1.250	1.254	1.257	1.261	1.264	0.932
0.933	1.222	1.226	1.230	1.233	1.237	1.241	1.244	1.248	1.252	1.255	1.259	1.262	1.266	0.933
0.934	1.224	1.227	1.231	1.235	1.238	1.242	1.246	1.249	1.253	1.257	1.260	1.264	1.267	0.934
0.935	1.225	1.229	1.233	1.236	1.240	1.243	1.247	1.251	1.254	1.258	1.261	1.265	1.269	0.935
0.936	1.227	1.230	1.234	1.238	1.241	1.245	1.248	1.252	1.256	1.259	1.263	1.266	1.270	0.936
0.937	1.228	1.232	1.235	1.239	1.243	1.246	1.250	1.254	1.257	1.261	1.264	1.268	1.271	0.937
0.938	1.229	1.233	1.237	1.240	1.244	1.248	1.251	1.255	1.259	1.262	1.266	1.269	1.273	0.938
0.939	1.231	1.234	1.238	1.242	1.245	1.249	1.253	1.256	1.260	1.264	1.267	1.271	1.274	0.939
0.940	1.232	1.236	1.239	1.243	1.247	1.250	1.254	1.258	1.261	1.265	1.269	1.272	1.276	0.940
0.941	1.233	1.237	1.241	1.244	1.248	1.252	1.255	1.259	1.263	1.266	1.270	1.274	1.277	0.941
0.942	1.235	1.238	1.242	1.246	1.250	1.253	1.257	1.261	1.264	1.268	1.271	1.275	1.279	0.942
0.943	1.236	1.240	1.244	1.247	1.251	1.255	1.258	1.262	1.266	1.269	1.273	1.276	1.280	0.943
0.944	1.238	1.241	1.245	1.249	1.252	1.256	1.260	1.263	1.267	1.271	1.274	1.278	1.281	0.944
0.945	1.239	1.243	1.246	1.250	1.254	1.257	1.261	1.265	1.268	1.272	1.276	1.279	1.283	0.945
0.946	1.240	1.244	1.248	1.251	1.255	1.259	1.262	1.266	1.270	1.273	1.277	1.281	1.284	0.946
0.947	1.242	1.245	1.249	1.253	1.257	1.260	1.264	1.268	1.271	1.275	1.278	1.282	1.286	0.947
0.948	1.243	1.247	1.251	1.254	1.258	1.262	1.265	1.269	1.273	1.276	1.280	1.284	1.287	0.948
0.949	1.244	1.248	1.252	1.256	1.259	1.263	1.267	1.270	1.274	1.278	1.281	1.285	1.289	0.949
0.950	1.246	1.250	1.253	1.257	1.261	1.264	1.268	1.272	1.275	1.279	1.283	1.286	1.290	0.950
0.951	1.247	1.251	1.255	1.258	1.262	1.266	1.270	1.273	1.277	1.281	1.284	1.288	1.291	0.951
0.952	1.249	1.252	1.256	1.260	1.263	1.267	1.271	1.275	1.278	1.282	1.286	1.289	1.293	0.952
0.953	1.250	1.254	1.257	1.261	1.265	1.269	1.272	1.276	1.280	1.283	1.287	1.291	1.294	0.953
0.954	1.251	1.255	1.259	1.263	1.266	1.270	1.274	1.277	1.281	1.285	1.288	1.292	1.296	0.954
0.955	1.253	1.256	1.260	1.264	1.268	1.271	1.275	1.279	1.282	1.286	1.290	1.293	1.297	0.955
0.956	1.254	1.258	1.262	1.265	1.269	1.273	1.277	1.280	1.284	1.288	1.291	1.295	1.299	0.956
0.957	1.255	1.259	1.263	1.267	1.270	1.274	1.278	1.282	1.285	1.289	1.293	1.296	1.300	0.957
0.958	1.257	1.261	1.264	1.268	1.272	1.276	1.279	1.283	1.287	1.290	1.294	1.298	1.301	0.958
0.959	1.258	1.262	1.266	1.269	1.273	1.277	1.281	1.284	1.288	1.292	1.296	1.299	1.303	0.959
0.960	1.260	1.263	1.267	1.271	1.275	1.278	1.282	1.286	1.290	1.293	1.297	1.301	1.304	0.960
0.961	1.261	1.265	1.269	1.272	1.276	1.280	1.284	1.287	1.291	1.295	1.298	1.302	1.306	0.961
0.962	1.262	1.266	1.270	1.274	1.277	1.281	1.285	1.289	1.292	1.296	1.300	1.303	1.307	0.962
0.963	1.264	1.267	1.271	1.275	1.279	1.283	1.286	1.290	1.294	1.297	1.301	1.305	1.309	0.963
0.964	1.265	1.269	1.273	1.276	1.280	1.284	1.288	1.291	1.295	1.299	1.303	1.306	1.310	0.964
0.965	1.266	1.270	1.274	1.278	1.282	1.285	1.289	1.293	1.297	1.300	1.304	1.308	1.311	0.965
0.966	1.268	1.272	1.275	1.279	1.283	1.287	1.291	1.294	1.298	1.302	1.305	1.309	1.313	0.966
0.967	1.269	1.273	1.277	1.281	1.284	1.288	1.292	1.296	1.299	1.303	1.307	1.311	1.314	0.967
0.968	1.271	1.274	1.278	1.282	1.286	1.290	1.293	1.297	1.301	1.305	1.308	1.312	1.316	0.968
0.969	1.272	1.276	1.280	1.283	1.287	1.291	1.295	1.298	1.302	1.306	1.310	1.313	1.317	0.969
0.970	1.273	1.277	1.281	1.285	1.289	1.292	1.296	1.300	1.304	1.307	1.311	1.315	1.319	0.970
0.971	1.275	1.279	1.282	1.286	1.290	1.294	1.298	1.301	1.305	1.309	1.313	1.316	1.320	0.971
0.972	1.276	1.280	1.284	1.288	1.291	1.295	1.299	1.303	1.306	1.310	1.314	1.318	1.321	0.972
0.973	1.277	1.281	1.285	1.289	1.293	1.297	1.300	1.304	1.308	1.312	1.315	1.319	1.323	0.973
0.974	1.279	1.283	1.287	1.290	1.294	1.298	1.302	1.306	1.309	1.313	1.317	1.321	1.324	0.974
0.975	1.280	1.284	1.288	1.292	1.296	1.299	1.303	1.307	1.311	1.314	1.318	1.322	1.326	0.975
0.976	1.282	1.285	1.289	1.293	1.297	1.301	1.305	1.308	1.312	1.316	1.320	1.323	1.327	0.976
0.977	1.283	1.287	1.291	1.295	1.298	1.302	1.306	1.310	1.314	1.317	1.321	1.325	1.329	0.977
0.978	1.284	1.288	1.292	1.296	1.300	1.304	1.307	1.311	1.315	1.319	1.322	1.326	1.330	0.978
0.979	1.286	1.290	1.293	1.297	1.301	1.305	1.309	1.313	1.316	1.320	1.324	1.328	1.331	0.979

Po/Pa	TEMPERATURE °F Flow rate ft3/min (actual)												Po/Pa	
	-12	-8	-4	0	4	8	12	16	20	24	28	32		36
0.930	39.60	39.76	39.91	40.07	40.23	40.38	40.54	40.69	40.84	40.99	41.15	41.30	41.45	0.930
0.931	39.64	39.80	39.96	40.12	40.27	40.43	40.58	40.74	40.89	41.04	41.19	41.34	41.50	0.931
0.932	39.69	39.85	40.00	40.16	40.32	40.47	40.63	40.78	40.93	41.09	41.24	41.39	41.54	0.932
0.933	39.73	39.89	40.05	40.21	40.36	40.52	40.67	40.83	40.98	41.13	41.29	41.44	41.59	0.933
0.934	39.78	39.94	40.09	40.25	40.41	40.56	40.72	40.87	41.03	41.18	41.33	41.48	41.64	0.934
0.935	39.82	39.98	40.14	40.30	40.45	40.61	40.76	40.92	41.07	41.23	41.38	41.53	41.68	0.935
0.936	39.87	40.03	40.18	40.34	40.50	40.65	40.81	40.97	41.12	41.27	41.43	41.58	41.73	0.936
0.937	39.91	40.07	40.23	40.39	40.54	40.70	40.86	41.01	41.17	41.32	41.47	41.62	41.78	0.937
0.938	39.96	40.12	40.27	40.43	40.59	40.75	40.90	41.06	41.21	41.37	41.52	41.67	41.82	0.938
0.939	40.00	40.16	40.32	40.48	40.64	40.79	40.95	41.10	41.26	41.41	41.56	41.72	41.87	0.939
0.940	40.05	40.21	40.37	40.52	40.68	40.84	40.99	41.15	41.30	41.46	41.61	41.76	41.92	0.940
0.941	40.09	40.25	40.41	40.57	40.73	40.88	41.04	41.19	41.35	41.50	41.66	41.81	41.96	0.941
0.942	40.14	40.30	40.46	40.61	40.77	40.93	41.08	41.24	41.40	41.55	41.70	41.86	42.01	0.942
0.943	40.18	40.34	40.50	40.66	40.82	40.97	41.13	41.29	41.44	41.60	41.75	41.90	42.06	0.943
0.944	40.23	40.39	40.55	40.70	40.86	41.02	41.18	41.33	41.49	41.64	41.80	41.95	42.10	0.944
0.945	40.27	40.43	40.59	40.75	40.91	41.07	41.22	41.38	41.53	41.69	41.84	42.00	42.15	0.945
0.946	40.32	40.48	40.64	40.79	40.95	41.11	41.27	41.42	41.58	41.74	41.89	42.04	42.20	0.946
0.947	40.36	40.52	40.68	40.84	41.00	41.16	41.31	41.47	41.63	41.78	41.94	42.09	42.24	0.947
0.948	40.40	40.57	40.73	40.89	41.04	41.20	41.36	41.52	41.67	41.83	41.98	42.14	42.29	0.948
0.949	40.45	40.61	40.77	40.93	41.09	41.25	41.41	41.56	41.72	41.87	42.03	42.18	42.34	0.949
0.950	40.49	40.66	40.82	40.98	41.13	41.29	41.45	41.61	41.76	41.92	42.08	42.23	42.38	0.950
0.951	40.54	40.70	40.86	41.02	41.18	41.34	41.50	41.65	41.81	41.97	42.12	42.28	42.43	0.951
0.952	40.58	40.75	40.91	41.07	41.23	41.38	41.54	41.70	41.86	42.01	42.17	42.32	42.48	0.952
0.953	40.63	40.79	40.95	41.11	41.27	41.43	41.59	41.75	41.90	42.06	42.22	42.37	42.52	0.953
0.954	40.67	40.83	41.00	41.16	41.32	41.48	41.63	41.79	41.95	42.11	42.26	42.42	42.57	0.954
0.955	40.72	40.88	41.04	41.20	41.36	41.52	41.68	41.84	42.00	42.15	42.31	42.46	42.62	0.955
0.956	40.76	40.92	41.09	41.25	41.41	41.57	41.73	41.88	42.04	42.20	42.35	42.51	42.67	0.956
0.957	40.81	40.97	41.13	41.29	41.45	41.61	41.77	41.93	42.09	42.25	42.40	42.56	42.71	0.957
0.958	40.85	41.01	41.18	41.34	41.50	41.66	41.82	41.98	42.13	42.29	42.45	42.60	42.76	0.958
0.959	40.90	41.06	41.22	41.38	41.54	41.70	41.86	42.02	42.18	42.34	42.49	42.65	42.81	0.959
0.960	40.94	41.10	41.27	41.43	41.59	41.75	41.91	42.07	42.23	42.38	42.54	42.70	42.85	0.960
0.961	40.99	41.15	41.31	41.47	41.64	41.80	41.96	42.11	42.27	42.43	42.59	42.74	42.90	0.961
0.962	41.03	41.19	41.36	41.52	41.68	41.84	42.00	42.16	42.32	42.48	42.63	42.79	42.95	0.962
0.963	41.08	41.24	41.40	41.56	41.73	41.89	42.05	42.21	42.36	42.52	42.68	42.84	42.99	0.963
0.964	41.12	41.28	41.45	41.61	41.77	41.93	42.09	42.25	42.41	42.57	42.73	42.88	43.04	0.964
0.965	41.17	41.33	41.49	41.66	41.82	41.98	42.14	42.30	42.46	42.62	42.77	42.93	43.09	0.965
0.966	41.21	41.37	41.54	41.70	41.86	42.02	42.18	42.34	42.50	42.66	42.82	42.98	43.13	0.966
0.967	41.25	41.42	41.58	41.75	41.91	42.07	42.23	42.39	42.55	42.71	42.87	43.02	43.18	0.967
0.968	41.30	41.46	41.63	41.79	41.95	42.12	42.28	42.44	42.60	42.75	42.91	43.07	43.23	0.968
0.969	41.34	41.51	41.67	41.84	42.00	42.16	42.32	42.48	42.64	42.80	42.96	43.12	43.27	0.969
0.970	41.39	41.55	41.72	41.88	42.04	42.21	42.37	42.53	42.69	42.85	43.01	43.16	43.32	0.970
0.971	41.43	41.60	41.76	41.93	42.09	42.25	42.41	42.57	42.73	42.89	43.05	43.21	43.37	0.971
0.972	41.48	41.64	41.81	41.97	42.14	42.30	42.46	42.62	42.78	42.94	43.10	43.26	43.42	0.972
0.973	41.52	41.69	41.85	42.02	42.18	42.34	42.51	42.67	42.83	42.99	43.15	43.30	43.46	0.973
0.974	41.57	41.73	41.90	42.06	42.23	42.39	42.55	42.71	42.87	43.03	43.19	43.35	43.51	0.974
0.975	41.61	41.78	41.94	42.11	42.27	42.43	42.60	42.76	42.92	43.08	43.24	43.40	43.56	0.975
0.976	41.66	41.82	41.99	42.15	42.32	42.48	42.64	42.80	42.97	43.13	43.29	43.44	43.60	0.976
0.977	41.70	41.87	42.03	42.20	42.36	42.53	42.69	42.85	43.01	43.17	43.33	43.49	43.65	0.977
0.978	41.75	41.91	42.08	42.24	42.41	42.57	42.73	42.90	43.06	43.22	43.38	43.54	43.70	0.978
0.979	41.79	41.96	42.12	42.29	42.45	42.62	42.78	42.94	43.10	43.26	43.43	43.58	43.74	0.979

## TEMPERATURE °F Flow rate ft3/min (actual)

Po/Pa	18	22	26	30	34	38	42	46	50	54	58	62	66	Po/Pa
0.930	40.77	40.92	41.07	41.22	41.37	41.52	41.67	41.82	41.97	42.12	42.27	42.41	42.56	0.930
0.931	40.81	40.96	41.12	41.27	41.42	41.57	41.72	41.87	42.02	42.17	42.31	42.46	42.61	0.931
0.932	40.86	41.01	41.16	41.32	41.47	41.62	41.77	41.92	42.07	42.21	42.36	42.51	42.66	0.932
0.933	40.90	41.06	41.21	41.36	41.51	41.66	41.81	41.96	42.11	42.26	42.41	42.56	42.70	0.933
0.934	40.95	41.10	41.26	41.41	41.56	41.71	41.86	42.01	42.16	42.31	42.46	42.60	42.75	0.934
0.935	41.00	41.15	41.30	41.45	41.61	41.76	41.91	42.06	42.21	42.36	42.50	42.65	42.80	0.935
0.936	41.04	41.20	41.35	41.50	41.65	41.80	41.96	42.11	42.25	42.40	42.55	42.70	42.85	0.936
0.937	41.09	41.24	41.40	41.55	41.70	41.85	42.00	42.15	42.30	42.45	42.60	42.75	42.89	0.937
0.938	41.13	41.29	41.44	41.59	41.75	41.90	42.05	42.20	42.35	42.50	42.65	42.80	42.94	0.938
0.939	41.18	41.33	41.49	41.64	41.79	41.95	42.10	42.25	42.40	42.55	42.70	42.84	42.99	0.939
0.940	41.23	41.38	41.53	41.69	41.84	41.99	42.14	42.29	42.44	42.59	42.74	42.89	43.04	0.940
0.941	41.27	41.43	41.58	41.73	41.89	42.04	42.19	42.34	42.49	42.64	42.79	42.94	43.09	0.941
0.942	41.32	41.47	41.63	41.78	41.93	42.09	42.24	42.39	42.54	42.69	42.84	42.99	43.14	0.942
0.943	41.36	41.52	41.67	41.83	41.98	42.13	42.28	42.44	42.59	42.74	42.89	43.03	43.18	0.943
0.944	41.41	41.57	41.72	41.87	42.03	42.18	42.33	42.48	42.63	42.78	42.93	43.08	43.23	0.944
0.945	41.46	41.61	41.77	41.92	42.07	42.23	42.38	42.53	42.68	42.83	42.98	43.13	43.28	0.945
0.946	41.50	41.66	41.81	41.97	42.12	42.27	42.43	42.58	42.73	42.88	43.03	43.18	43.33	0.946
0.947	41.55	41.70	41.86	42.01	42.17	42.32	42.47	42.62	42.78	42.93	43.08	43.23	43.38	0.947
0.948	41.59	41.75	41.91	42.06	42.21	42.37	42.52	42.67	42.82	42.97	43.12	43.27	43.42	0.948
0.949	41.64	41.80	41.95	42.11	42.26	42.41	42.57	42.72	42.87	43.02	43.17	43.32	43.47	0.949
0.950	41.69	41.84	42.00	42.15	42.31	42.46	42.61	42.77	42.92	43.07	43.22	43.37	43.52	0.950
0.951	41.73	41.89	42.04	42.20	42.35	42.51	42.66	42.81	42.97	43.12	43.27	43.42	43.57	0.951
0.952	41.78	41.94	42.09	42.25	42.40	42.55	42.71	42.86	43.01	43.16	43.32	43.47	43.62	0.952
0.953	41.82	41.98	42.14	42.29	42.45	42.60	42.76	42.91	43.06	43.21	43.36	43.51	43.66	0.953
0.954	41.87	42.03	42.18	42.34	42.49	42.65	42.80	42.96	43.11	43.26	43.41	43.56	43.71	0.954
0.955	41.92	42.07	42.23	42.39	42.54	42.70	42.85	43.00	43.16	43.31	43.46	43.61	43.76	0.955
0.956	41.96	42.12	42.28	42.43	42.59	42.74	42.90	43.05	43.20	43.36	43.51	43.66	43.81	0.956
0.957	42.01	42.17	42.32	42.48	42.63	42.79	42.94	43.10	43.25	43.40	43.55	43.71	43.86	0.957
0.958	42.06	42.21	42.37	42.53	42.68	42.84	42.99	43.14	43.30	43.45	43.60	43.75	43.90	0.958
0.959	42.10	42.26	42.42	42.57	42.73	42.88	43.04	43.19	43.35	43.50	43.65	43.80	43.95	0.959
0.960	42.15	42.31	42.46	42.62	42.78	42.93	43.09	43.24	43.39	43.55	43.70	43.85	44.00	0.960
0.961	42.19	42.35	42.51	42.67	42.82	42.98	43.13	43.29	43.44	43.59	43.75	43.90	44.05	0.961
0.962	42.24	42.40	42.56	42.71	42.87	43.02	43.18	43.33	43.49	43.64	43.79	43.95	44.10	0.962
0.963	42.29	42.44	42.60	42.76	42.92	43.07	43.23	43.38	43.54	43.69	43.84	43.99	44.14	0.963
0.964	42.33	42.49	42.65	42.81	42.96	43.12	43.27	43.43	43.58	43.74	43.89	44.04	44.19	0.964
0.965	42.38	42.54	42.69	42.85	43.01	43.17	43.32	43.48	43.63	43.78	43.94	44.09	44.24	0.965
0.966	42.42	42.58	42.74	42.90	43.06	43.21	43.37	43.52	43.68	43.83	43.98	44.14	44.29	0.966
0.967	42.47	42.63	42.79	42.95	43.10	43.26	43.41	43.57	43.72	43.88	44.03	44.19	44.34	0.967
0.968	42.52	42.68	42.83	42.99	43.15	43.31	43.46	43.62	43.77	43.93	44.08	44.23	44.39	0.968
0.969	42.56	42.72	42.88	43.04	43.20	43.35	43.51	43.66	43.82	43.97	44.13	44.28	44.43	0.969
0.970	42.61	42.77	42.93	43.09	43.24	43.40	43.56	43.71	43.87	44.02	44.18	44.33	44.48	0.970
0.971	42.65	42.81	42.97	43.13	43.29	43.45	43.60	43.76	43.91	44.07	44.22	44.38	44.53	0.971
0.972	42.70	42.86	43.02	43.18	43.34	43.49	43.65	43.81	43.96	44.12	44.27	44.43	44.58	0.972
0.973	42.75	42.91	43.07	43.23	43.38	43.54	43.70	43.85	44.01	44.16	44.32	44.47	44.63	0.973
0.974	42.79	42.95	43.11	43.27	43.43	43.59	43.74	43.90	44.06	44.21	44.37	44.52	44.67	0.974
0.975	42.84	43.00	43.16	43.32	43.48	43.63	43.79	43.95	44.10	44.26	44.41	44.57	44.72	0.975
0.976	42.89	43.05	43.21	43.36	43.52	43.68	43.84	44.00	44.15	44.31	44.46	44.62	44.77	0.976
0.977	42.93	43.09	43.25	43.41	43.57	43.73	43.89	44.04	44.20	44.36	44.51	44.66	44.82	0.977
0.978	42.98	43.14	43.30	43.46	43.62	43.78	43.93	44.09	44.25	44.40	44.56	44.71	44.87	0.978
0.979	43.02	43.18	43.35	43.50	43.66	43.82	43.98	44.14	44.29	44.45	44.61	44.76	44.92	0.979

