

**SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE MATERIAL  
PARTICULADO, EMITIDO POR FUENTES FIJAS DE LA COMUNA  
CUATRO DE LA CIUDAD DE SANTIAGO DE CALI**

**NOHORA LUCIA URBANO BONILLA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
INGENIERÍA FÍSICA  
POPAYÁN  
2010**

**SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE MATERIAL  
PARTICULADO, EMITIDO POR FUENTES FIJAS DE LA COMUNA  
CUATRO DE LA CIUDAD DE SANTIAGO DE CALI**

**NOHORA LUCIA URBANO BONILLA**

**Trabajo de grado en modalidad de pasantía para optar al título de Ingeniera Física**

**Director:**

**MSc. Juan Pablo Silva Vinasco**

**Codirector:**

**Ing. Leonairo Pencue Fierro**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
INGENIERÍA FÍSICA  
POPAYÁN  
2010**



---

---

## AGRADECIMIENTOS

---

---

A Dios porque cada paso que di fue guiado por Él, por llevarme de la mano hacia este nuevo triunfo en mi vida, y ayudarme enfrentar mis dificultades, por bendecirme poniendo en mi camino la persona más importante en mi vida, mi mamá.

A ti mami hermosa Damar Bonilla Flórez, quien más que nadie se merece este triunfo, por ser esa personita que le da sentido a mi vida, por ser el pilar de ella y por impulsarme a seguir adelante día a día, porque con tus sacrificios haz hecho que me convierta en una mejor persona y que haya llegado donde estoy. Hoy quiero que recojas los frutos de lo que tú en tanto tiempo sembraste con amor y ejemplo. ¡Gracias mamá!

Al director Msc. Juan Pablo Silva por haberme abierto nuevamente las puertas para la culminación del proyecto, por su paciencia, y por brindarme sus conocimientos a lo largo de todo este tiempo.

Al Ingeniero Leonairo Pencue por todo su apoyo, colaboración y asesorías.

A los jurados, Ing. Ana Paola Lasso e Ing. Pablo Salazar por el tiempo dedicado para evaluar mi trabajo de grado y por sus sugerencias.

A la profesora Luz Elena Bolívar, por ser una persona incondicional que me ha brindado su apoyo en los momentos más difíciles.

Al profesor Luis Fernando Echeverri, por estar siempre pendiente de mí, por su aprecio todo este tiempo.

*Al profesor Carlos Aponte por su valiosa e indispensable ayuda en el transcurso de todo el proceso.*

*A mi gran amiga Paula Andrea Muñoz, por estar siempre a mi lado, por su apoyo incondicional y por ser quien es conmigo.*

*A Miguel Andrés Martínez, por llenar mi vida de amor y compartir conmigo tantas alegrías y tristezas.*

*A mis familiares porque de una forma u otra han estado pendientes a lo largo de mi carrera y me han apoyado en este nuevo logro.*

*A mis compañeros y allegados que todo este tiempo me han brindado su aprecio, y me han llenado de ánimo para no desfallecer.*

*A los profesores del Departamento de Física y administrativos que siempre me brindaron su colaboración, y su aprecio.*

---

---

## TABLA DE CONTENIDO

---

---

	Pág.
Introducción	10
1. Antecedentes	12
2. Problemática ambiental y Justificación	17
2.1. Planteamiento del problema	17
2.2. Justificación	18
3. Objetivos	20
3.1. Objetivo General	20
3.2. Objetivos Específicos	20
4. Marco teórico	21
4.1. Zona de estudio	21
4.1.1. Santiago de Cali	21
4.1.2. Comuna Cuatro	23
4.2. Contaminación atmosférica	24
4.2.1. Tipos de contaminantes	25
4.2.1.1. Contaminantes primarios	25
4.2.1.2. Contaminantes secundarios	26
4.2.2. Clasificación de las fuentes de contaminantes	29
4.2.3. Inventario de Emisiones	31
4.3. Modelación de contaminantes atmosféricos	33
4.3.1. Tipos de modelos	35
4.3.2. Modelo de dispersión gaussiana	38
5. Metodología	45
5.1. Primera etapa: Revisión Bibliográfica de diferentes modelos de dispersión atmosférica.	45
5.2. Segunda etapa: Matriz de Selección y selección del modelo a trabajar	45
5.3. Tercera etapa: Recopilación de información para alimentar el modelo	46
5.4. Cuarta etapa: Aplicación del modelo seleccionado y comparación con el modelo ISC3	46

6. Resultados	47
6.1. Modelos Consultados	47
6.2. Matriz de selección y modelo seleccionado	48
6.3. Recopilación de información para alimentar el modelo	50
6.3.1. Tipo de contaminante	52
6.3.2. Mapa base	52
6.3.3. Datos fuentes	53
6.3.4. Datos meteorológicos	53
6.3.4.1. Cálculos horas diurnas	55
6.3.4.2. Cálculos horas nocturnas	57
6.3.5. Datos de los receptores	60
6.4. Aplicación del modelo AERMOD y comparación con ISC3	61
6. Conclusiones	72
7. Recomendaciones	73
Bibliografía	74
Anexos	78