## TEMPERATURE °F Flow rate ft3/min (actual)

Po/Pa	48	52	56	60	64	68	72	76	80	84	88	92	96	Po/Pa
0.930	41.90	42.04	42.19	42.34	42.49	42.63	42.78	42.92	43.07	43.21	43.35	43.50	43.64	0.930
0.931	41.94	42.09	42.24	42.39	42.53	42.68	42.83	42.97	43.11	43.26	43.40	43.54	43.69	0.931
0.932	41.99	42.14	42.29	42.43	42.58	42.73	42.87	43.02	43.16	43.31	43.45	43.59	43.74	0.932
0.933	42.04	42.19	42.33	42.48	42.63	42.78	42.92	43.07	43.21	43.36	43.50	43.64	43.79	0.933
0.934	42.09	42.23	42.38	42.53	42.68	42.82	42.97	43.12	43.26	43.40	43.55	43.69	43.83	0.934
0.935	42.13	42.28	42.43	42.58	42.73	42.87	43.02	43.16	43.31	43.45	43.60	43.74	43.88	0.935
0.936	42.18	42.33	42.48	42.63	42.77	42.92	43.07	43.21	43.36	43.50	43.65	43.79	43.93	0.936
0.937	42.23	42.38	42.53	42.67	42.82	42.97	43.11	43.26	43.41	43.55	43.70	43.84	43.98	0.937
0.938	42.27	42.42	42.57	42.72	42.87	43.02	43.16	43.31	43.45	43.60	43.74	43.89	44.03	0.938
0.939	42.32	42.47	42.62	42.77	42.92	43.06	43.21	43.36	43.50	43.65	43.79	43.94	44.08	0.939
0.940	42.37	42.52	42.67	42.82	42.97	43.11	43.26	43.41	43.55	43.70	43.84	43.99	44.13	0.940
0.941	42.42	42.57	42.72	42.86	43.01	43.16	43.31	43.45	43.60	43.75	43.89	44.04	44.18	0.941
0.942	42.46	42.61	42.76	42.91	43.06	43.21	43.36	43.50	43.65	43.80	43.94	44.08	44.23	0.942
0.943	42.51	42.66	42.81	42.96	43.11	43.26	43.40	43.55	43.70	43.84	43.99	44.13	44.28	0.943
0.944	42.56	42.71	42.86	43.01	43.16	43.31	43.45	43.60	43.75	43.89	44.04	44.18	44.33	0.944
0.945	42.61	42.76	42.91	43.06	43.21	43.35	43.50	43.65	43.80	43.94	44.09	44.23	44.38	0.945
0.946	42.65	42.80	42.95	43.10	43.25	43.40	43.55	43.70	43.84	43.99	44.14	44.28	44.43	0.946
0.947	42.70	42.85	43.00	43.15	43.30	43.45	43.60	43.75	43.89	44.04	44.19	44.33	44.48	0.947
0.948	42.75	42.90	43.05	43.20	43.35	43.50	43.65	43.79	43.94	44.09	44.23	44.38	44.52	0.948
0.949	42.80	42.95	43.10	43.25	43.40	43.55	43.69	43.84	43.99	44.14	44.28	44.43	44.57	0.949
0.950	42.84	42.99	43.14	43.30	43.45	43.59	43.74	43.89	44.04	44.19	44.33	44.48	44.62	0.950
0.951	42.89	43.04	43.19	43.34	43.49	43.64	43.79	43.94	44.09	44.23	44.38	44.53	44.67	0.951
0.952	42.94	43.09	43.24	43.39	43.54	43.69	43.84	43.99	44.14	44.28	44.43	44.58	44.72	0.952
0.953	42.98	43.14	43.29	43.44	43.59	43.74	43.89	44.04	44.18	44.33	44.48	44.63	44.77	0.953
0.954	43.03	43.18	43.34	43.49	43.64	43.79	43.94	44.08	44.23	44.38	44.53	44.67	44.82	0.954
0.955	43.08	43.23	43.38	43.53	43.69	43.84	43.98	44.13	44.28	44.43	44.58	44.72	44.87	0.955
0.956	43.13	43.28	43.43	43.58	43.73	43.88	44.03	44.18	44.33	44.48	44.63	44.77	44.92	0.956
0.957	43.17	43.33	43.48	43.63	43.78	43.93	44.08	44.23	44.38	44.53	44.67	44.82	44.97	0.957
0.958	43.22	43.37	43.53	43.68	43.83	43.98	44.13	44.28	44.43	44.58	44.72	44.87	45.02	0.958
0.959	43.27	43.42	43.57	43.73	43.88	44.03	44.18	44.33	44.48	44.62	44.77	44.92	45.07	0.959
0.960	43.32	43.47	43.62	43.77	43.93	44.08	44.23	44.38	44.53	44.67	44.82	44.97	45.12	0.960
0.961	43.36	43.52	43.67	43.82	43.97	44.12	44.27	44.42	44.57	44.72	44.87	45.02	45.17	0.961
0.962	43.41	43.56	43.72	43.87	44.02	44.17	44.32	44.47	44.62	44.77	44.92	45.07	45.22	0.962
0.963	43.46	43.61	43.76	43.92	44.07	44.22	44.37	44.52	44.67	44.82	44.97	45.12	45.26	0.963
0.964	43.51	43.66	43.81	43.97	44.12	44.27	44.42	44.57	44.72	44.87	45.02	45.17	45.31	0.964
0.965	43.55	43.71	43.86	44.01	44.17	44.32	44.47	44.62	44.77	44.92	45.07	45.22	45.36	0.965
0.966	43.60	43.75	43.91	44.06	44.21	44.37	44.52	44.67	44.82	44.97	45.12	45.26	45.41	0.966
0.967	43.65	43.80	43.96	44.11	44.26	44.41	44.56	44.72	44.87	45.02	45.16	45.31	45.46	0.967
0.968	43.69	43.85	44.00	44.16	44.31	44.46	44.61	44.76	44.91	45.06	45.21	45.36	45.51	0.968
0.969	43.74	43.90	44.05	44.20	44.36	44.51	44.66	44.81	44.96	45.11	45.26	45.41	45.56	0.969
0.970	43.79	43.94	44.10	44.25	44.41	44.56	44.71	44.86	45.01	45.16	45.31	45.46	45.61	0.970
0.971	43.84	43.99	44.15	44.30	44.45	44.61	44.76	44.91	45.06	45.21	45.36	45.51	45.66	0.971
0.972	43.88	44.04	44.19	44.35	44.50	44.65	44.81	44.96	45.11	45.26	45.41	45.56	45.71	0.972
0.973	43.93	44.09	44.24	44.40	44.55	44.70	44.86	45.01	45.16	45.31	45.46	45.61	45.76	0.973
0.974	43.98	44.13	44.29	44.44	44.60	44.75	44.90	45.06	45.21	45.36	45.51	45.66	45.81	0.974
0.975	44.03	44.18	44.34	44.49	44.65	44.80	44.95	45.10	45.26	45.41	45.56	45.71	45.86	0.975
0.976	44.07	44.23	44.39	44.54	44.69	44.85	45.00	45.15	45.30	45.46	45.61	45.76	45.91	0.976
0.977	44.12	44.28	44.43	44.59	44.74	44.90	45.05	45.20	45.35	45.50	45.66	45.81	45.96	0.977
0.978	44.17	44.33	44.48	44.64	44.79	44.94	45.10	45.25	45.40	45.55	45.70	45.85	46.00	0.978
0.979	44.22	44.37	44.53	44.68	44.84	44.99	45.15	45.30	45.45	45.60	45.75	45.90	46.05	0.979

## TEMPERATURE °F Flow rate ft3/min (actual)

Po/Pa	76	80	84	88	92	96	100	104	108	112	116	120	124	Po/Pa
0.930	42.92	43.07	43.21	43.35	43.50	43.64	43.78	43.92	44.06	44.20	44.34	44.48	44.62	0.930
0.931	42.97	43.11	43.26	43.40	43.54	43.69	43.83	43.97	44.11	44.25	44.39	44.53	44.67	0.931
0.932	43.02	43.16	43.31	43.45	43.59	43.74	43.88	44.02	44.16	44.30	44.44	44.58	44.72	0.932
0.933	43.07	43.21	43.36	43.50	43.64	43.79	43.93	44.07	44.21	44.35	44.49	44.63	44.77	0.933
0.934	43.12	43.26	43.40	43.55	43.69	43.83	43.98	44.12	44.26	44.40	44.54	44.68	44.82	0.934
0.935	43.16	43.31	43.45	43.60	43.74	43.88	44.03	44.17	44.31	44.45	44.59	44.73	44.87	0.935
0.936	43.21	43.36	43.50	43.65	43.79	43.93	44.08	44.22	44.36	44.50	44.64	44.78	44.92	0.936
0.937	43.26	43.41	43.55	43.70	43.84	43.98	44.13	44.27	44.41	44.55	44.69	44.83	44.97	0.937
0.938	43.31	43.45	43.60	43.74	43.89	44.03	44.17	44.32	44.46	44.60	44.74	44.88	45.02	0.938
0.939	43.36	43.50	43.65	43.79	43.94	44.08	44.22	44.37	44.51	44.65	44.79	44.93	45.07	0.939
0.940	43.41	43.55	43.70	43.84	43.99	44.13	44.27	44.42	44.56	44.70	44.84	44.98	45.12	0.940
0.941	43.45	43.60	43.75	43.89	44.04	44.18	44.32	44.47	44.61	44.75	44.89	45.03	45.17	0.941
0.942	43.50	43.65	43.80	43.94	44.08	44.23	44.37	44.52	44.66	44.80	44.94	45.08	45.22	0.942
0.943	43.55	43.70	43.84	43.99	44.13	44.28	44.42	44.57	44.71	44.85	44.99	45.13	45.27	0.943
0.944	43.60	43.75	43.89	44.04	44.18	44.33	44.47	44.61	44.76	44.90	45.04	45.18	45.32	0.944
0.945	43.65	43.80	43.94	44.09	44.23	44.38	44.52	44.66	44.81	44.95	45.09	45.23	45.37	0.945
0.946	43.70	43.84	43.99	44.14	44.28	44.43	44.57	44.71	44.86	45.00	45.14	45.28	45.43	0.946
0.947	43.75	43.89	44.04	44.19	44.33	44.48	44.62	44.76	44.91	45.05	45.19	45.33	45.48	0.947
0.948	43.79	43.94	44.09	44.23	44.38	44.52	44.67	44.81	44.96	45.10	45.24	45.38	45.53	0.948
0.949	43.84	43.99	44.14	44.28	44.43	44.57	44.72	44.86	45.01	45.15	45.29	45.43	45.58	0.949
0.950	43.89	44.04	44.19	44.33	44.48	44.62	44.77	44.91	45.06	45.20	45.34	45.49	45.63	0.950
0.951	43.94	44.09	44.23	44.38	44.53	44.67	44.82	44.96	45.11	45.25	45.39	45.54	45.68	0.951
0.952	43.99	44.14	44.28	44.43	44.58	44.72	44.87	45.01	45.16	45.30	45.44	45.59	45.73	0.952
0.953	44.04	44.18	44.33	44.48	44.63	44.77	44.92	45.06	45.21	45.35	45.49	45.64	45.78	0.953
0.954	44.08	44.23	44.38	44.53	44.67	44.82	44.97	45.11	45.26	45.40	45.54	45.69	45.83	0.954
0.955	44.13	44.28	44.43	44.58	44.72	44.87	45.02	45.16	45.31	45.45	45.59	45.74	45.88	0.955
0.956	44.18	44.33	44.48	44.63	44.77	44.92	45.06	45.21	45.36	45.50	45.64	45.79	45.93	0.956
0.957	44.23	44.38	44.53	44.67	44.82	44.97	45.11	45.26	45.40	45.55	45.69	45.84	45.98	0.957
0.958	44.28	44.43	44.58	44.72	44.87	45.02	45.16	45.31	45.45	45.60	45.74	45.89	46.03	0.958
0.959	44.33	44.48	44.62	44.77	44.92	45.07	45.21	45.36	45.50	45.65	45.79	45.94	46.08	0.959
0.960	44.38	44.53	44.67	44.82	44.97	45.12	45.26	45.41	45.55	45.70	45.84	45.99	46.13	0.960
0.961	44.42	44.57	44.72	44.87	45.02	45.17	45.31	45.46	45.60	45.75	45.89	46.04	46.18	0.961
0.962	44.47	44.62	44.77	44.92	45.07	45.22	45.36	45.51	45.65	45.80	45.94	46.09	46.23	0.962
0.963	44.52	44.67	44.82	44.97	45.12	45.26	45.41	45.56	45.70	45.85	45.99	46.14	46.28	0.963
0.964	44.57	44.72	44.87	45.02	45.17	45.31	45.46	45.61	45.75	45.90	46.04	46.19	46.33	0.964
0.965	44.62	44.77	44.92	45.07	45.22	45.36	45.51	45.66	45.80	45.95	46.09	46.24	46.38	0.965
0.966	44.67	44.82	44.97	45.12	45.26	45.41	45.56	45.71	45.85	46.00	46.14	46.29	46.43	0.966
0.967	44.72	44.87	45.02	45.16	45.31	45.46	45.61	45.76	45.90	46.05	46.19	46.34	46.48	0.967
0.968	44.76	44.91	45.06	45.21	45.36	45.51	45.66	45.81	45.95	46.10	46.24	46.39	46.53	0.968
0.969	44.81	44.96	45.11	45.26	45.41	45.56	45.71	45.86	46.00	46.15	46.29	46.44	46.59	0.969
0.970	44.86	45.01	45.16	45.31	45.46	45.61	45.76	45.91	46.05	46.20	46.35	46.49	46.64	0.970
0.971	44.91	45.06	45.21	45.36	45.51	45.66	45.81	45.96	46.10	46.25	46.40	46.54	46.69	0.971
0.972	44.96	45.11	45.26	45.41	45.56	45.71	45.86	46.00	46.15	46.30	46.45	46.59	46.74	0.972
0.973	45.01	45.16	45.31	45.46	45.61	45.76	45.91	46.05	46.20	46.35	46.50	46.64	46.79	0.973
0.974	45.06	45.21	45.36	45.51	45.66	45.81	45.96	46.10	46.25	46.40	46.55	46.69	46.84	0.974
0.975	45.10	45.26	45.41	45.56	45.71	45.86	46.01	46.15	46.30	46.45	46.60	46.74	46.89	0.975
0.976	45.15	45.30	45.46	45.61	45.76	45.91	46.05	46.20	46.35	46.50	46.65	46.79	46.94	0.976
0.977	45.20	45.35	45.50	45.66	45.81	45.96	46.10	46.25	46.40	46.55	46.70	46.84	46.99	0.977
0.978	45.25	45.40	45.55	45.70	45.85	46.00	46.15	46.30	46.45	46.60	46.75	46.89	47.04	0.978
0.979	45.30	45.45	45.60	45.75	45.90	46.05	46.20	46.35	46.50	46.65	46.80	46.94	47.09	0.979

**CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN MULTIPUNTO**  
**OFICINA LABORATORIO AMBIENTAL**  
**LABORATORIO AMBIENTAL DE LA GAR**



**INFORMACION DEL EQUIPO**

**A SER CALIBRADO**  
 EMPRESA: ICG COMPANIA LTDA  
 CALIBRADOR: VARI FLOW  
 MARCA: GMV  
 SERIAL/MODEL: N° CAL 00001  
 FECHA CAL: 15 de Noviembre de 2007  
 A PROX CAL: 14 de Noviembre de 2008  
 OPERADOR: Ing. E. Garcia

**ROOTS METER**

Marca: DRESSER (ROOTS METER & INST.)  
 Serial/Model: 0523569 / 3M175

$$Q_{cal} = \frac{1}{m} \sqrt{\Delta H \left( \frac{P_b}{P_{std}} \right) \left( \frac{T_{std}}{T_b} \right) - b}$$

Para Pa y T<sub>b</sub> en el lugar de operación del calibrador primario

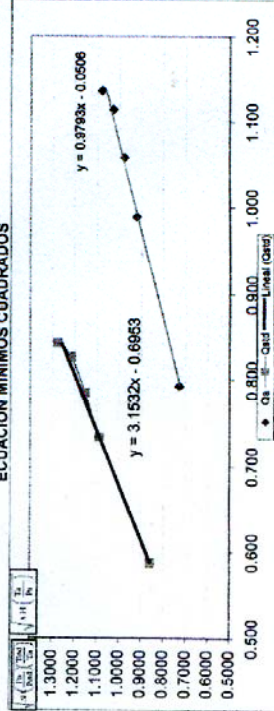
**CONDICIONES DEL SITIO DE CALIBRACION**

TEMPERATURA (T<sub>b</sub>): 21 °C  
 PRESION ATM (P<sub>b</sub>): 553.86 mmHg  
 a.s.n.m.: 2.390 m

Condición de toma de muestra	DATOS DE ENTRADA				Δ Volumen m³	Δ Volumen Final m³	Δ tiempo min	Δ Caja Root Meter mmHg	Δ Caja Filtro in H2O
	PUNTO	Volumen Inicial m³	Volumen Final m³	Q <sub>cal</sub> m³/min					
Posición 1	1	1485.9	1495.9	10.0	10.0	8.694	7.00	2.20	
Posición 2	2	1503.0	1513.0	10.0	10.0	8.830	9.00	2.00	
Posición 3	3	1517.2	1527.2	10.0	10.0	9.178	16.00	1.80	
Posición 4	4	1528.2	1538.2	10.0	10.0	9.439	37.00	1.80	
Posición 5	5	1538.0	1548.0	10.0	10.0	11.212	62.00	1.00	

Condición de toma de muestra	CONDICIONES ESTANDAR				CONDICIONES ACTUALES				ASEGURAMIENTO CALIDAD	
	Vstd m³	Qstd m³/min	√(ΔH (P <sub>b</sub> /P <sub>std</sub> )(T <sub>std</sub> /T <sub>b</sub> ))	Va m³	Qa m³/min	√(ΔH (P <sub>b</sub> /P <sub>std</sub> (T <sub>std</sub> /T <sub>b</sub> ))	Ycal	% Diferencia		
Posición 1	7.32170	0.842204	1.277228	9.87410	1.13580	1.078859	1.2566178	1.5950%		
Posición 2	7.29503	0.826136	1.217790	9.83872	1.11413	1.028632	1.2316953	1.1419%		
Posición 3	7.20167	0.784641	1.155287	9.71222	1.06817	0.975885	1.1668182	0.9973%		
Posición 4	6.82159	0.733287	1.089224	9.33451	0.98893	0.920054	1.0865434	0.2461%		
Posición 5	6.58817	0.667616	0.861107	8.88486	0.78246	0.727387	0.8187713	0.2713%		

**CURVA CALIBRACION**  
**ECUACION MINIMOS CUADRADOS**



**FORMULAS DE CALCULO**

Para el modelo de regresión lineal y = mx + b, se toma:

$$Q_{cal} = \frac{1}{m} \sqrt{\Delta H \left( \frac{P_b}{P_{std}} \right) \left( \frac{T_{std}}{T_b} \right) - b}$$

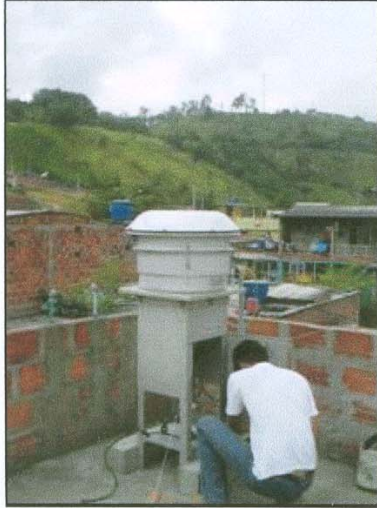
**CONDICIONES ESTANDAR**  
 Pendiente (m) = 1.5834837  
 Intercepto (b) = -0.3586626  
 Coef. Corr. (r) = 0.9953443

$$X = Q_{std} = \frac{Y_{cal}}{\Delta \text{ tiempo}}$$

**CONDICIONES CALIBRACION**  
 Pendiente (m) = 0.9792797  
 Intercepto (b) = -0.0505497  
 Coef. Corr. (r) = 0.9963443

$$X = Q_a = \frac{Y_a}{\Delta \text{ tiempo}}$$

## REGISTROS FOTOGRAFICOS



ESTACION DE MONITOREO No. 1



ESTACION DE MONITOREO No.2



ESTACION DE MONITOREO No.2, ATRÁS SE NOTA LA PLANTA.

**ANEXO C**  
**ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE**  
**DE BUCARAMANGA IBUCA**

## **INDICE DE CALIDAD DEL AIRE IBUCA**

Representa el estado de la calidad del aire en Bucaramanga y sus efectos en la salud humana.

El IBUCA es un indicador que permite establecer como se encuentra la calidad del aire en Bucaramanga con respecto a los límites locales (norma de calidad del aire) establecidos por la autoridad ambiental de la ciudad<sup>1</sup>.

El comportamiento de la calidad del aire representado por el IBUCA está asociado directamente con el grado de afectación de la salud humana.

El IBUCA es un indicador que simplifica los reportes de contaminación del aire para que pueda ser comprendido por el público en general.

### **Evaluación de los criterios que actualmente utiliza la CDMB para el cálculo del índice de calidad del aire (IBUCA).**

Para la evaluación de los criterios para el cálculo del IBUCA, primero se analizó su diseño y su presentación, y finalmente se comparó con los índices de calidad del aire desarrollados en Estados Unidos, México y Chile. De este análisis se desprende:

El IBUCA es un índice que reporta diariamente la calidad del aire, indicando el nivel de concentración de aire que se respira y su correlación con la salud.

**COMO ES CALCULADO EL IBUCA.** Este índice es calculado para los cinco principales contaminantes (Dióxido de Nitrógeno, Dióxido de Azufre, Monóxido de Carbono y Material particulado) para los cuales se ha establecido una norma de calidad de acuerdo a la legislación ambiental vigente en Colombia.

La concentración de los contaminantes criterio se mide por una red de monitoreo que guarda las concentraciones de los principales contaminantes. Estas mediciones "crudas" son sometidas a un proceso de depuración y análisis estadístico básico para luego convertirlos en valores IBUCA. El valor de este índice es calculado para cada uno de los contaminantes para cada zona donde se encuentran localizadas las estaciones, finalmente el más alto de los valores de cada zona se convierte en el índice de calidad del aire del día. A continuación se presenta como es calculado el IBUCA:

---

<sup>1</sup> [Para el cálculo del IBUCA se utilizan los límites establecidos por el DAMA en la resolución 391 de 2001](#)

### Fórmula del indicador:

Donde:

$$IBUCA = \frac{C_i}{NCA_i} * 10$$

IBUCA: Índice de Calidad del Aire del Área Metropolitana Bucaramanga.

C<sub>i</sub>: Es la concentración medida del contaminante a evaluar.

NCA<sub>i</sub>: Es la norma para cada uno de los contaminantes.

### Descripción metodológica:

El IBUCA es el valor máximo de la relación entre la concentración de cada contaminante seleccionado (Material Particulado menor a diez micras [PM<sub>10</sub>], Óxidos de Azufre [SO<sub>x</sub>], Óxidos de Nitrógeno [NO<sub>x</sub>], Monóxido de Carbono [CO] y Ozono [O<sub>3</sub>]) y la concentración máxima permitida para dicho contaminante multiplicado por 10.

CONTAMINANTE	PERIODO	NORMA	UNIDAD
Partículas Suspendidas PM <sub>10</sub>	24 horas	134	µg/m <sup>3</sup>
Óxidos de Azufre, SO <sub>x</sub>	24 horas	86	ppb
Óxidos de Nitrógeno, NO <sub>2</sub>	1 hora	95	ppb
Monóxido de Carbono, CO	1 hora	31	ppm
Oxidante Fotoquímico O <sub>3</sub>	1 hora	54	ppb

Tabla 1: Normas de Calidad del Aire utilizadas en el cálculo del IBUCA

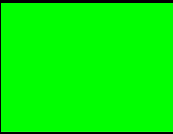




C<sub>i</sub>: Dado que las estaciones de monitoreo suministran información horaria, el valor de C<sub>i</sub> en la fórmula del IBUCA corresponde al promedio de las 24 horas para el PM10 y SO2 y el máximo horario en el día para el NO2, CO y O3.

**COMO FUNCIONA EL IBUCA.** El índice de calidad del aire se puede ver como regla que va de 0 a 10. El valor más alto del IBUCA corresponde al nivel más alto de contaminación de aire y al efecto más perjudicial en la salud. Por ejemplo, un valor IBUCA de 2.60 representa un estado regular en la calidad del aire y poca






probabilidad en el efecto de la salud. Sin embargo, ciertos grupos de personas son particularmente sensibles a efectos dañosos de algunos contaminantes es decir, que ellos son afectados a niveles más bajos que la población en general. Mientras que un valor IBUCA por encima de 10 representa una calidad del aire peligroso.

### Unidad de medida del indicador:

El indicador es adimensional y posee una escala de 0 a 10 que depende del grado de contaminación del aire. Este indicador está relacionado con la afectación que tiene la contaminación del aire sobre la salud humana. A continuación se presenta la categorización de los valores de IBUCA:

IBUCA	DESCRIPTOR	CALIFICACION EPIDEMIOLOGICA	COLOR
0 – 1.25	Bueno	La calidad de aire es considerada como satisfactoria y la afectación en la contaminación del aire es pequeña y no evidencia ningún efecto en la salud humana.	
1.26 – 2.50	Moderado	La calidad de aire es aceptable y no tiene ningún efecto sobre la población en general.	
2.51 – 7.50	Regular	Aumento de molestias en personas con padecimientos respiratorios y cardiovasculares; aparición de ligeras molestias en la población en general.	
7.51 – 10.00	Malo	Agravamiento significativo de la salud en personas con enfermedades cardíacas o respiratorias. Afectación de la población sana.	
> 10.00	Peligroso	Alto riesgo para la salud de la población. Aparición de efectos al nivel de daño.	

El IBUCA tiene asignado unos colores específicos por cada una de las categorías para facilitar su interpretación por parte de la comunidad. Además los colores ayudan a determinar rápidamente si los contaminantes en el aire están incrementando a niveles perjudiciales para la salud. A continuación se presenta el cuadro Cada color significa en que condiciones se encuentra la calidad del aire

IBUCA	DESCRIPTOR	COLOR
0 – 1.25	Bueno	
1.26 – 2.50	Moderado	
2.51 – 7.50	Regular	
7.51 – 10	Malo	
> 10	Peligroso	

### Proceso de cálculo general del indicador

Existe un IBUCA para cada una de las cinco estaciones de monitoreo instaladas en el Área Metropolitana de Bucaramanga.

De cada estación se toma la información sobre concentración de los contaminantes y se determina un valor de IBUCA para cada contaminante (PM<sub>10</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, O<sub>3</sub>). El IBUCA de la estación equivale al valor mayor de los obtenidos anteriormente.

Por ejemplo, si la concentración de los diferentes contaminantes en una estación determinada corresponde a: (C<sub>i</sub>= PM<sub>10</sub> y SO<sub>x</sub>: promedio de 24 horas), (C<sub>i</sub>= NO<sub>x</sub>, CO, O<sub>3</sub> : maximo horario en el dia)

PM10	SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	O <sub>3</sub>
108 µg/m <sup>3</sup>	12.5 ppb	43 ppb	2.7 ppm	40 ppb

Al calcular el IBUCA para cada contaminante (como resultado de dividir la concentración de cada contaminante por su respectiva norma y multiplicar por 10) se tiene:

IBUCA PM10	IBUCA SO <sub>x</sub>	IBUCA NO <sub>2</sub>	IBUCA CO	IBUCA O <sub>3</sub>
8.06	1.45	4.53	0.87	7.41

El IBUCA de la estación corresponde a 8.06 y el contaminante responsable es PM<sub>10</sub> con la clasificación epidemiológica de "malo" (color rojo).

Finalmente, el IBUCA es publicado en el sitio web de la CDMB, de tal forma que los valores y colores utilizados muestren la calidad del aire y los niveles de afectación en la salud.

CONTAMINANTE	UNIDAD	PERIODO	NACIONAL	INTERNACIONAL			
			RES 601	USA	MÉXICO	CHILE	BRASIL
Partículas Suspendidas PM <sub>10</sub>	µg/m <sup>3</sup>	24 horas	150	150	150	150	150
Óxidos de Azufre, SO <sub>x</sub>	ppb	24 horas	96	140	130	140	
Óxidos de Nitrógeno, NO <sub>2</sub>	ppb	1 hora	106	-	210	-	
Monóxido de Carbono, CO	ppm	1 hora	35	35	-	35	
Oxidante Fotoquímico O <sub>3</sub>	ppb	1 hora	61	120	110	82	

**Tabla 2: Comparación Normas de Calidad del Aire**

**ANEXO D**  
**FACTORES DE EMISIÓN**  
**CARRETERA PAVIMENTADA**

## 13.2.1 Paved Roads

### 13.2.1.1 General

Particulate emissions occur whenever vehicles travel over a paved surface such as a road or parking lot. Particulate emissions from paved roads are due to direct emissions from vehicles in the form of exhaust, brake wear and tire wear emissions and resuspension of loose material on the road surface. In general terms, resuspended particulate emissions from paved roads originate from, and result in the depletion of, the loose material present on the surface (i.e., the surface loading). In turn, that surface loading is continuously replenished by other sources. At industrial sites, surface loading is replenished by spillage of material and trackout from unpaved roads and staging areas. Figure 13.2.1-1 illustrates several transfer processes occurring on public streets.

Various field studies have found that public streets and highways, as well as roadways at industrial facilities, can be major sources of the atmospheric particulate matter within an area.<sup>1-9</sup> Of particular interest in many parts of the United States are the increased levels of emissions from public paved roads when the equilibrium between deposition and removal processes is upset. This situation can occur for various reasons, including application of granular materials for snow and ice control, mud/dirt carryout from construction activities in the area, and deposition from wind and/or water erosion of surrounding unstabilized areas. In the absence of continuous addition of fresh material (through localized trackout or application of antiskid material), paved road surface loading should reach an equilibrium value in which the amount of material resuspended matches the amount replenished. The equilibrium surface loading value depends upon numerous factors. It is believed that the most important factors are: mean speed of vehicles traveling the road; the average daily traffic (ADT); the number of lanes and ADT per lane; the fraction of heavy vehicles (buses and trucks); and the presence/absence of curbs, storm sewers and parking lanes.<sup>10</sup>

The particulate emission factors presented in the previous version of this section of AP-42, dated October 2002, implicitly included the emissions from vehicles in the form of exhaust, brake wear, and tire wear as well as resuspended road surface material. EPA included these sources in the emission factor equation for paved roads since the field testing data used to develop the equation included both the direct emissions from vehicles and emissions from resuspension of road dust.

This version of the paved road emission factor equation only estimates particulate emissions from resuspended road surface material<sup>28</sup>. The particulate emissions from vehicle exhaust, brake wear, and tire wear are now estimated separately using EPA's MOBILE6.2<sup>27</sup>. This approach eliminates the possibility of double counting emissions. Double counting results when employing the previous version of the emission factor equation in this section and MOBILE6.2 to estimate particulate emissions from vehicle traffic on paved roads. It also incorporates the decrease in exhaust emissions that has occurred since the paved road emission factor equation was developed. The previous version of the paved road emission factor equation includes estimates of emissions from exhaust, brake wear, and tire wear based on emission rates for vehicles in the 1980 calendar year fleet. The amount of PM released from vehicle exhaust has decreased since 1980 due to lower new vehicle emission standards and changes in fuel characteristics.

### 13.2.1.2 Emissions And Correction Parameters

Dust emissions from paved roads have been found to vary with what is termed the "silt loading" present on the road surface as well as the average weight of vehicles traveling the road. The term silt loading (sL) refers to the mass of silt-size material (equal to or less than 75 micrometers [ $\mu\text{m}$ ] in physical diameter) per unit area of the travel surface. The total road surface dust loading consists of loose material that can be collected by broom sweeping and vacuuming of the traveled portion of the paved road. The silt fraction is determined by measuring the proportion of the loose dry surface dust that passes through a 200-mesh screen, using the ASTM-C-136 method. Silt loading is the product of the silt fraction and the total loading, and is abbreviated "sL". Additional details on the sampling and analysis of such material are provided in AP-42 Appendices C.1 and C.2.

The surface sL provides a reasonable means of characterizing seasonal variability in a paved road emission inventory. In many areas of the country, road surface loadings<sup>11-21</sup> are heaviest during the late winter and early spring months when the residual loading from snow/ice controls is greatest. As noted earlier, once replenishment of fresh material is eliminated, the road surface loading can be expected to reach an equilibrium value, which is substantially lower than the late winter/early spring values.

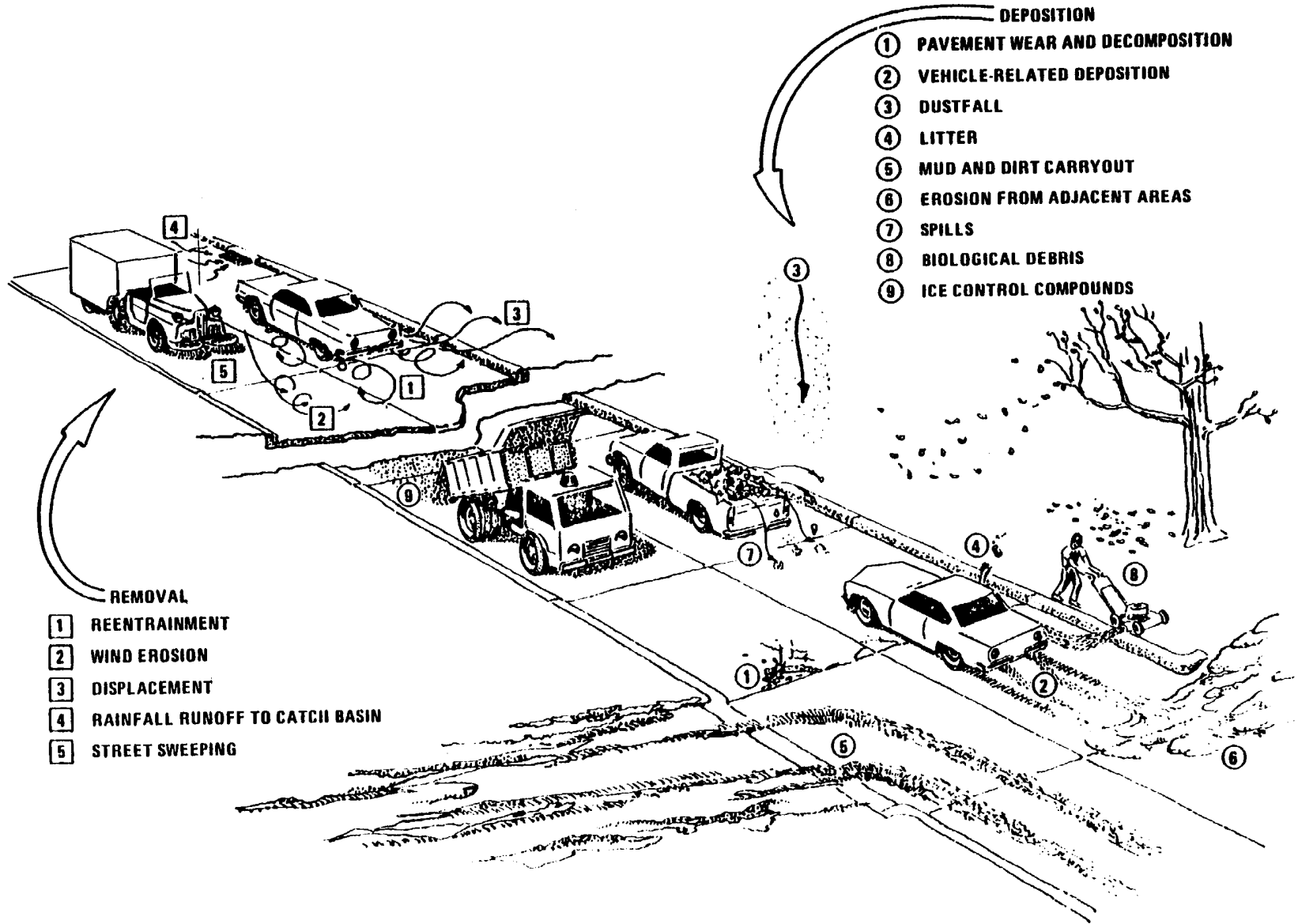


Figure 13.2.1-1. Deposition and removal processes.

### 13.2.1.3 Predictive Emission Factor Equations<sup>10</sup>

The quantity of particulate emissions from resuspension of loose material on the road surface due to vehicle travel on a dry paved road may be estimated using the following empirical expression:

$$E = k \left( \frac{sL}{2} \right)^{0.65} \times \left( \frac{W}{3} \right)^{1.5} - C \quad (1)$$

where:  $E$  = particulate emission factor (having units matching the units of  $k$ ),  
 $k$  = particle size multiplier for particle size range and units of interest (see below),  
 $sL$  = road surface silt loading (grams per square meter) (g/m<sup>2</sup>),  
 $W$  = average weight (tons) of the vehicles traveling the road, and  
 $C$  = emission factor for 1980's vehicle fleet exhaust, brake wear and tire wear.

It is important to note that Equation 1 calls for the average weight of all vehicles traveling the road. For example, if 99 percent of traffic on the road are 2 ton cars/trucks while the remaining 1 percent consists of 20 ton trucks, then the mean weight "W" is 2.2 tons. More specifically, Equation 1 is *not* intended to be used to calculate a separate emission factor for each vehicle weight class. Instead, only one emission factor should be calculated to represent the "fleet" average weight of all vehicles traveling the road.

The particle size multiplier ( $k$ ) above varies with aerodynamic size range as shown in Table 13.2.1-1. To determine particulate emissions for a specific particle size range, use the appropriate value of  $k$  shown in Table 13.2.1-1.

The emission factors for the exhaust, brake wear and tire wear of a 1980's vehicle fleet ( $C$ ) was obtained from EPA's MOBILE6.2 model<sup>28</sup>. The emission factor also varies with aerodynamic size range as shown in Table 13.2.1-2.

Table 13.2-1.1. PARTICLE SIZE MULTIPLIERS FOR PAVED ROAD EQUATION

Size range <sup>a</sup>	Particle Size Multiplier $k^b$		
	g/VKT	g/VMT	lb/VMT
PM-2.5 <sup>c</sup>	0.66	1.1	0.0024
PM-10	4.6	7.3	0.016
PM-15	5.5	9.0	0.020
PM-30 <sup>d</sup>	24	38	0.082

<sup>a</sup> Refers to airborne particulate matter (PM-x) with an aerodynamic diameter equal to or less than x micrometers.

<sup>b</sup> Units shown are grams per vehicle kilometer traveled (g/VKT), grams per vehicle mile traveled (g/VMT), and pounds per vehicle mile traveled (lb/VMT). The multiplier  $k$  includes unit conversions to produce emission factors in the units shown for the indicated size range from the mixed units required in Equation 1.



<sup>c</sup> The revised  $k$ -factors were based on the ratio of PM<sub>2.5</sub>:PM<sub>10</sub> in Table 1 of Reference 22 and are found in Table 2 of Reference 22. However, this ratio may not be used directly to estimate PM<sub>2.5</sub> from PM<sub>10</sub> emissions. Equation (1) must be computed separately for each size fraction because the relationship between PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> emissions is not a simple ratio (i.e., the constant "C" in Equation (1) is not multiplied by the  $k$ -factor).

<sup>d</sup> PM-30 is sometimes termed "suspendable particulate" (SP) and is often used as a surrogate for TSP.

Table 13.2.1-2. EMISSION FACTOR FOR 1980'S VEHICLE FLEET  
EXHAUST, BRAKE WEAR AND TIRE WEAR

Particle Size Range <sup>a</sup>	C, Emission Factor for Exhaust, Brake Wear and Tire Wear <sup>b</sup>		
	g/VMT	g/VKT	lb/VMT
PM <sub>2.5</sub>	0.1617	0.1005	0.00036
PM <sub>10</sub>	0.2119	0.1317	0.00047
PM <sub>15</sub>	0.2119	0.1317	0.00047
PM <sub>30</sub> <sup>c</sup>	0.2119	0.1317	0.00047

- <sup>a</sup> Refers to airborne particulate matter (PM-x) with an aerodynamic diameter equal to or less than x micrometers.
- <sup>b</sup> Units shown are grams per vehicle kilometer traveled (g/VKT), grams per vehicle mile traveled (g/VMT), and pounds per vehicle mile traveled (lb/VMT).
- <sup>c</sup> PM-30 is sometimes termed "suspendable particulate" (SP) and is often used as a surrogate for TSP.

Equation 1 is based on a regression analysis of numerous emission tests, including 65 tests for PM-10.<sup>10</sup> Sources tested include public paved roads, as well as controlled and uncontrolled industrial paved roads. All sources tested were of freely flowing vehicles traveling at constant speed on relatively level roads. No tests of "stop-and-go" traffic or vehicles under load were available for inclusion in the data base. The equations retain the quality rating of A (B for PM-2.5), if applied within the range of source conditions that were tested in developing the equation as follows:

Silt loading:	0.03 - 400 g/m <sup>2</sup> 0.04 - 570 grains/square foot (ft <sup>2</sup> )
Mean vehicle weight:	1.8 - 38 megagrams (Mg) 2.0 - 42 tons
Mean vehicle speed:	16 - 88 kilometers per hour (kph) 10 - 55 miles per hour (mph)

Note: There may be situations where low silt loading and/or low average weight will yield calculated negative emissions from equation 1. If this occurs, the emissions calculated from equation 1 should be set to zero.

Users are cautioned that application of equation 1 outside of the range of variables and operating conditions specified above, e.g., application to roadways or road networks with speeds below 10 mph and with stop-and-go traffic, will result in emission estimates with a higher level

of uncertainty. In these situations, users are encouraged to consider alternative methods that are equally or more plausible in light of local emissions data and/or ambient concentration or compositional data.

To retain the quality rating for the emission factor equation when it is applied to a specific paved road, it is necessary that reliable correction parameter values for the specific road in question be determined. With the exception of limited access roadways, which are difficult to sample, the collection and use of site-specific silt loading (sL) data for public paved road emission inventories are strongly recommended. The field and laboratory procedures for determining surface material silt content and surface dust loading are summarized in Appendices C.1 and C.2. In the event that site-specific values cannot be obtained, an appropriate value for a paved public road may be selected from the values in Table 13.2.1-3, but the quality rating of the equation should be reduced by 2 levels. Also, recall that Equation 1 refers to emissions due to freely flowing (not stop-and-go) traffic at constant speed on level roads.

Equation 1 may be extrapolated to average uncontrolled conditions (but including natural mitigation) under the simplifying assumption that annual (or other long-term) average emissions are inversely proportional to the frequency of measurable (> 0.254 mm [ 0.01 inch]) precipitation by application of a precipitation correction term. The precipitation correction term can be applied on a daily or an hourly basis <sup>26</sup>.

For the daily basis, Equation 1 becomes:

$$E_{ext} = \left[ k \left( \frac{sL}{2} \right)^{0.65} \left( \frac{W}{3} \right)^{1.5} - C \right] \left( 1 - \frac{P}{4N} \right) \quad (2)$$

where  $k$ ,  $sL$ ,  $W$ , and  $C$  are as defined in Equation 1 and

- $E_{ext}$  = annual or other long-term average emission factor in the same units as  $k$ ,
- $P$  = number of "wet" days with at least 0.254 mm (0.01 in) of precipitation during the averaging period, and
- $N$  = number of days in the averaging period (e.g., 365 for annual, 91 for seasonal, 30 for monthly).

Note that the assumption leading to Equation 2 is based on analogy with the approach used to develop long-term average unpaved road emission factors in Section 13.2.2. However, Equation 2 above incorporates an additional factor of "4" in the denominator to account for the fact that paved roads dry more quickly than unpaved roads and that the precipitation may not occur over the complete 24-hour day.

For the hourly basis, equation 1 becomes:

$$E_{ext} = \left[ k \left( \frac{sL}{2} \right)^{0.65} \left( \frac{W}{3} \right)^{1.5} - C \right] \left( 1 - \frac{1.2P}{N} \right) \quad (3)$$

where  $k$ ,  $sL$ , and  $W$ , and  $C$  are as defined in Equation 1 and

- $E_{ext}$  = annual or other long-term average emission factor in the same units as  $k$ ,
- $P$  = number of hours with at least 0.254 mm (0.01 in) of precipitation during the averaging period, and
- $N$  = number of hours in the averaging period (e.g., 8760 for annual, 2124 for season 720 for monthly).

Note: In the hourly moisture correction term  $(1-1.2P/N)$  for equation 3, the 1.2 multiplier is applied to account for the residual mitigative effect of moisture. For most applications, this equation will produce satisfactory results. However, if the time interval for which the equation is applied is short, e.g., for one hour or one day, the application of this multiplier makes it possible for the moisture correction term to become negative. This will result in calculated negative emissions which is not realistic. Users should expand the time interval to include sufficient "dry" hours such that negative emissions are not calculated. For the special case where this equation is used to calculate emissions on an hour by hour basis, such as would be done in some emissions modeling situations, the moisture correction term should be modified so that the moisture correction "credit" is applied to the first hours following cessation of precipitation. In this special case, it is suggested that this 20% "credit" be applied on a basis of one hour credit for each hour of precipitation up to a maximum of 12 hours.

Note that the assumption leading to Equation 3 is based on analogy with the approach used to develop long-term average unpaved road emission factors in Section 13.2.2.

Figure 13.2.1-2 presents the geographical distribution of "wet" days on an annual basis for the United States. Maps showing this information on a monthly basis are available in the *Climatic Atlas of the United States*<sup>23</sup>. Alternative sources include other Department of Commerce publications (such as local climatological data summaries). The National Climatic Data Center (NCDC) offers several products that provide hourly precipitation data. In particular, NCDC offers *Solar and Meteorological Surface Observation Network 1961-1990* (SAMSON) CD-ROM, which contains 30 years worth of hourly meteorological data for first-order National Weather Service locations. Whatever meteorological data are used, the source of that data and the averaging period should be clearly specified.

It is emphasized that the simple assumption underlying Equations 2 and 3 has not been verified in any rigorous manner. For that reason, the quality ratings for Equations 2 and 3 should be downgraded one letter from the rating that would be applied to Equation 1.

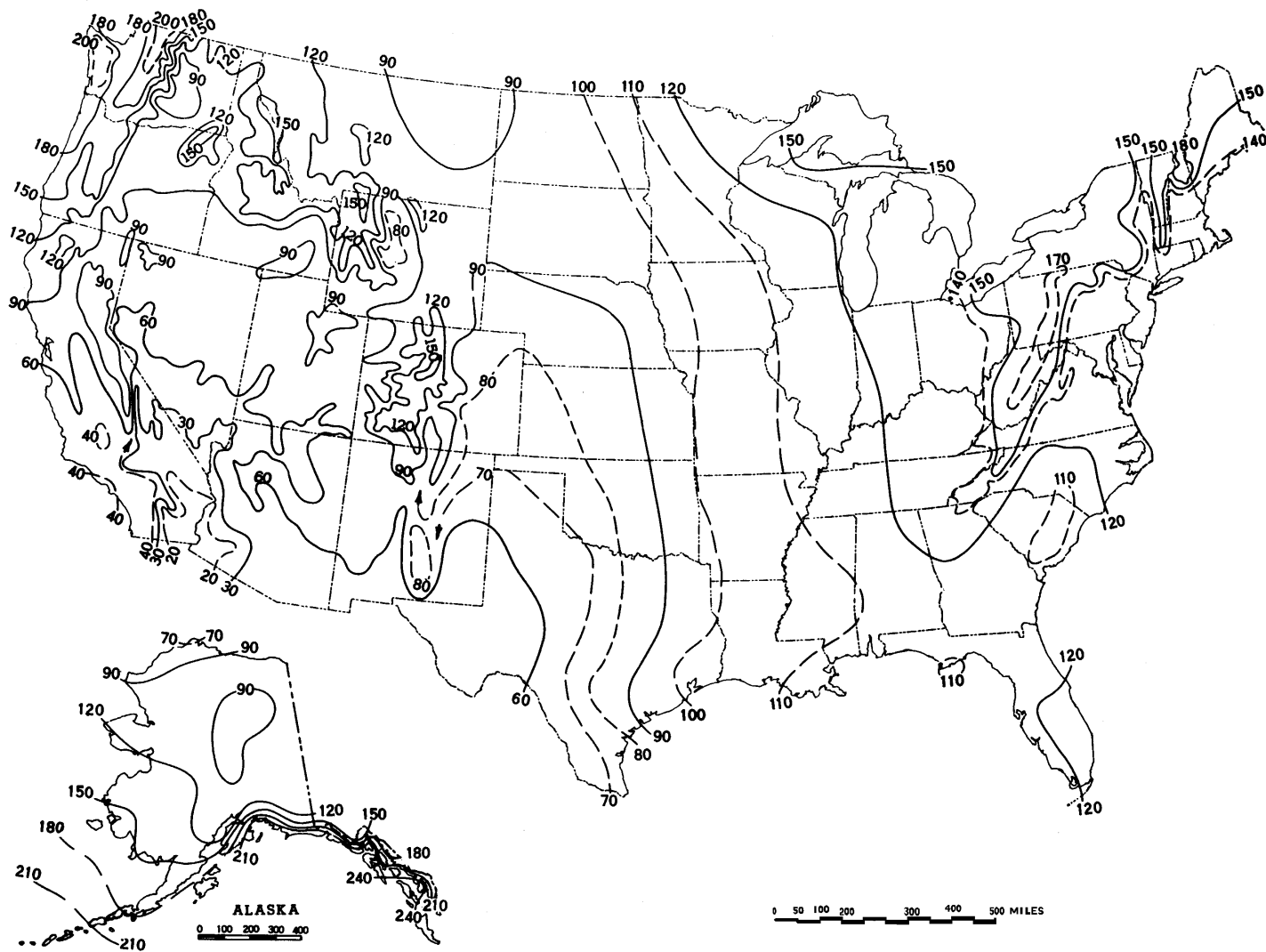


Figure 13.2.1-2. Mean number of days with 0.01 inch or more of precipitation in the United States.

Table 13.2.1-3 presents recommended default silt loadings for normal baseline conditions and for wintertime baseline conditions in areas that experience frozen precipitation with periodic application of antiskid material<sup>24</sup>. The winter baseline is represented as a multiple of the non-winter baseline, depending on the ADT value for the road in question. As shown, a multiplier of 4 is applied for low volume roads (< 500 ADT) to obtain a wintertime baseline silt loading of  $4 \times 0.6 = 2.4 \text{ g/m}^2$ .

Table 13.2.1-3. Ubiquitous Silt Loading Default Values with Hot Spot Contributions from Anti-Skid Abrasives ( $\text{g/m}^2$ )

ADT Category	< 500	500-5,000	5,000-10,000	> 10,000
Ubiquitous Baseline $\text{g/m}^2$	0.6	0.2	0.06	0.03 0.015 limited access
Ubiquitous Winter Baseline Multiplier during months with frozen precipitation	X4	X3	X2	X1
Initial peak additive contribution from application of antiskid abrasive ( $\text{g/m}^2$ )	2	2	2	2
Days to return to baseline conditions (assume linear decay)	7	3	1	0.5

It is suggested that an additional (but temporary) silt loading contribution of  $2 \text{ g/m}^2$  occurs with each application of antiskid abrasive for snow/ice control. This was determined based on a typical application rate of 500 lb per lane mile and an initial silt content of 1 % silt content. Ordinary rock salt and other chemical deicers add little to the silt loading, because most of the chemical dissolves during the snow/ice melting process.

To adjust the baseline silt loadings for mud/dirt trackout, the number of trackout points is required. It is recommended that in calculating PM-10 emissions, six additional miles of road be added for each active trackout point from an active construction site, to the paved road mileage of the specified category within the county. In calculating PM-2.5 emissions, it is recommended that three additional miles of road be added for each trackout point from an active construction site.

It is suggested the number of trackout points for activities other than road and building construction areas be related to land use. For example, in rural farming areas, each mile of paved road would have a specified number of trackout points at intersections with unpaved roads. This value could be estimated from the unpaved road density ( $\text{mi/sq. mi.}$ ).

The use of a default value from Table 13.2.1-3 should be expected to yield only an order-of-magnitude estimate of the emission factor. Public paved road silt loadings are dependent

upon: traffic characteristics (speed, ADT, and fraction of heavy vehicles); road characteristics (curbs, number of lanes, parking lanes); local land use (agriculture, new residential construction) and regional/seasonal factors (snow/ice controls, wind blown dust). As a result, the collection and use of site-specific silt loading data is highly recommended. In the event that default silt loading values are used, the quality ratings for the equation should be downgraded 2 levels.

Limited access roadways pose severe logistical difficulties in terms of surface sampling, and few silt loading data are available for such roads. Nevertheless, the available data do not suggest great variation in silt loading for limited access roadways from one part of the country to another. For annual conditions, a default value of  $0.015 \text{ g/m}^2$  is recommended for limited access roadways.<sup>9,22</sup> Even fewer of the available data correspond to worst-case situations, and elevated loadings are observed to be quickly depleted because of high traffic speeds and high ADT rates. A default value of  $0.2 \text{ g/m}^2$  is recommended for short periods of time following application of snow/ice controls to limited access roads.<sup>22</sup>

The limited data on silt loading values for industrial roads have shown as much variability as public roads. Because of the variations of traffic conditions and the use of preventive mitigative controls, the data probably do not reflect the full extent of the potential variation in silt loading on industrial roads. However, the collection of site specific silt loading data from industrial roads is easier and safer than for public roads. Therefore, the collection and use of site-specific silt loading data is preferred and is highly recommended. In the event that site-specific values cannot be obtained, an appropriate value for an industrial road may be selected from the mean values given in Table 13.2.1-4, but the quality rating of the equation should be reduced by 2 levels.

Table 13.2.1-4 (Metric And English Units). TYPICAL SILT CONTENT AND LOADING VALUES FOR PAVED ROADS AT INDUSTRIAL FACILITIES <sup>a</sup>

Industry	No. Of Sites	No. Of Samples	Silt Content (%)		No. Of Travel Lanes	Total Loading x 10 <sup>-3</sup>			Silt Loading (g/m <sup>2</sup> )	
			Range	Mean		Range	Mean	Units <sup>b</sup>	Range	Mean
Copper smelting	1	3	15.4-21.7	19.0	2	12.9-19.5 45.8-69.2	15.9 55.4	kg/km lb/mi	188-400	292
Iron and steel production	9	48	1.1-35.7	12.5	2	0.006-4.77 0.020-16.9	0.495 1.75	kg/km lb/mi	0.09-79	9.7
Asphalt batching	1	3	2.6-4.6	3.3	1	12.1-18.0 43.0-64.0	14.9 52.8	kg/km lb/mi	76-193	120
Concrete batching	1	3	5.2-6.0	5.5	2	1.4-1.8 5.0-6.4	1.7 5.9	kg/km lb/mi	11-12	12
Sand and gravel processing	1	3	6.4-7.9	7.1	1	2.8-5.5 9.9-19.4	3.8 13.3	kg/km lb/mi	53-95	70
Municipal solid waste landfill	2	7	—	—	2	—	—	—	1.1-32.0	7.4
Quarry	1	6	—	—	2	—	—	—	2.4-14	8.2

<sup>a</sup> References 1-2,5-6,11-13. Values represent samples collected from *industrial* roads. Public road silt loading values are presented in Table-13.2.1-2. Dashes indicate information not available.

<sup>b</sup> Multiply entries by 1000 to obtain stated units; kilograms per kilometer (kg/km) and pounds per mile (lb/mi).

#### 13.2.1.4 Controls<sup>6,25</sup>

Because of the importance of the silt loading, control techniques for paved roads attempt either to prevent material from being deposited onto the surface (preventive controls) or to remove from the travel lanes any material that has been deposited (mitigative controls). Covering of loads in trucks, and the paving of access areas to unpaved lots or construction sites, are examples of preventive measures. Examples of mitigative controls include vacuum sweeping, water flushing, and broom sweeping and flushing. Actual control efficiencies for any of these techniques can be highly variable. Locally measured silt loadings before and after the application of controls is the preferred method to evaluate controls. It is particularly important to note that street sweeping of gutters and curb areas may actually increase the silt loading on the traveled portion of the road. Redistribution of loose material onto the travel lanes will actually produce a short-term increase in the emissions.

In general, preventive controls are usually more cost effective than mitigative controls. The cost-effectiveness of mitigative controls falls off dramatically as the size of an area to be treated increases. The cost-effectiveness of mitigative measures is also unfavorable if only a short period of time is required for the road to return to equilibrium silt loading condition. That is to say, the number and length of public roads within most areas of interest preclude any widespread and routine use of mitigative controls. On the other hand, because of the more limited scope of roads at an industrial site, mitigative measures may be used quite successfully (especially in situations where truck spillage occurs). Note, however, that public agencies could make effective use of mitigative controls to remove sand/salt from roads after the winter ends.

Because available controls will affect the silt loading, controlled emission factors may be obtained by substituting controlled silt loading values into the equation. (Emission factors from controlled industrial roads were used in the development of the equation.) The collection of surface loading samples from treated, as well as baseline (untreated), roads provides a means to track effectiveness of the controls over time.

#### 13.2.1.5 Changes since Fifth Edition

The following changes were made since the publication of the Fifth Edition of AP-42:

- 1) The particle size multiplier was reduced by approximately 55% as a result of emission testing specifically to evaluate the PM-2.5 component of the emissions.
- 2) Default silt loading values were included in Table 13.2.1-2 replacing the Tables and Figures containing silt loading statistical information.
- 3) Editorial changes within the text were made indicating the possible causes of variations in the silt loading between roads within and among different locations. The uncertainty of using the default silt loading value was discussed.

- 4) Section 13.2.1.1 was revised to clarify the role of dust loading in resuspension. Additional minor text changes were made.
- 5) Equations 2 and 3, Figure 13.2.1-2, and text were added to incorporate natural mitigation into annual or other long-term average emission factors.
- 6) The emission factor equation was adjusted to remove the component of particulate emissions from exhaust, brake wear, and tire wear. The parameter *C* in the new equation varies with aerodynamic size range of the particulate matter. Table 13.2.1-2 was added to present the new coefficients.
- 7) The default silt loading values in Table 13.2.1-3 were revised to incorporate the results from a recent analysis of silt loading data.
- 8) The PM-2.5 particle size multiplier was reduced by 40% as the result of wind tunnel studies of a variety of dust emitting surface materials.
- 9) References were rearranged and renumbered.

#### References For Section 13.2.1

1. D. R. Dunbar, *Resuspension Of Particulate Matter*, EPA-450/2-76-031, U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, March 1976.
2. R. Bohn, *et al.*, *Fugitive Emissions From Integrated Iron And Steel Plants*, EPA-600/2-78-050, U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, March 1978.
3. C. Cowherd, Jr., *et al.*, *Iron And Steel Plant Open Dust Source Fugitive Emission Evaluation*, EPA-600/2-79-103, U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, May 1979.
4. C. Cowherd, Jr., *et al.*, *Quantification Of Dust Entrainment From Paved Roadways*, EPA-450/3-77-027, U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, July 1977.
5. *Size Specific Particulate Emission Factors For Uncontrolled Industrial And Rural Roads*, EPA Contract No. 68-02-3158, Midwest Research Institute, Kansas City, MO, September 1983.
6. T. Cuscino, Jr., *et al.*, *Iron And Steel Plant Open Source Fugitive Emission Control Evaluation*, EPA-600/2-83-110, U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, October 1983.

7. J. P. Reider, *Size-specific Particulate Emission Factors For Uncontrolled Industrial And Rural Roads*, EPA Contract 68-02-3158, Midwest Research Institute, Kansas City, MO, September 1983.
8. C. Cowherd, Jr., and P. J. Englehart, *Paved Road Particulate Emissions*, EPA-600/7-84-077, U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, July 1984.
9. C. Cowherd, Jr., and P. J. Englehart, *Size Specific Particulate Emission Factors For Industrial And Rural Roads*, EPA-600/7-85-038, U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, September 1985.
10. *Emission Factor Documentation For AP-42, Sections 11.2.5 and 11.2.6 — Paved Roads*, EPA Contract No. 68-D0-0123, Midwest Research Institute, Kansas City, MO, March 1993.
11. *Evaluation Of Open Dust Sources In The Vicinity Of Buffalo, New York*, EPA Contract No. 68-02-2545, Midwest Research Institute, Kansas City, MO, March 1979.
12. *PM-10 Emission Inventory Of Landfills In The Lake Calumet Area*, EPA Contract No. 68-02-3891, Midwest Research Institute, Kansas City, MO, September 1987.
13. *Chicago Area Particulate Matter Emission Inventory — Sampling And Analysis*, Contract No. 68-02-4395, Midwest Research Institute, Kansas City, MO, May 1988.
14. *Montana Street Sampling Data*, Montana Department Of Health And Environmental Sciences, Helena, MT, July 1992.
15. *Street Sanding Emissions And Control Study*, PEI Associates, Inc., Cincinnati, OH, October 1989.
16. *Evaluation Of PM-10 Emission Factors For Paved Streets*, Harding Lawson Associates, Denver, CO, October 1991.
17. *Street Sanding Emissions And Control Study*, RTP Environmental Associates, Inc., Denver, CO, July 1990.
18. *Post-storm Measurement Results — Salt Lake County Road Dust Silt Loading Winter 1991/92 Measurement Program*, Aerovironment, Inc., Monrovia, CA, June 1992.
19. Written communication from Harold Glasser, Department of Health, Clark County (NV).
20. *PM-10 Emissions Inventory Data For The Maricopa And Pima Planning Areas*, EPA Contract No. 68-02-3888, Engineering-Science, Pasadena, CA, January 1987.
21. *Characterization Of PM-10 Emissions From Antiskid Materials Applied To Ice- And Snow-Covered Roadways*, EPA Contract No. 68-D0-0137, Midwest Research Institute, Kansas City, MO, October 1992.

22. C. Cowherd, *Background Document for Revisions to Fine Fraction Ratios Used for AP-42 Fugitive Dust Emission Factors*. Prepared by Midwest Research Institute for Western Governors Association, Western Regional Air Partnership, Denver, CO, February 1, 2006.
23. *Climatic Atlas Of The United States*, U.S. Department of Commerce, Washington, D.C., June 1968.
24. C. Cowherd, Jr., *et al.*, *Improved Activity Levels for National Emission Inventories of Fugitive Dust from Paved and Unpaved Roads*, Presented at the 11<sup>th</sup> International Emission Inventory Conference, Atlanta, Georgia, April 2002.
25. C. Cowherd, Jr., *et al.*, *Control Of Open Fugitive Dust Sources*, EPA-450/3-88-008, U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, September 1988.
26. Written communication (Technical Memorandum) from G. Muleski, Midwest Research Institute, Kansas City, MO, to B. Kuykendal, U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, September 27, 2001.
27. EPA, 2002b. *MOBILE6 User Guide*, United States Environmental Protection Agency, Office of Transportation and Air Quality. EPA420-R-02-028, October 2002.
28. Written communication (Technical Memorandum) from P. Hemmer, E.H. Pechan & Associates, Inc., Durham, NC to B. Kuykendal, U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, August, 21, 2003.

**ANEXO E**  
**FACTORES DE EMISIÓN**  
**CARRETERA NO PAVIMENTADA**

## 13.2.2 Unpaved Roads

### 13.2.2.1 General

When a vehicle travels an unpaved road, the force of the wheels on the road surface causes pulverization of surface material. Particles are lifted and dropped from the rolling wheels, and the road surface is exposed to strong air currents in turbulent shear with the surface. The turbulent wake behind the vehicle continues to act on the road surface after the vehicle has passed.

The particulate emission factors presented in the previous draft version of this section of AP-42, dated October 2001, implicitly included the emissions from vehicles in the form of exhaust, brake wear, and tire wear as well as resuspended road surface material<sup>25</sup>. EPA included these sources in the emission factor equation for unpaved public roads (equation 1b in this section) since the field testing data used to develop the equation included both the direct emissions from vehicles and emissions from resuspension of road dust.

This version of the unpaved public road emission factor equation only estimates particulate emissions from resuspended road surface material<sup>23, 26</sup>. The particulate emissions from vehicle exhaust, brake wear, and tire wear are now estimated separately using EPA's MOBILE6.2<sup>24</sup>. This approach eliminates the possibility of double counting emissions. Double counting results when employing the previous version of the emission factor equation in this section and MOBILE6.2 to estimate particulate emissions from vehicle traffic on unpaved public roads. It also incorporates the decrease in exhaust emissions that has occurred since the unpaved public road emission factor equation was developed. The previous version of the unpaved public road emission factor equation includes estimates of emissions from exhaust, brake wear, and tire wear based on emission rates for vehicles in the 1980 calendar year fleet. The amount of PM released from vehicle exhaust has decreased since 1980 due to lower new vehicle emission standards and changes in fuel characteristics.

### 13.2.2.2 Emissions Calculation And Correction Parameters<sup>1-6</sup>

The quantity of dust emissions from a given segment of unpaved road varies linearly with the volume of traffic. Field investigations also have shown that emissions depend on source parameters that characterize the condition of a particular road and the associated vehicle traffic. Characterization of these source parameters allow for "correction" of emission estimates to specific road and traffic conditions present on public and industrial roadways.

Dust emissions from unpaved roads have been found to vary directly with the fraction of silt (particles smaller than 75 micrometers [ $\mu\text{m}$ ] in diameter) in the road surface materials.<sup>1</sup> The silt fraction is determined by measuring the proportion of loose dry surface dust that passes a 200-mesh screen, using the ASTM-C-136 method. A summary of this method is contained in Appendix C of AP-42. Table 13.2.2-1 summarizes measured silt values for industrial unpaved roads. Table 13.2.2-2 summarizes measured silt values for public unpaved roads. It should be noted that the ranges of silt content vary over two orders of magnitude. Therefore, the use of data from this table can potentially introduce considerable error. Use of this data is strongly discouraged when it is feasible to obtain locally gathered data.

Since the silt content of a rural dirt road will vary with geographic location, it should be measured for use in projecting emissions. As a conservative approximation, the silt content of the parent soil in the area can be used. Tests, however, show that road silt content is normally lower than in the surrounding parent soil, because the fines are continually removed by the vehicle traffic, leaving a higher percentage of coarse particles.

Other variables are important in addition to the silt content of the road surface material. For example, at industrial sites, where haul trucks and other heavy equipment are common, emissions are highly correlated with vehicle weight. On the other hand, there is far less variability in the weights of cars and pickup trucks that commonly travel publicly accessible unpaved roads throughout the United States. For those roads, the moisture content of the road surface material may be more dominant in determining differences in emission levels between, for example a hot, desert environment and a cool, moist location.

The PM-10 and TSP emission factors presented below are the outcomes from stepwise linear regressions of field emission test results of vehicles traveling over unpaved surfaces. Due to a limited amount of information available for PM-2.5, the expression for that particle size range has been scaled against the result for PM-10. Consequently, the quality rating for the PM-2.5 factor is lower than that for the PM-10 expression.

Table 13.2.2-1. TYPICAL SILT CONTENT VALUES OF SURFACE MATERIAL ON INDUSTRIAL UNPAVED ROADS<sup>a</sup>

Industry	Road Use Or Surface Material	Plant Sites	No. Of Samples	Silt Content (%)	
				Range	Mean
Copper smelting	Plant road	1	3	16 - 19	17
Iron and steel production	Plant road	19	135	0.2 - 19	6.0
Sand and gravel processing	Plant road	1	3	4.1 - 6.0	4.8
	Material storage area	1	1	-	7.1
Stone quarrying and processing	Plant road	2	10	2.4 - 16	10
	Haul road to/from pit	4	20	5.0-15	8.3
Taconite mining and processing	Service road	1	8	2.4 - 7.1	4.3
	Haul road to/from pit	1	12	3.9 - 9.7	5.8
Western surface coal mining	Haul road to/from pit	3	21	2.8 - 18	8.4
	Plant road	2	2	4.9 - 5.3	5.1
	Scraper route	3	10	7.2 - 25	17
	Haul road (freshly graded)	2	5	18 - 29	24
Construction sites	Scraper routes	7	20	0.56-23	8.5
Lumber sawmills	Log yards	2	2	4.8-12	8.4
Municipal solid waste landfills	Disposal routes	4	20	2.2 - 21	6.4

<sup>a</sup>References 1,5-15.

The following empirical expressions may be used to estimate the quantity in pounds (lb) of size-specific particulate emissions from an unpaved road, per vehicle mile traveled (VMT):

For vehicles traveling on unpaved surfaces at industrial sites, emissions are estimated from the following equation:

$$E = k (s/12)^a(W/3)^b \quad (1a)$$

and, for vehicles traveling on publicly accessible roads, dominated by light duty vehicles, emissions may be estimated from the following:

$$E = \frac{k (s/12)^a(S/30)^d}{(M/0.5)^c} - C \quad (1b)$$

where  $k$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  and  $d$  are empirical constants (Reference 6) given below and

$E$  = size-specific emission factor (lb/VMT)

$s$  = surface material silt content (%)

$W$  = mean vehicle weight (tons)

$M$  = surface material moisture content (%)

$S$  = mean vehicle speed (mph)

$C$  = emission factor for 1980's vehicle fleet exhaust, brake wear and tire wear.

The source characteristics  $s$ ,  $W$  and  $M$  are referred to as correction parameters for adjusting the emission estimates to local conditions. The metric conversion from lb/VMT to grams (g) per vehicle kilometer traveled (VKT) is as follows:

$$1 \text{ lb/VMT} = 281.9 \text{ g/VKT}$$

The constants for Equations 1a and 1b based on the stated aerodynamic particle sizes are shown in Tables 13.2.2-2 and 13.2.2-4. The PM-2.5 particle size multipliers ( $k$ -factors) are taken from Reference 27.

Table 13.2.2-2. CONSTANTS FOR EQUATIONS 1a AND 1b

Constant	Industrial Roads (Equation 1a)			Public Roads (Equation 1b)		
	PM-2.5	PM-10	PM-30*	PM-2.5	PM-10	PM-30*
k (lb/VMT)	0.15	1.5	4.9	0.18	1.8	6.0
a	0.9	0.9	0.7	1	1	1
b	0.45	0.45	0.45	-	-	-
c	-	-	-	0.2	0.2	0.3
d	-	-	-	0.5	0.5	0.3
Quality Rating	B	B	B	B	B	B

\*Assumed equivalent to total suspended particulate matter (TSP)

“-“ = not used in the emission factor equation

Table 13.2.2-2 also contains the quality ratings for the various size-specific versions of Equation 1a and 1b. The equation retains the assigned quality rating, if applied within the ranges of source conditions, shown in Table 13.2.2-3, that were tested in developing the equation:

Table 13.2.2-3. RANGE OF SOURCE CONDITIONS USED IN DEVELOPING EQUATION 1a AND 1b

Emission Factor	Surface Silt Content, %	Mean Vehicle Weight		Mean Vehicle Speed		Mean No. of Wheels	Surface Moisture Content, %
		Mg	ton	km/hr	mph		
Industrial Roads (Equation 1a)	1.8-25.2	1.8-260	2-290	8-69	5-43	4-17 <sup>a</sup>	0.03-13
Public Roads (Equation 1b)	1.8-35	1.4-2.7	1.5-3	16-88	10-55	4-4.8	0.03-13

<sup>a</sup> See discussion in text.

As noted earlier, the models presented as Equations 1a and 1b were developed from tests of traffic on unpaved surfaces. Unpaved roads have a hard, generally nonporous surface that usually dries quickly after a rainfall or watering, because of traffic-enhanced natural evaporation. (Factors influencing how fast a road dries are discussed in Section 13.2.2.3, below.) The quality ratings given above pertain to the mid-range of the measured source conditions for the equation. A higher mean vehicle weight and a higher than normal traffic rate may be justified when performing a worst-case analysis of emissions from unpaved roads.

The emission factors for the exhaust, brake wear and tire wear of a 1980's vehicle fleet (C) was obtained from EPA's MOBILE6.2 model <sup>23</sup>. The emission factor also varies with aerodynamic size range

as shown in Table 13.2.2-4

Table 13.2.2-4. EMISSION FACTOR FOR 1980'S VEHICLE FLEET  
EXHAUST, BRAKE WEAR AND TIRE WEAR

Particle Size Range <sup>a</sup>	C, Emission Factor for Exhaust, Brake Wear and Tire Wear <sup>b</sup> lb/VMT
PM <sub>2.5</sub>	0.00036
PM <sub>10</sub>	0.00047
PM <sub>30</sub> <sup>c</sup>	0.00047

- <sup>a</sup> Refers to airborne particulate matter (PM-x) with an aerodynamic diameter equal to or less than x micrometers.
- <sup>b</sup> Units shown are pounds per vehicle mile traveled (lb/VMT).
- <sup>c</sup> PM-30 is sometimes termed "suspendable particulate" (SP) and is often used as a surrogate for TSP.

It is important to note that the vehicle-related source conditions refer to the average weight, speed, and number of wheels for all vehicles traveling the road. For example, if 98 percent of traffic on the road are 2-ton cars and trucks while the remaining 2 percent consists of 20-ton trucks, then the mean weight is 2.4 tons. More specifically, Equations 1a and 1b are *not* intended to be used to calculate a separate emission factor for each vehicle class within a mix of traffic on a given unpaved road. That is, in the example, one should *not* determine one factor for the 2-ton vehicles and a second factor for the 20-ton trucks. Instead, only one emission factor should be calculated that represents the "fleet" average of 2.4 tons for all vehicles traveling the road.

Moreover, to retain the quality ratings when addressing a group of unpaved roads, it is necessary that reliable correction parameter values be determined for the road in question. The field and laboratory procedures for determining road surface silt and moisture contents are given in AP-42 Appendices C.1 and C.2. Vehicle-related parameters should be developed by recording visual observations of traffic. In some cases, vehicle parameters for industrial unpaved roads can be determined by reviewing maintenance records or other information sources at the facility.

In the event that site-specific values for correction parameters cannot be obtained, then default values may be used. In the absence of site-specific silt content information, an appropriate mean value from Table 13.2.2-1 may be used as a default value, but the quality rating of the equation is reduced by two letters. Because of significant differences found between different types of road surfaces and between different areas of the country, use of the default moisture content value of 0.5 percent in Equation 1b is discouraged. The quality rating should be downgraded two letters when the default moisture content value is used. (It is assumed that readers addressing industrial roads have access to the information needed to develop average vehicle information in Equation 1a for their facility.)

The effect of routine watering to control emissions from unpaved roads is discussed below in Section 13.2.2.3, "Controls". However, all roads are subject to some natural mitigation because of rainfall and other precipitation. The Equation 1a and 1b emission factors can be extrapolated to annual

average uncontrolled conditions (but including natural mitigation) under the simplifying assumption that annual average emissions are inversely proportional to the number of days with measurable (more than 0.254 mm [0.01 inch]) precipitation:

$$E_{\text{ext}} = E [(365 - P)/365] \quad (2)$$

where:

$E_{\text{ext}}$  = annual size-specific emission factor extrapolated for natural mitigation, lb/VMT

$E$  = emission factor from Equation 1a or 1b

$P$  = number of days in a year with at least 0.254 mm (0.01 in) of precipitation (see below)

Figure 13.2.2-1 gives the geographical distribution for the mean annual number of “wet” days for the United States.

Equation 2 provides an estimate that accounts for precipitation on an annual average basis for the purpose of inventorying emissions. It should be noted that Equation 2 does not account for differences in the temporal distributions of the rain events, the quantity of rain during any event, or the potential for the rain to evaporate from the road surface. In the event that a finer temporal and spatial resolution is desired for inventories of public unpaved roads, estimates can be based on a more complex set of assumptions. These assumptions include:

1. The moisture content of the road surface material is increased in proportion to the quantity of water added;
2. The moisture content of the road surface material is reduced in proportion to the Class A pan evaporation rate;
3. The moisture content of the road surface material is reduced in proportion to the traffic volume; and
4. The moisture content of the road surface material varies between the extremes observed in the area. The CHIEF Web site (<http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch13/related/c13s02-2.html>) has a file which contains a spreadsheet program for calculating emission factors which are temporally and spatially resolved. Information required for use of the spreadsheet program includes monthly Class A pan evaporation values, hourly meteorological data for precipitation, humidity and snow cover, vehicle traffic information, and road surface material information.

It is emphasized that the simple assumption underlying Equation 2 and the more complex set of assumptions underlying the use of the procedure which produces a finer temporal and spatial resolution have not been verified in any rigorous manner. For this reason, the quality ratings for either approach should be downgraded one letter from the rating that would be applied to Equation 1.

### 13.2.2.3 Controls<sup>18-22</sup>

A wide variety of options exist to control emissions from unpaved roads. Options fall into the following three groupings:

1. Vehicle restrictions that limit the speed, weight or number of vehicles on the road;

2. Surface improvement, by measures such as (a) paving or (b) adding gravel or slag to a dirt road; and
3. Surface treatment, such as watering or treatment with chemical dust suppressants.

Available control options span broad ranges in terms of cost, efficiency, and applicability. For example, traffic controls provide moderate emission reductions (often at little cost) but are difficult to enforce. Although paving is highly effective, its high initial cost is often prohibitive. Furthermore, paving is not feasible for industrial roads subject to very heavy vehicles and/or spillage of material in transport. Watering and chemical suppressants, on the other hand, are potentially applicable to most industrial roads at moderate to low costs. However, these require frequent reapplication to maintain an acceptable level of control. Chemical suppressants are generally more cost-effective than water but not in cases of temporary roads (which are common at mines, landfills, and construction sites). In summary, then, one needs to consider not only the type and volume of traffic on the road but also how long the road will be in service when developing control plans.

Vehicle restrictions. These measures seek to limit the amount and type of traffic present on the road or to lower the mean vehicle speed. For example, many industrial plants have restricted employees from driving on plant property and have instead instituted bussing programs. This eliminates emissions due to employees traveling to/from their worksites. Although the heavier average vehicle weight of the busses increases the base emission factor, the decrease in vehicle-miles-traveled results in a lower overall emission rate.

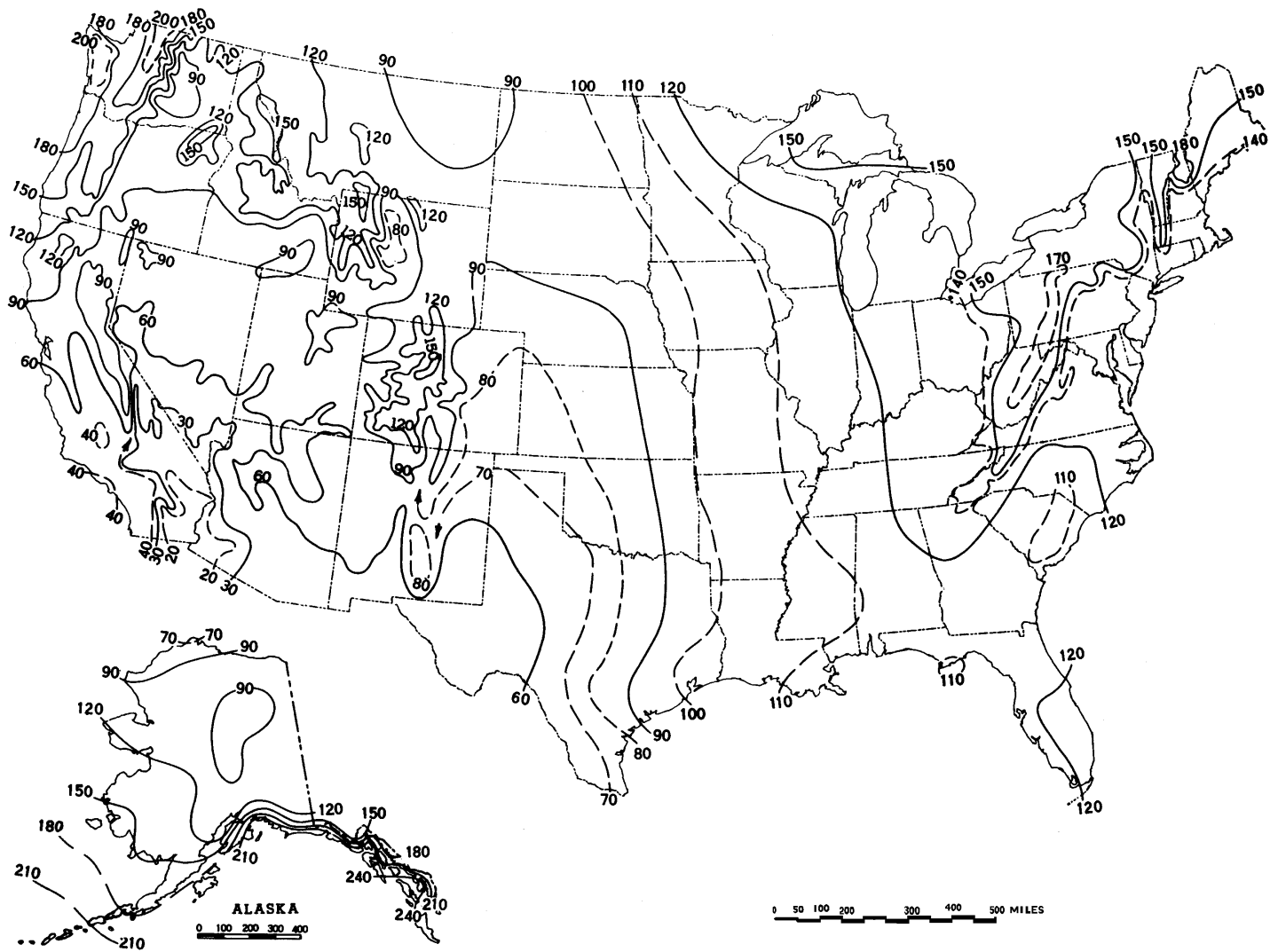


Figure 13.2.2-1. Mean number of days with 0.01 inch or more of precipitation in United States.

Surface improvements. Control options in this category alter the road surface. As opposed to the “surface treatments” discussed below, improvements are relatively “permanent” and do not require periodic retreatment.

The most obvious surface improvement is paving an unpaved road. This option is quite expensive and is probably most applicable to relatively short stretches of unpaved road with at least several hundred vehicle passes per day. Furthermore, if the newly paved road is located near unpaved areas or is used to transport material, it is essential that the control plan address routine cleaning of the newly paved road surface.

The control efficiencies achievable by paving can be estimated by comparing emission factors for unpaved and paved road conditions. The predictive emission factor equation for paved roads, given in Section 13.2.1, requires estimation of the silt loading on the traveled portion of the paved surface, which in turn depends on whether the pavement is periodically cleaned. Unless curbing is to be installed, the effects of vehicle excursion onto unpaved shoulders (berms) also must be taken into account in estimating the control efficiency of paving.

Other improvement methods cover the road surface with another material that has a lower silt content. Examples include placing gravel or slag on a dirt road. Control efficiency can be estimated by comparing the emission factors obtained using the silt contents before and after improvement. The silt content of the road surface should be determined after 3 to 6 months rather than immediately following placement. Control plans should address regular maintenance practices, such as grading, to retain larger aggregate on the traveled portion of the road.

Surface treatments refer to control options which require periodic reapplication. Treatments fall into the two main categories of (a) “wet suppression” (i. e., watering, possibly with surfactants or other additives), which keeps the road surface wet to control emissions and (b) “chemical stabilization/treatment”, which attempts to change the physical characteristics of the surface. The necessary reapplication frequency varies from several minutes for plain water under summertime conditions to several weeks or months for chemical dust suppressants.

Watering increases the moisture content, which conglomerates particles and reduces their likelihood to become suspended when vehicles pass over the surface. The control efficiency depends on how fast the road dries after water is added. This in turn depends on (a) the amount (per unit road surface area) of water added during each application; (b) the period of time between applications; (c) the weight, speed and number of vehicles traveling over the watered road during the period between applications; and (d) meteorological conditions (temperature, wind speed, cloud cover, etc.) that affect evaporation during the period.

Figure 13.2.2-2 presents a simple bilinear relationship between the instantaneous control efficiency due to watering and the resulting increase in surface moisture. The moisture ratio "M" (i.e., the x-axis in Figure 13.2.2-2) is found by dividing the surface moisture content of the watered road by the surface moisture content of the uncontrolled road. As the watered road surface dries, both the ratio M and the predicted instantaneous control efficiency (i.e., the y-axis in the figure) decrease. The figure shows that between the uncontrolled moisture content and a value twice as large, a small increase in moisture content results in a large increase in control efficiency. Beyond that, control efficiency grows slowly with increased moisture content.

Given the complicated nature of how the road dries, characterization of emissions from watered roadways is best done by collecting road surface material samples at various times between water truck passes. (Appendices C.1 and C.2 present the sampling and analysis procedures.) The moisture content measured can then be associated with a control efficiency by use of Figure 13.2.2-2. Samples that reflect average conditions during the watering cycle can take the form of either a series of samples between water applications or a single sample at the midpoint. It is essential that samples be collected during periods with active traffic on the road. Finally, because of different evaporation rates, it is recommended that samples be collected at various times during the year. If only one set of samples is to be collected, these must be collected during hot, summertime conditions.

When developing watering control plans for roads that do not yet exist, it is strongly recommended that the moisture cycle be established by sampling similar roads in the same geographic area. If the moisture cycle cannot be established by similar roads using established watering control plans, the more complex methodology used to estimate the mitigation of rainfall and other precipitation can be used to estimate the control provided by routine watering. An estimate of the maximum daytime Class A pan evaporation (based upon daily evaporation data published in the monthly Climatological Data for the state by the National Climatic Data Center) should be used to insure that adequate watering capability is available during periods of highest evaporation. The hourly precipitation values in the spreadsheet should be replaced with the equivalent inches of precipitation (where the equivalent of 1 inch of precipitation is provided by an application of 5.6 gallons of water per square yard of road). Information on the long term average annual evaporation and on the percentage that occurs between May and October was published in the Climatic Atlas (Reference 16). Figure 13.2.2-3 presents the geographical distribution for "Class A pan evaporation" throughout the United States. Figure 13.2.2-4 presents the geographical distribution of the percentage of this evaporation that occurs between May and October. The U. S. Weather Bureau Class A evaporation pan is a cylindrical metal container with a depth of 10 inches and a diameter of 48 inches. Periodic measurements are made of the changes of the water level.

The above methodology should be used only for prospective analyses and for designing watering programs for existing roadways. The quality rating of an emission factor for a watered road that is based on this methodology should be downgraded two letters. Periodic road surface samples should be collected and analyzed to verify the efficiency of the watering program.

As opposed to watering, chemical dust suppressants have much less frequent reapplication requirements. These materials suppress emissions by changing the physical characteristics of the existing road surface material. Many chemical unpaved road dust suppressants form a hardened surface that binds particles together. After several applications, a treated road often resembles a paved road except that the surface is not uniformly flat. Because the improved surface results in more grinding of small particles, the silt content of loose material on a highly controlled surface may be substantially higher than when the surface was uncontrolled. For this reason, the models presented as Equations 1a and 1b cannot be used to estimate emissions from chemically stabilized roads. Should the road be allowed to return to an

uncontrolled state with no visible signs of large-scale cementing of material, the Equation 1a and 1b emission factors could then be used to obtain conservatively high emission estimates.

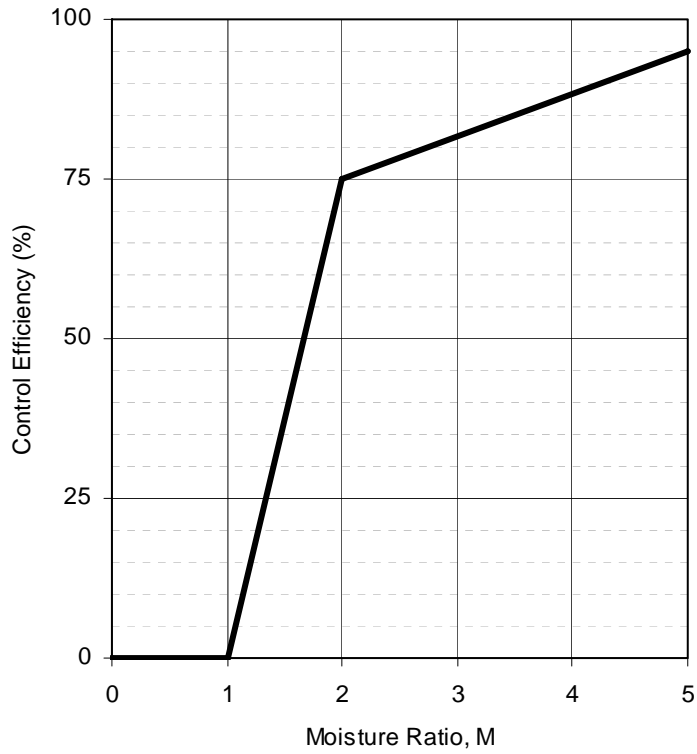


Figure 13.2.2-2. Watering control effectiveness for unpaved travel surfaces

The control effectiveness of chemical dust suppressants appears to depend on (a) the dilution rate used in the mixture; (b) the application rate (volume of solution per unit road surface area); (c) the time between applications; (d) the size, speed and amount of traffic during the period between applications; and (e) meteorological conditions (rainfall, freeze/thaw cycles, etc.) during the period. Other factors that affect the performance of dust suppressants include other traffic characteristics (e. g., cornering, track-on from unpaved areas) and road characteristics (e. g., bearing strength, grade). The variabilities in the above factors and differences between individual dust control products make the control efficiencies of chemical dust suppressants difficult to estimate. Past field testing of emissions from controlled unpaved roads has shown that chemical dust suppressants provide a PM-10 control efficiency of about 80 percent when applied at regular intervals of 2 weeks to 1 month.





Petroleum resin products historically have been the dust suppressants (besides water) most widely used on industrial unpaved roads. Figure 13.2.2-5 presents a method to estimate average control efficiencies associated with petroleum resins applied to unpaved roads.<sup>20</sup> Several items should be noted:

1. The term "ground inventory" represents the total volume (per unit area) of petroleum resin concentrate (*not solution*) applied since the start of the dust control season.
2. Because petroleum resin products must be periodically reapplied to unpaved roads, the use of a time-averaged control efficiency value is appropriate. Figure 13.2.2-5 presents control efficiency values averaged over two common application intervals, 2 weeks and 1 month. Other application intervals will require interpolation.
3. Note that zero efficiency is assigned until the ground inventory reaches 0.05 gallon per square yard (gal/yd<sup>2</sup>). Requiring a minimum ground inventory ensures that one must apply a reasonable amount of chemical dust suppressant to a road before claiming credit for emission control. Recall that the ground inventory refers to the amount of petroleum resin concentrate rather than the total solution.

As an example of the application of Figure 13.2.2-5, suppose that Equation 1a was used to estimate an emission factor of 7.1 lb/VMT for PM-10 from a particular road. Also, suppose that, starting on May 1, the road is treated with 0.221 gal/yd<sup>2</sup> of a solution (1 part petroleum resin to 5 parts water) on the first of each month through September. Then, the average controlled emission factors, shown in Table 13.2.2-5, are found.

Table 13.2.2-5. EXAMPLE OF AVERAGE CONTROLLED EMISSION FACTORS FOR SPECIFIC CONDITIONS

Period	Ground Inventory, gal/yd <sup>2</sup>	Average Control Efficiency, % <sup>a</sup>	Average Controlled Emission Factor, lb/VMT
May	0.037	0	7.1
June	0.073	62	2.7
July	0.11	68	2.3
August	0.15	74	1.8
September	0.18	80	1.4

<sup>a</sup> From Figure 13.2.2-5,  $\leq 10 \mu\text{m}$ . Zero efficiency assigned if ground inventory is less than 0.05 gal/yd<sup>2</sup>. 1 lb/VMT = 281.9 g/VKT. 1 gal/yd<sup>2</sup> = 4.531 L/m<sup>2</sup>.

Besides petroleum resins, other newer dust suppressants have also been successful in controlling emissions from unpaved roads. Specific test results for those chemicals, as well as for petroleum resins and watering, are provided in References 18 through 21.

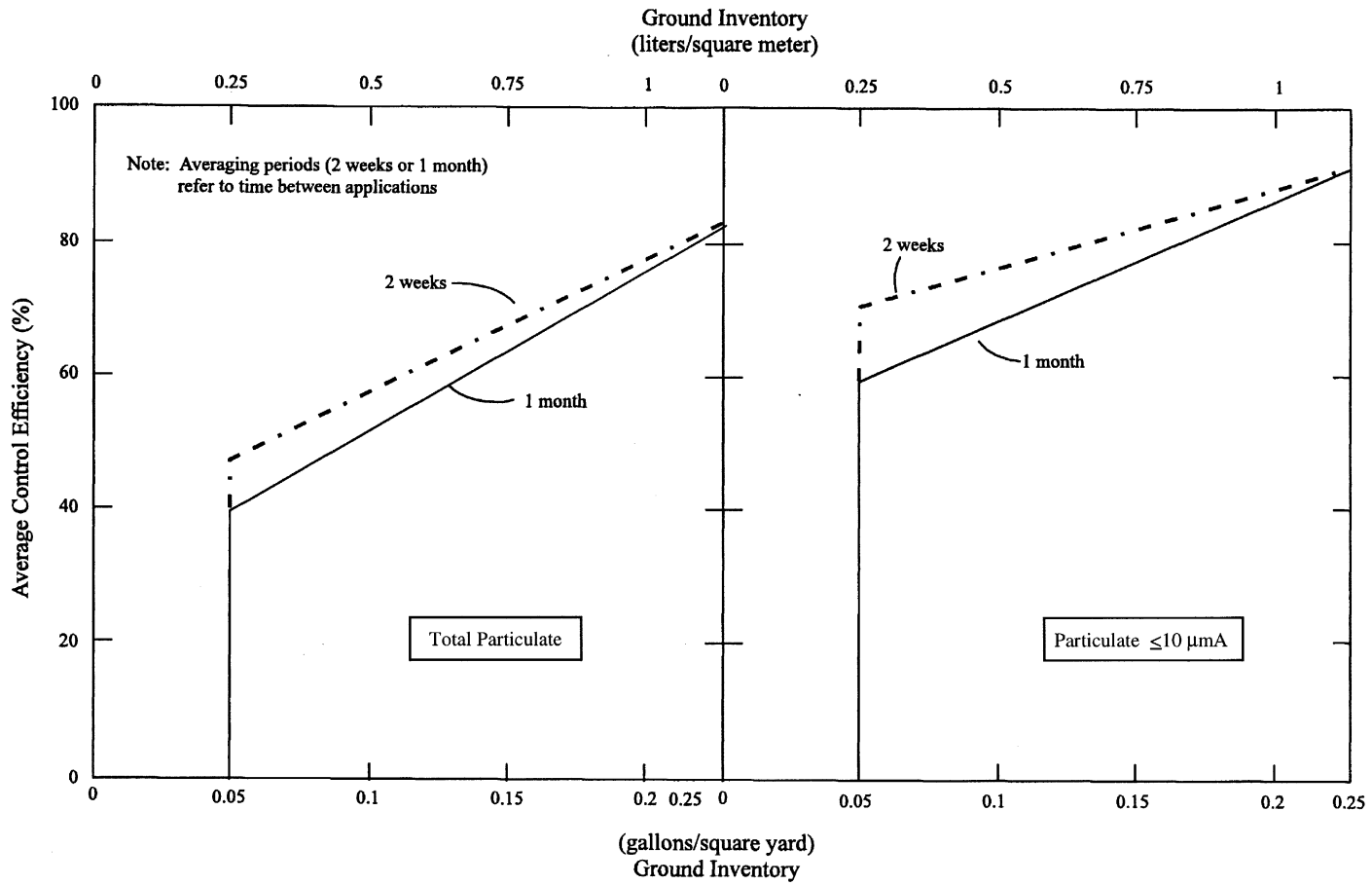


Figure 13.2.2-5. Average control efficiencies over common application intervals.

#### 13.2.2.4 Updates Since The Fifth Edition

The Fifth Edition was released in January 1995. Revisions to this section since that date are summarized below. For further detail, consult the background report for this section (Reference 6).

October 1998 (Supplement E)– This was a major revision of this section. Significant changes to the text and the emission factor equations were made.

October 2001 – Separate emission factors for unpaved surfaces at industrial sites and publicly accessible roads were introduced. Figure 13.2.2-2 was included to provide control effectiveness estimates for watered roads.

December 2003 – The public road emission factor equation (equation 1b) was adjusted to remove the component of particulate emissions from exhaust, brake wear, and tire wear. The parameter *C* in the new equation varies with aerodynamic size range of the particulate matter. Table 13.2.2-4 was added to present the new coefficients.

January 2006 – The PM-2.5 particle size multipliers (i.e., factors) in Table 13.2.2-2 were modified and the quality ratings were upgraded from C to B based on the wind tunnel studies of a variety of dust emitting surface materials.

#### References For Section 13.2.2

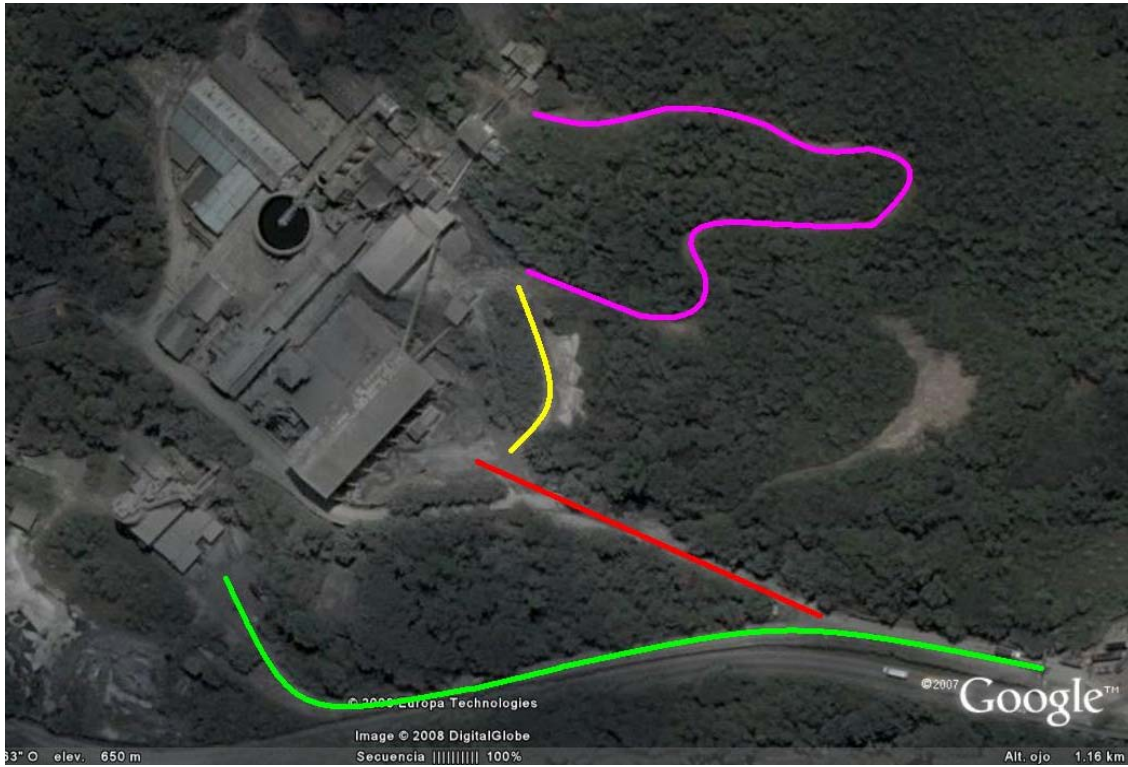
1. C. Cowherd, Jr., *et al.*, *Development Of Emission Factors For Fugitive Dust Sources*, EPA-450/3-74-037, U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, June 1974.
2. R. J. Dyck and J. J. Stukel, "Fugitive Dust Emissions From Trucks On Unpaved Roads", *Environmental Science And Technology*, 10(10):1046-1048, October 1976.
3. R. O. McCaldin and K. J. Heidel, "Particulate Emissions From Vehicle Travel Over Unpaved Roads", Presented at the 71st Annual Meeting of the Air Pollution Control Association, Houston, TX, June 1978.
4. C. Cowherd, Jr., *et al.*, *Iron And Steel Plant Open Dust Source Fugitive Emission Evaluation*, EPA-600/2-79-013, U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, May 1979.
5. G. Muleski, *Unpaved Road Emission Impact*, Arizona Department of Environmental Quality, Phoenix, AZ, March 1991.
6. *Emission Factor Documentation For AP-42, Section 13.2.2, Unpaved Roads, Final Report*, Midwest Research Institute, Kansas City, MO, September 1998.
7. T. Cuscino, Jr., *et al.*, *Taconite Mining Fugitive Emissions Study*, Minnesota Pollution Control Agency, Roseville, MN, June 1979.
8. *Improved Emission Factors For Fugitive Dust From Western Surface Coal Mining Sources*, 2 Volumes, EPA Contract No. 68-03-2924, Office of Air Quality Planning and Standards, U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.

9. T. Cuscino, Jr., *et al.*, *Iron And Steel Plant Open Source Fugitive Emission Control Evaluation*, EPA-600/2-83-110, U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, October 1983.
10. *Size Specific Emission Factors For Uncontrolled Industrial And Rural Roads*, EPA Contract No. 68-02-3158, Midwest Research Institute, Kansas City, MO, September 1983.
11. C. Cowherd, Jr., and P. Englehart, *Size Specific Particulate Emission Factors For Industrial And Rural Roads*, EPA-600/7-85-038, U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, September 1985.
12. *PM-10 Emission Inventory Of Landfills In The Lake Calumet Area*, EPA Contract 68-02-3891, Work Assignment 30, Midwest Research Institute, Kansas City, MO, September 1987.
13. *Chicago Area Particulate Matter Emission Inventory — Sampling And Analysis*, EPA Contract No. 68-02-4395, Work Assignment 1, Midwest Research Institute, Kansas City, MO, May 1988.
14. *PM-10 Emissions Inventory Data For The Maricopa And Pima Planning Areas*, EPA Contract No. 68-02-3888, Engineering-Science, Pasadena, CA, January 1987.
15. *Oregon Fugitive Dust Emission Inventory*, EPA Contract 68-D0-0123, Midwest Research Institute, Kansas City, MO, January 1992.
16. *Climatic Atlas Of The United States*, U. S. Department Of Commerce, Washington, DC, June 1968.
17. National Climatic Data Center, *Solar And Meteorological Surface Observation Network 1961-1990*; 3 Volume CD-ROM. Asheville, NC, 1993.
18. C. Cowherd, Jr. *et al.*, *Control Of Open Fugitive Dust Sources*, EPA-450/3-88-008, U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, September 1988.
19. G. E. Muleski, *et al.*, *Extended Evaluation Of Unpaved Road Dust Suppressants In The Iron And Steel Industry*, EPA-600/2-84-027, U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, February 1984.
20. C. Cowherd, Jr., and J. S. Kinsey, *Identification, Assessment And Control Of Fugitive Particulate Emissions*, EPA-600/8-86-023, U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, August 1986.
21. G. E. Muleski and C. Cowherd, Jr., *Evaluation Of The Effectiveness Of Chemical Dust Suppressants On Unpaved Roads*, EPA-600/2-87-102, U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, November 1986.
22. *Fugitive Dust Background Document And Technical Information Document For Best Available Control Measures*, EPA-450/2-92-004, Office Of Air Quality Planning And Standards, U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, September 1992.
23. Written communication (Technical Memorandum) from P. Hemmer, E.H. Pechan & Associates, Inc., Durham, NC to B. Kuykendal, U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, August, 21, 2003.

24. MOBILE6 User Guide, United States Environmental Protection Agency, Office of Transportation and Air Quality. EPA420-R-02-028, October 2002.
25. Written communication (Technical Memorandum) from G. Muleski, Midwest Research Institute, Kansas City, MO, to B. Kuykendal, U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, Subject "Unpaved Roads", September 27, 2001.
26. Written communication (Technical Memorandum) from W. Kuykendal, U. S. Environmental Protection Agency, to File, Subject "Decisions on Final AP-42 Section 13.2.2 Unpaved Roads", November 24, 2003.
27. C. Cowherd, *Background Document for Revisions to Fine Fraction Ratios &sed for AP-42 Fugitive Dust Emission Factors*. Prepared by Midwest Research Institute for Western Governors Association, Western Regional Air Partnership, Denver, CO, February 1, 2006.

**ANEXO F**  
**HOJAS DE CÁLCULO**  
**FACTORES DE EMISIÓN DE**  
**CARRETERAS**

## UBICACIÓN ESPACIAL DE TRAMOS



Tramos	Estado de Carretera	Color
1-10	Pavimentada	Verde
11-14	Pavimentada	Rojo
15-19	No Pavimentada	Amarillo
20-38	No Pavimentada	Magenta



Tramos	Ancho (m)	Largo (m)	Area (m2)	KM	Sin carga (gr)	Con carga (gr)	Sin Carga (gr/s.m2)	Con Carga (gr/s.m2)	Factor de Emision
1	12,86	15,77	202,8022	0,01577	43,00220832	264,2415946	2,45417E-06	1,50805E-05	0,00001753
2	12,33	49,13	605,7729	0,04913	133,969467	823,2206433	2,55966E-06	1,57287E-05	0,00001829
3	6,92	40,07	277,2844	0,04007	109,2643302	671,4115851	4,56078E-06	2,80253E-05	0,00003259
4	7,02	69,53	488,1006	0,06953	189,5969274	1165,042364	4,49581E-06	2,7626E-05	0,00003212
5	6,83	58,83	401,8089	0,05883	160,4197791	985,7535201	4,62088E-06	2,83946E-05	0,00003302
6	6,84	60,79	415,8036	0,06079	165,7643782	1018,595215	4,61412E-06	2,8353E-05	0,00003297
7	6,7	32,54	218,018	0,03254	88,73125294	545,239156	4,71054E-06	2,89455E-05	0,00003366
8	6,64	18,59	123,4376	0,01859	50,69188667	311,4934207	4,7531E-06	2,9207E-05	0,00003396
9	7,41	21,57	159,8337	0,02157	58,81785882	361,4262014	4,25919E-06	2,6172E-05	0,00003043
10	15,21	31,19	474,3999	0,03119	85,05002395	522,6186009	2,07499E-06	1,27505E-05	0,00001483
11	6,4	63,33	405,312	0,06333	172,6905424	1061,15537	4,93134E-06	3,03023E-05	0,00003523
12	6,41	63,32	405,8812	0,06332	172,663274	1060,987811	4,92365E-06	3,0255E-05	0,00003518
13	19,9	29,82	593,418	0,02982	81,31425823	499,6629266	1,58596E-06	9,74547E-06	0,00001133
14	14,9	19,14	285,186	0,01914	52,19164663	320,7092024	2,11816E-06	1,30158E-05	0,00001513

Ecarga=	372,35482
Esincarga=	60,596362
N de vehiculos=	45

DATOS COMPLEMENTARIOS DE LOS TRAMOS PARA INTRODUCIR EN EL SOFTWARE BREEZE.

<b>Tramos</b>	<b>Coor X</b>	<b>Coor Y</b>	<b>Angle</b>	<b>Elevation</b>
1	706529,3	791722,3	2,9	650
2	706529,9	791734,2	-170	650
3	706440,4	791744,1	13,6	650
4	706437,5	791749,4	175,3	649
5	706367,8	791742,6	173,4	647
6	706309	791734,2	167	647
7	706249,4	791718,9	178,9	646
8	706214,9	791718,1	-173,1	647
9	706198,2	791723,4	-128,3	646
10	706151,6	791760,2	48,7	643
11	706423,6	791757,1	-154,6	648
12	706298,4	791798,3	16,8	648
13	706270,4	791846,8	130,4	648
14	706287,1	791832,8	129,8	648

## TABLA EXCEL PARA CARRETERAS NO PAVIMENTADAS

<b>E=</b>	2,42759029					
		<b>k=</b>	1,5		<b>Promedio Peso Vehiculos</b>	
		<b>s=</b>	10	1,2		
		<b>W=</b>	12,593	2,6		
		<b>a=</b>	0,9	3	<b>Produccion</b>	<b>Carga en Vehiculos</b>
		<b>b=</b>	0,45	5	<b>(Ton/dia)</b>	<b>(Ton/dia)</b>
				7	566,6666667	12,5925926
				18,8	3,76	
		<b>Factor de Emision</b>				
		<b>(g/VKT)</b>				
		684,337703				
		<b>Factor de Emision con arreglo de</b>				
		<b>precipitacion</b>			<b>Dias con lluvia &gt;0,254mm</b>	
		318,73			195	

Tramos	Ancho (m)	Largo (m)	Area (m2)	Km	Sin carga (gr)	Con carga (gr)	Sin Carga (gr/s.m2)	Con Carga (gr/s.m2)	Factor de Emision
15	5,92	16,33	96,6736	0,0163	135,9589915	234,2206722	1,62774E-05	2,80417E-05	0,00004432
16	5,4	15,19	82,026	0,0152	126,4676718	217,8696884	1,78449E-05	3,0742E-05	0,00004859
17	5,87	17,2	100,964	0,0172	143,2023671	246,6990546	1,64161E-05	2,82805E-05	0,00004470
18	6,87	18,51	127,1637	0,0185	154,109059	265,4883431	1,40266E-05	2,4164E-05	0,00003819
19	12,72	24,26	308,5872	0,0243	201,9819433	347,9604108	7,57567E-06	1,30508E-05	0,00002063
20	2,7	26,95	72,765	0,027	224,3781275	386,5429955	3,56898E-05	6,14839E-05	0,00009717
21	3,27	18,07	59,0889	0,0181	150,4457426	259,1774371	2,94687E-05	5,07665E-05	0,00008024
22	3,54	13,93	49,3122	0,0139	115,9772659	199,7975483	2,7221E-05	4,68945E-05	0,00007412
23	3,29	10,26	33,7554	0,0103	85,42187709	147,1588547	2,92895E-05	5,04579E-05	0,00007975
24	3,76	10,52	39,5552	0,0105	87,58656404	150,8880264	2,56283E-05	4,41507E-05	0,00006978
25	4,31	13,63	58,7453	0,0136	113,4795502	195,4946578	2,23579E-05	3,85166E-05	0,00006087
26	3,9	10,21	39,819	0,0102	85,00559114	146,4417063	2,47083E-05	4,25658E-05	0,00006727
27	4,33	10,37	44,9021	0,0104	86,33770619	148,7365812	2,22546E-05	3,83387E-05	0,00006059
28	3,76	19,67	73,9592	0,0197	163,766893	282,1261863	2,56283E-05	4,41507E-05	0,00006978
29	3,45	25,61	88,3545	0,0256	213,221664	367,323418	2,79312E-05	4,81178E-05	0,00007605
30	3,72	32,7	121,644	0,0327	272,2510118	469,0150632	2,59039E-05	4,46254E-05	0,00007053
31	4,34	12,89	55,9426	0,0129	107,3185181	184,8808613	2,22033E-05	3,82504E-05	0,00006045
32	4,3	10,57	45,451	0,0106	88,00284999	151,6051749	2,24099E-05	3,86062E-05	0,00006102
33	3,94	17,6	69,344	0,0176	146,5326547	252,436242	2,44575E-05	4,21336E-05	0,00006659
34	3,42	18,13	62,0046	0,0181	150,9452857	260,0380152	2,81762E-05	4,85399E-05	0,00007672
35	4,06	23,71	96,2626	0,0237	197,4027978	340,0717782	2,37346E-05	4,08883E-05	0,00006462
36	4,1	27,12	111,192	0,0271	225,7934997	388,9813001	2,3503E-05	4,04894E-05	0,00006399
37	3,95	38,69	152,8255	0,0387	322,1220687	554,9294433	2,43956E-05	4,2027E-05	0,00006642
38	5,1	35,53	181,203	0,0355	295,8127966	509,6056635	1,88946E-05	3,25503E-05	0,00005144

Ecarga=	318,73263
Esincarga=	185,01598
N de vehiculos=	45

DATOS COMPLEMENTARIOS DE LOS TRAMOS PARA INTRODUCIR EN EL  
SOFTWARE BREEZE.

<b>Tramos</b>	<b>Coor X</b>	<b>Coor Y</b>	<b>Angle</b>	<b>Elevation</b>
15	706302,4	791823,2	-52,07016	649
16	706313,4	791838,9	-90	650
17	706313,4	791855,4	-96,9	652
18	706311,3	791873,8	-107,4	654
19	706300,3	791904	168,8812	654
20	706316,3	791892,9	23	655
21	706341,4	791881,5	17,6	655
22	706360,8	791875,9	-9	656
23	706375,7	791877,7	-25	657
24	706386,9	791883	-60	657
25	706388,2	791894,9	-140	658
26	706376,9	791902,7	-90	658
27	706375,1	791912,8	-20,2	659
28	706385,4	791916,5	0	660
29	706405	791915,8	3,3	660
30	706432,5	791914,2	-8	660
31	706466,8	791921,9	-55,5	661
32	706473,9	791937,4	-114,5	661
33	706465	791951	180	661
34	706446	791950,6	-179,1	661
35	706428,3	791951,4	-147,4	661
36	706406	791965	-178,1	662
37	706376,1	791966,5	170,6	661
38	706337,1	791960,8	178,9	660

**ANEXO G**  
**A MODEL FOR PREDICTING THE**  
**DISPERSION OF DUST FROM A HAUL**  
**TRUCK**

# A model for predicting the dispersion of dust from a haul truck

W.R. REED and E.C. WESTMAN\*

Department of Mining and Minerals Engineering, 100 Holden Hall, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia 24061, USA

The Industrial Source Complex 3 (ISC3) model, created by the United States Environmental Protection Agency (USEPA), is the best available model for estimating the dispersion of particulate matter less than 10 microns in diameter (PM<sub>10</sub>) from surface mining operations; its use is required in applications for surface mining permits. However, it has been proven to over-predict actual PM<sub>10</sub> dispersion concentrations by a factor of 2–5. A newly developed model focuses on estimating PM<sub>10</sub> dispersion from haul trucks, since past research has shown that the majority (80–96%) of PM<sub>10</sub> emissions from surface mining operations are from mobile sources. This model is a promising improvement over the ISC3 model. Modeling exercises using the new model on actual surface mine hauling operations demonstrated a 77% improvement over the ISC3 model.

**Keywords:** Dust; Particulate matter; Dispersion; Model; Haul trucks; Surface mining;

## 1. Introduction

Air quality permits are required for the construction of all new surface mining operations. An air quality permit requires a surface mining operation to estimate the type and amount of pollutants the facility will produce. During surface mining the most common pollutant is particulate matter having an aerodynamic diameter less than 10 microns (PM<sub>10</sub>).

The Industrial Source Complex (ISC3) model—created by the United States Environmental Protection Agency (USEPA)—is used for predicting dispersion of pollutants from industrial facilities, including surface mines and quarries. The use of this model is required when applying for a surface mining permit, however, the USEPA and mining companies have repeatedly demonstrated that this model over-predicts the amount of PM<sub>10</sub> dispersed by surface mining facilities, resulting in the denial of air quality permits. Cole and Zapert (1995) found an over-prediction of 2–5 times the actual dust generation. There is thus a need for a

---

\*Corresponding author. ewestman@vt.edu

model that can more accurately predict the dispersion of PM<sub>10</sub> from surface mining operations. A literature review has shown that no models currently exist that can accomplish this task (Reed 2003).

Research into the ISC3 model showed that its original intended use was for facilities that emit pollutants via smoke stacks. Past research has shown that haul trucks create the majority (80–90%) of PM<sub>10</sub> emissions from surface mining operations (Cole and Zapert 1995). The method used to improve the ISC3 model consisted of applying the dispersion equation used by the ISC3 model in a manner more representative of a moving haul truck. A new model called the Dynamic Component program was developed to allow modeling of dust dispersion from haul trucks.

## 2. Dynamic Component equations

The Dynamic Component model uses the same approach as the ISC3 model, where the dispersion of particulate matter from a point source is represented by the Gaussian equation (USEPA 1995):

$$\chi = \frac{QK}{2\pi w_s \sigma_y \sigma_z} \exp \left[ -0.5 \left( \frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \quad (1)$$

where:

$\chi$  is the hourly concentration at downwind distance  $x$  in micrograms per cubic metre ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

$Q$  is the pollutant emission rate in grams per second (g/s)

$K$  is the conversion factor  $1 \times 10^6$  for  $\chi$  in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  and  $Q$  in g/s

$w_s$  is the wind speed in metres per second (m/s)

$\sigma_y$  is the standard deviation of lateral concentration distribution in metres (m)

$\sigma_z$  is the standard deviation of vertical concentration distribution (in m) and

$y$  is the distance to monitoring location, measured perpendicular to wind distance (m).

The emission rate  $Q$  for PM<sub>10</sub> is calculated for haul trucks using the emissions factor published in AP-42 (USEPA 1998). This emission factor is represented as:

$$Q = \frac{2.6 \left( \frac{s}{12} \right)^{0.8} \left( \frac{W}{3} \right)^{0.4}}{\left( \frac{M}{0.2} \right)^{0.3}} \quad (2)$$

where:

$Q$  is the emissions from a haul truck in pounds/vehicle mile traveled (lb/vmt)

$s$  is the surface material silt content in %

$W$  is the mean vehicle weight in tons and

$M$  is the surface material moisture content in %

It should be noted that equation (2) does not use SI units. In order to use  $Q$  in equation (1),  $Q$  had to be converted from lb/vmt to g/s. This was accomplished by converting lb/vmt to grams per vehicle metres traveled, then multiplying it by the speed of the haul truck in m/s.

### 3. Dynamic Component algorithm

The procedure for calculating the dispersion of PM<sub>10</sub> from mobile sources by the new model starts by reading hourly meteorological data into the program. These data are used in equation (1). Each hourly meteorological data point will be used at the  $X$  and  $Y$  coordinates of the source and receptor.

Haul road information, representing the locations of the source (haul truck), is then input into the program. Receptor coordinates, representing the locations for results of the modeling exercise, are input. The coordinates of the source locations and receptors are used to calculate the downwind and crosswind distance, which are used to calculate  $\sigma_y$  and  $\sigma_z$ . Receptor array variables are created using equation (1); these contain the array of PM<sub>10</sub> concentrations calculated for each receptor location using each point location of the haul truck through its haul road travel.

The Dynamic Component program calculates the PM<sub>10</sub> concentrations at each receptor location. The source will be 'mobilized' by changing its coordinates. At the starting point of the mobile emissions source, the PM<sub>10</sub> concentrations for the receptors will be calculated using the starting coordinates of the source ( $X$ ,  $Y$ ), the coordinates of the receptor ( $X_R$ ,  $Y_R$ ) and the meteorological data for the current hour. The coordinates of the mobile source are then changed by a predetermined amount ( $N$ ), which represents the movement of the source and results in new  $X_{X+N}$  and  $Y_{Y+N}$  coordinates. This change in coordinates will be determined by the path and the speed of the source. The PM<sub>10</sub> concentrations at the receptors are calculated. These calculations continue until the mobile source has reached the end of its travel (Reed *et al.* 2002). When the mobile source has finished its run, the meteorological data will proceed to the next hour of data, and the process will repeat. The end result will be a list of receptor dust concentrations sequenced by receptor, source location and meteorological data hour. Figure 1 shows a simplified flow chart for the Dynamic Component ISC3 algorithm.

These receptor array variables can then be combined by averaging to obtain a final total concentration for each receptor for the time period that the model was run. This is accomplished through a separate program, Dynamic Manipulation, dedicated to the manipulation of the receptor array variables. Figure 2 shows the simplified flow chart of the algorithm for this program.

Application of this methodology has produced promising results. The Dynamic Component results showed on average a 77% improvement over the ISC3 results in comparisons with actual field results (Reed *et al.* 2003).

### 4. Description of Dynamic Component program operation

The Dynamic Component program was created using Microsoft Visual Basic 6.0. This program is designed to calculate the concentration of PM<sub>10</sub> at a receptor from a haul truck traveling along a predetermined path using equation (1). Only straight paths are allowed in the initial release of the program. The program emulates the calculations used in ISC3, but also introduces the Dynamic Component described above. Figure 3 shows the window displayed when the program is started.

The first step in the program is to input all the data required for the calculations. These include receptor coordinates, haul truck pathway coordinates, weather data and information required by the emission factor equation.

Once the program is started, information is requested via interactive menus. The first input is the haul road information, which is requested through a series of window displays. An equation characterizing the haul road in Cartesian coordinates must be known. The equation is in the

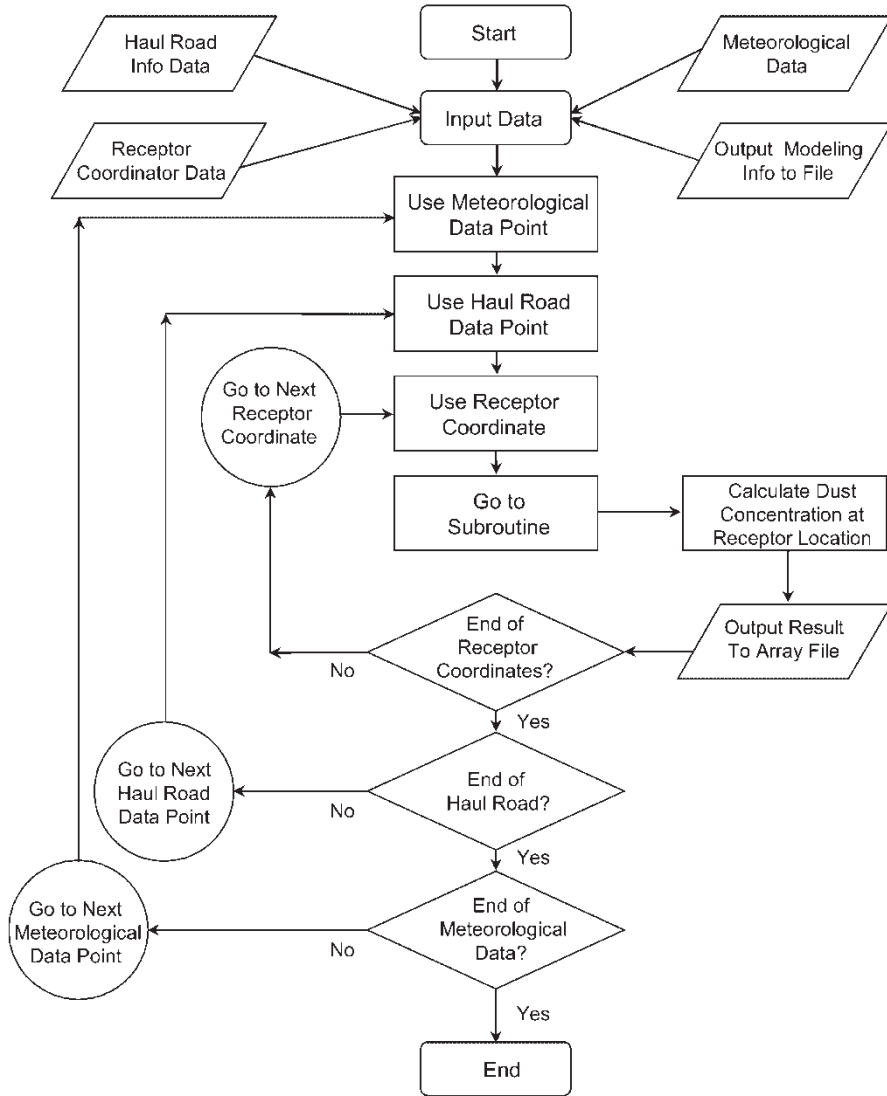


Figure 1. Flow chart of simplified algorithm for *Dynamic Component ISC3.exe*.

standard linear form  $y = mx + b$ . Once entered, the haul truck pathway coordinates are calculated from the straight line between the starting and ending coordinates.

Next, the receptor coordinates are read in from an ASCII file. The program requests the location of the file that contains the receptor coordinates. Once the receptor information is read it will display a series of interactive menus to obtain information concerning the haul road material and the haul trucks.

The program will then calculate the  $PM_{10}$  emissions for the haul trucks using the data input and equation (2). The results are displayed and the program will then ask for the height of the receptor to complete the first stage of inputs.

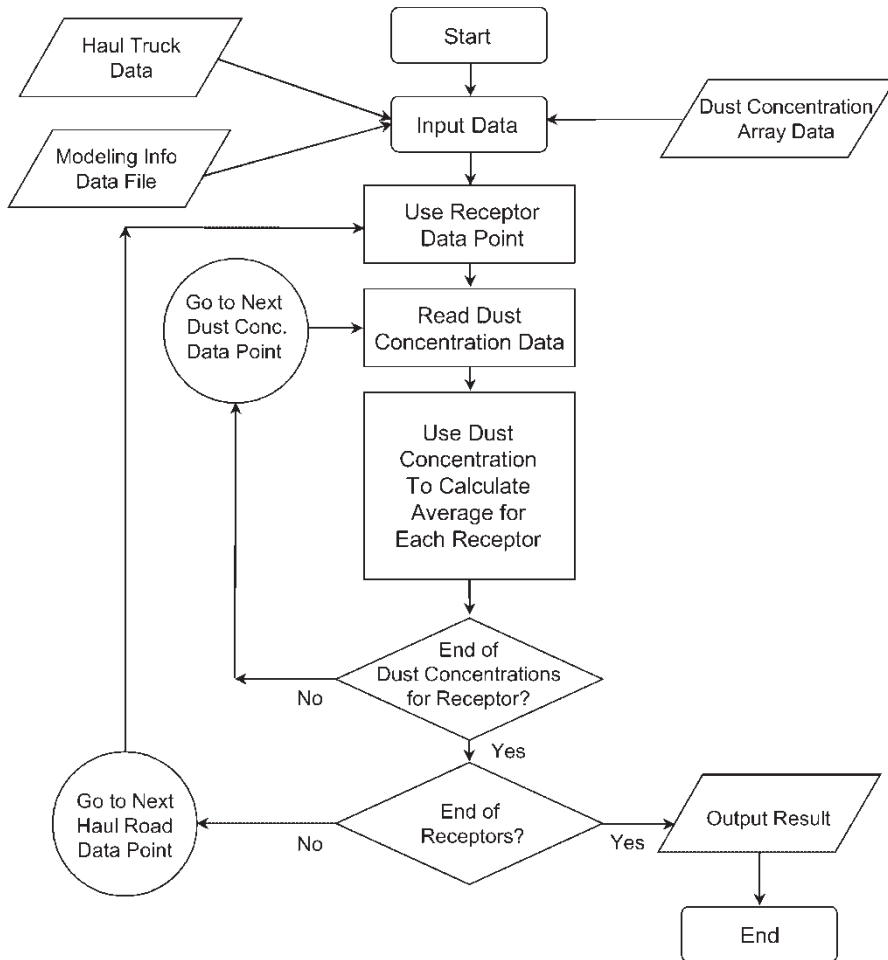


Figure 2. Flow chart of simplified algorithm for *Dynamic Manipulation.exe* program that manipulates the receptor array variables.

The 'File' menu is activated next and the weather data are input. The weather data are read from an ASCII file. This file contains the following information: year, month, day, hour of day, wind speed, wind direction and temperature. The 'hour of day' variable is used by Dynamic Component ISC3 only as a sorting mechanism for the weather data. This variable could have other units of time, such as minutes or seconds. The weather information is available from a USEPA website that contains weather information gathered from airports around the country (USEPA 2003).

A data file must be created that will contain all the information input up to this point, except the weather data. This file is required in the next program, named 'Dynamic Manipulation', which completes the manipulation of the array variables to calculate the final concentrations for each receptor.

The next step is to calculate the  $PM_{10}$  concentrations. These calculations are completed using equation (1) and the algorithm presented in figure 1. The concentrations are calculated at each



Figure 3. Startup window display of *Dynamic Component ISC3*.

receptor coordinate using all the haul truck coordinates and all hourly weather data. This creates a list of concentrations separated into haul truck coordinate, weather hour data and receptor number. Once the calculations are complete, the results are saved as an array variable file for use in Dynamic Manipulation. The array variable file can be quite large depending upon the length of the haul road, amount of weather data and the number of receptors. File sizes up to 70 megabytes are common.

To calculate the final  $PM_{10}$  concentration for each receptor, the program 'Dynamic Manipulation' must be used. Dynamic Manipulation requires input from the two data files created by the Dynamic Component ISC3 program. These two data files are the input data file and the array variable file. At this point in the modeling exercise, the frequency of the haul trucks traveling the haul road must be known. Figure 4 shows the window displayed when starting the Dynamic Manipulation program.

Once the input data files are entered, Dynamic Manipulation calculates the final  $PM_{10}$  concentrations for each receptor. This is completed using the equation:

$$X = \frac{y \left( \frac{cD}{s/60} \right) + BE \left[ t - \left( \frac{cD}{S/60} \right) \right]}{t} \quad (3)$$

where:

$X$  is the final  $PM_{10}$  concentration for the receptor after correction for background emission level in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

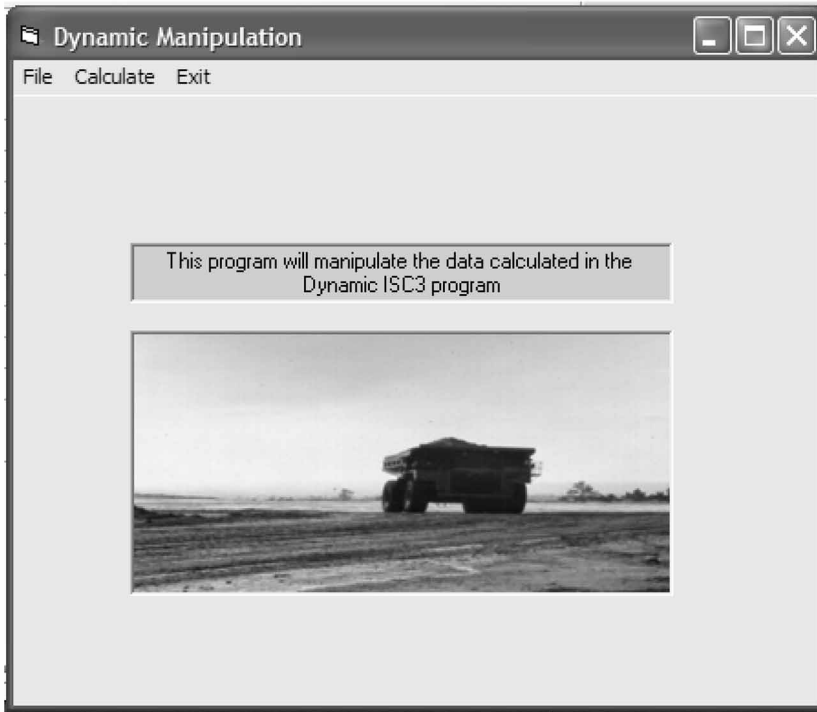


Figure 4. Startup window display of *Dynamic Manipulation*.

$y$  is the  $PM_{10}$  concentration for the receptor before correction for background emission level in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

$c$  is the number of trucks traveling the haul road (number of truck passes)

$D$  is the distance of haul road segment in metres

$S$  is the speed of haul truck in m/s and

BE is the  $PM_{10}$  concentration background emission level for the site in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

A list of corrected  $PM_{10}$  concentrations is created using equation (3) with the data from the array variable file. The corrected  $PM_{10}$  concentrations are then averaged for each receptor. This practice results in a more conservative result because the correction, which introduces a background emissions level, has the effect of raising the receptor concentrations.

Once the final  $PM_{10}$  concentrations are calculated, the results are output to the default printer. There is no method to display the results to videoscreen unless Adobe Acrobat is set as the default printer. Figure 5 shows a typical printout of results. The printout presents the input data along with the results for the modeling exercise. On the first page the  $PM_{10}$  concentration results for each receptor are uncorrected for  $PM_{10}$  background levels. The  $PM_{10}$  concentration results, shown under Page 2 of the printout, are corrected using the background  $PM_{10}$  levels for the site.

## 5. Summary

A new program that more accurately emulates a mobile source emitting dust has been developed. The Dynamic Component program uses the same equations as the ISC3 program to calculate

## Dynamic ISC3 Manipulations Complete

### Input Parameters

Number of receptors = 7

X-Y Coordinates of receptors:

Receptor # 1 X Coordinate = 950.76 Y Coordinate = 1008.68  
 Receptor # 2 X Coordinate = 1000 Y Coordinate = 1000  
 Receptor # 3 X Coordinate = 1049.24 Y Coordinate = 991.32  
 Receptor # 4 X Coordinate = 1098.48 Y Coordinate = 982.64  
 Receptor # 5 X Coordinate = 1017.36 Y Coordinate = 1098.48  
 Receptor # 6 X Coordinate = 1066.6 Y Coordinate = 1089.8  
 Receptor # 7 X Coordinate = 1115.84 Y Coordinate = 1081.12

Number of trucks = 1 Weight of trucks (tons)= 50

Speed of loaded truck (m/sec) = 6.92

Speed of empty truck (m/sec) = 6.92

Background Dust Level (micrograms/m<sup>3</sup>) = 137.5

Silt Content (%) = 21.18

Moisture Content (%) = 0.65

### Calculation Results

Emissions from loaded truck (grams/sec) = 17.29413

Uncorrected Instantaneous Average Concentration of PM10 at receptors:

Results for Receptor 1 = 172.7923 micrograms/m<sup>3</sup>

Results for Receptor 2 = 715.8829 micrograms/m<sup>3</sup>

Results for Receptor 3 = 252.4471 micrograms/m<sup>3</sup>

Results for Receptor 4 = 150.353 micrograms/m<sup>3</sup>

Results for Receptor 5 = 716.985 micrograms/m<sup>3</sup>

Results for Receptor 6 = 254.0709 micrograms/m<sup>3</sup>

Results for Receptor 7 = 152.3236 micrograms/m<sup>3</sup>

## Dynamic ISC3 Manipulations Complete (continued)

Page 2

### Calculation Results

Time Weighted Average Concentration of PM10 at receptors:

Results for Receptor 1 = 270.251687364724120567472412 micrograms/m<sup>3</sup>

Results for Receptor 2 = 813.3422535220358396565948502 micrograms/m<sup>3</sup>

Results for Receptor 3 = 349.90653785720629661003021545 micrograms/m<sup>3</sup>

Results for Receptor 4 = 247.81241016773059780546505518 micrograms/m<sup>3</sup>

Results for Receptor 5 = 814.44446207716167519160536 micrograms/m<sup>3</sup>

Results for Receptor 6 = 351.53032256638388486016815555 micrograms/m<sup>3</sup>

Results for Receptor 7 = 249.78299016575874286898318445 micrograms/m<sup>3</sup>

Figure 5. Printout of results from a modeling exercise.

PM<sub>10</sub> concentrations. However, the methodology of calculating these concentrations for mobile sources has been changed. Instead of dividing the emissions of the source over the area of the

mobile source path, the entire emissions from the haul truck are applied at points along the path of the source. This results in an array of  $PM_{10}$  concentrations that are then averaged for each receptor. This methodology has produced promising results. The Dynamic Component results showed on average a 77% improvement over the ISC3 results in comparisons with actual field results (Reed 2003)

### Acknowledgement

This research was supported by the Pittsburgh Research Laboratory of the National Institute of Occupational Safety and Health, Centers for Disease Control, US National Institute of Health.

### References

- Cole, C.F. and Zapert, J.G., *Air Quality Dispersion Model Validation at Three Stone Quarries*. (Washington, DC: National Stone Association), 1995.
- Reed, W.R., An improved model for prediction of  $PM_{10}$  from surface mining operations. PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.
- Reed, W.R., Westman, E.C. and Haycocks, C., The introduction of a dynamic component to the ISC3 model in predicting dust emissions from surface mining operations, in *Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry, Proceedings of the 30th International Symposium*, edited by S. Bandopadhyay, pp. 659–667, 2002 (Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.: Littleton, CO).
- USEPA, *User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models, Volume II: Description of Model Algorithms*, 1995 (USEPA, Office of Air Quality Planning and Standards, Emissions, Monitoring, and Analysis Division: Research Triangle Park, NC).
- USEPA, *Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume I: Stationary Point and Area Sources*, fifth edition AP-42, section 13.2.2, unpaved roads, 1998 (USEPA, Office of Air Quality Planning and Standards, Emission Factor and Inventory Group: Research Triangle Park, NC).
- USEPA, Technology transfer network, support center for regulatory air models, meteorological data. Available online at: <http://www.epa.gov/scram001/tt24.htm> (accessed April 2003).

**ANEXO H**  
**TABLAS PARA DETERMINAR LA**  
**ESTABILIDAD ATMOSFÉRICA**

### Categorías de estabilidad

En horas diurnas, teniendo conocimiento de la velocidad del viento y de la radiación global se utiliza la siguiente tabla para definir la clase de estabilidad

Velocidad del viento a 10 m (m/S)	Radiación Solar Global (W/m <sup>2</sup> )					
	>700	700-540	540-400	400-270	270-140	<140
< 2	A	A	B	B	C	D
2 - 3	A	B	B	B	C	D
3 - 4	B	B	B	C	C	D
4 - 5	B	B	C	C	D	D
5 - 6	C	C	C	C	D	D
> 6	C	C	D	D	D	D

En horas nocturnas, teniendo conocimiento de la velocidad del viento y la radiación neta se utiliza la siguiente tabla para definir la categoría de estabilidad.

Velocidad del viento a 10 m (m/S)	Radiación Neta (W/m <sup>2</sup> )		
	> -20	(-20) - (-40)	< -40
< 2	D	F	F
2 - 3	D	E	F
3 - 5	D	D	E
5 - 6	D	D	D
> 6	D	D	D

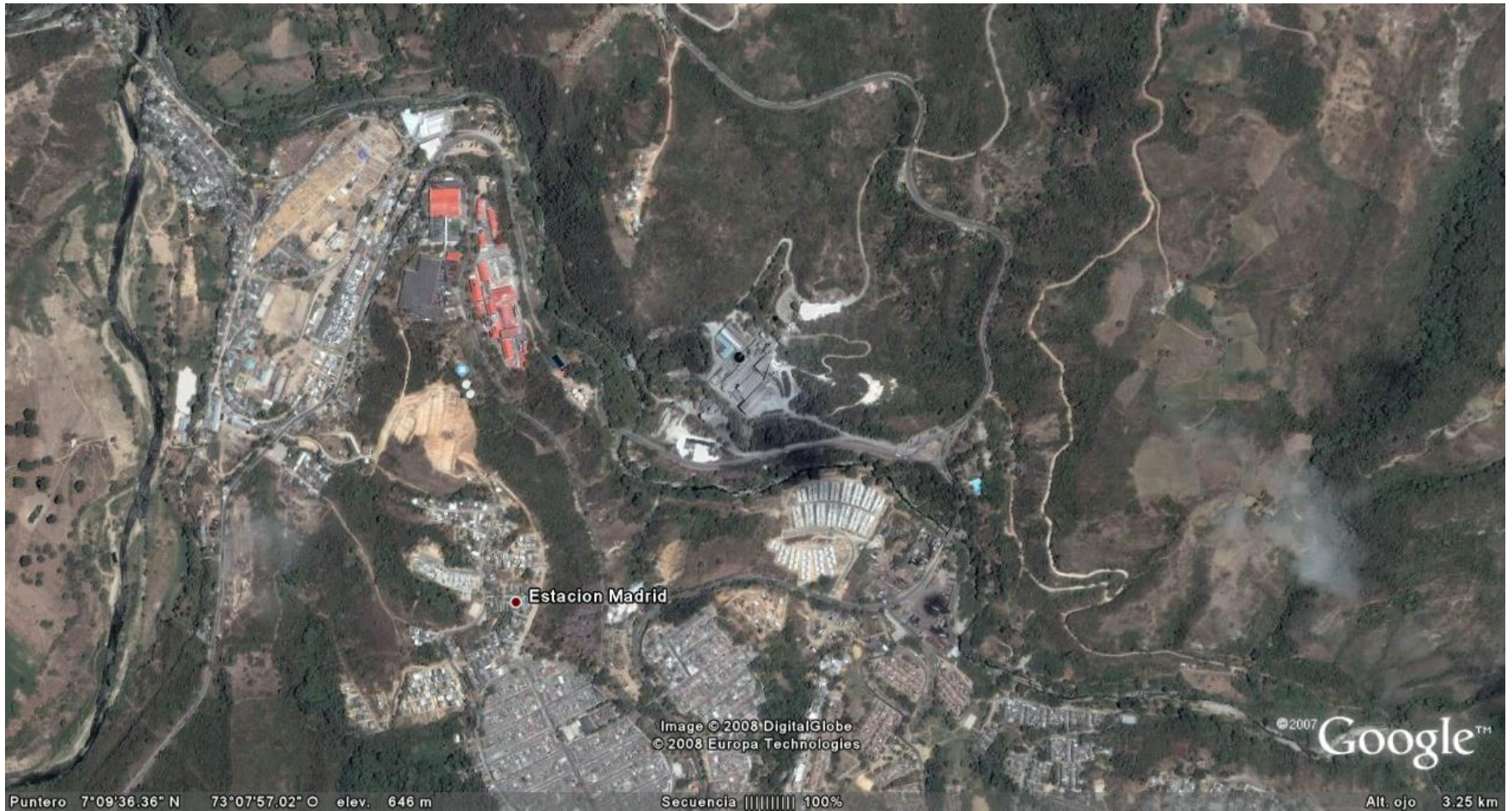
**ANEXO I**  
**TABLA CON DATOS DE ELEVACIÓN**  
**DEL TERRENO**

## ELEVACION DEL TERRENO

Los siguientes datos se sobreponen a la imagen satelital que se usó para la modelación. Todos los valores están en m.s.n.m.

676	657	627	620	616	615	617	620	624	623	633	667	705	724	740	751	745	743	738	731	736	735	735	747	764	790	818	837	840	833	830	806
682	651	619	620	619	615	617	620	623	625	627	637	682	712	741	746	729	727	726	721	728	728	726	738	763	791	818	835	830	818	814	793
660	630	612	614	615	616	618	621	628	635	635	635	681	717	738	732	713	709	711	710	714	711	713	734	760	787	813	820	813	801	789	785
640	615	611	611	614	617	620	624	631	645	644	637	667	705	721	713	699	700	702	699	702	702	714	737	760	784	802	802	795	791	781	788
623	611	610	612	615	619	623	627	641	654	652	640	654	685	697	691	685	693	694	690	687	697	722	747	764	780	786	783	779	782	772	787
617	611	611	613	617	622	624	631	647	663	661	645	645	658	669	668	673	680	681	679	676	694	727	752	768	776	773	767	767	770	763	785
616	611	611	615	619	624	625	634	657	676	677	658	641	643	651	657	660	663	663	665	666	684	712	746	768	770	760	751	747	747	757	793
616	613	613	615	621	627	632	641	661	681	691	683	659	642	639	644	652	655	658	661	665	678	704	737	757	758	753	741	730	736	763	790
616	614	613	618	626	632	639	648	664	687	703	704	683	656	641	642	646	649	651	655	660	675	704	734	745	743	739	734	722	732	762	784
615	615	612	619	630	638	641	654	670	687	707	718	705	674	655	648	647	648	650	649	652	669	698	726	733	732	732	727	716	729	768	794
616	614	612	620	632	644	643	658	674	693	714	730	723	698	678	670	665	658	653	650	648	662	688	709	716	721	725	714	710	738	773	798
616	616	615	622	639	650	651	660	681	703	721	736	731	712	701	697	686	672	663	654	649	658	673	691	705	706	706	700	713	744	763	787
618	619	619	632	648	661	660	665	685	713	731	739	733	718	710	709	702	686	675	662	653	654	663	675	681	679	682	682	699	719	740	764
619	620	626	641	658	671	668	670	688	714	734	743	736	728	720	718	714	703	689	673	661	658	662	666	671	672	673	675	678	683	708	732
622	623	636	653	670	681	676	678	690	707	735	746	742	737	732	730	725	713	698	683	674	669	672	678	688	694	690	684	676	675	681	696
625	634	646	664	682	691	685	687	692	706	735	749	746	742	738	735	725	717	708	697	690	684	688	699	717	723	723	722	717	706	680	678
628	642	658	676	694	699	695	702	707	716	743	753	751	749	747	745	733	726	719	711	705	702	702	708	722	738	747	751	748	731	697	679

## IMAGEN SATELITAL USADA PARA LA MOELACIÓN



Fuente: Google Earth, versión gratuita.