---

---

## LISTA DE TABLAS

---

---

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Principales características de los contaminantes criterio, primarios y secundarios	26
<b>Tabla 2.</b> Niveles máximos permisibles, concentración y tipo de exposición para contaminantes criterio, niveles de prevención, alerta y emergencia	28
<b>Tabla 3.</b> Criterios de estabilidad	59
<b>Tabla 4.</b> Características del modelo CALPUFF	78
<b>Tabla 5.</b> Características modelo BLP	81
<b>Tabla 6.</b> Características modelo CALINE3	82
<b>Tabla 7.</b> Características modelo CAL3QHC/CAL3QHC	84
<b>Tabla 8.</b> Características modelo CTDMPLU	86
<b>Tabla 9.</b> Características modelo OCD	87
<b>Tabla 10.</b> Características modelo ADAM	88
<b>Tabla 11.</b> Características modelo ADMS-3	89
<b>Tabla 12.</b> Características modelo AFTOX	90
<b>Tabla 13.</b> Características modelo ASPEN	90
<b>Tabla 14.</b> Características modelo DEGADIS	91
<b>Tabla 15.</b> Características modelo ISC3	91
<b>Tabla 16.</b> Características modelo PLUVUE II	93
<b>Tabla 17.</b> Características modelo SCIPUFF	93
<b>Tabla 18.</b> Características modelo SDM	94
<b>Tabla 19.</b> Características modelo SLAB	94
<b>Tabla 20.</b> Características modelo CDM	95
<b>Tabla 21.</b> Características modelo AERMOD	102



---

---

## LISTA DE FIGURAS

---

---

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Ubicación geográfica y política de Santiago de Cali	22
<b>Figura 2.</b> Comunas de Santiago de Cali	22
<b>Figura 3.</b> Límites de la Comuna Cuatro de Santiago de Cali	23
<b>Figura 4.</b> Clasificación de las fuentes de contaminación atmosférica	29
<b>Figura 5.</b> Representación esquemática de la modelación simple	33
<b>Figura 6.</b> Conexión entre los diversos módulos de un modelo de dispersión y su integración al proceso de toma de decisiones	35
<b>Figura 7.</b> Clasificación de modelos matemáticos para estimar la calidad del aire	36
<b>Figura 8.</b> Esquema representativo del modelado que produce la teoría gaussiana de pluma estacionaria	39
<b>Figura 9.</b> Dispersión de la columna en sentido vertical y la reflexión de los contaminantes en el nivel del suelo.	41
<b>Figura 10.</b> Datos necesarios para alimentar el modelo AERMOD BREEZE	51
<b>Figura 11.</b> Sección del mapa utilizado para la modelación, se muestra destacada la Comuna Cuatro	52
<b>Figura 12.</b> Concentración Aermod Breeze 1 marzo de 2006	61
<b>Figura 13.</b> Concentración ISC3 1 marzo de 2006	61
<b>Figura 14.</b> Concentraciones hora-hora Aermod Breeze 1 marzo de 2006	63
<b>Figura 15.</b> Concentración hora – hora para el 1 de marzo de 2006	64
<b>Figura 16.</b> Altura de mezcla 1 marzo de 2006	64
<b>Figura 17.</b> Temperaturas para el 1 de marzo de 2006	65
<b>Figura 18.</b> Concentración Aermod Breeze 1 marzo de 2006, velocidad del viento al doble	66
<b>Figura 19.</b> Concentración Aermod Breeze 1 marzo de 2006, velocidad del viento a la mitad	66
<b>Figura 20.</b> Concentración Aermod Breeze 1 agosto de 2006	67
<b>Figura 21.</b> Concentración ISC3 1 agosto de 2006	67
<b>Figura 22.</b> Concentración Aermod Breeze 1 marzo de 2010	68
<b>Figura 23.</b> Concentración Aermod Breeze 6 agosto de 2009	69

---

---

## LISTA DE ANEXOS

---

---

	Pág.
<b>Anexo 1.</b> Descripción de los modelos consultados	78
<b>Anexo 2.</b> Matriz de selección	97
<b>Anexo 3.</b> Modelo Seleccionado: AERMOD	102
<b>Anexo 4.</b> Datos de las fuentes suministrados al modelo	107
<b>Anexo 5.</b> Resultados obtenidos para los cálculos meteorológicos para el día 1 de marzo de 2006	109
<b>Anexo 6.</b> Formatos de archivo .SFC y .PFL	111

---

---

## RESUMEN

---

---

La contaminación atmosférica es uno de los problemas ambientales de mayor preocupación a nivel mundial. Colombia, y especialmente sus principales ciudades no son ajenas a esta problemática, es así como se ha identificado que la ciudad de Cali es la tercera ciudad que emite mayor cantidad de contaminantes, tales como material particulado, monóxido de carbono, óxidos de azufre y nitrógeno (MAVDT, 2005).

El presente trabajo se desarrolló con el objetivo de simular y evaluar la dispersión de material particulado emitido por fuentes fijas de la Comuna Cuatro de la Ciudad de Cali, mediante la selección y simulación del modelo de dispersión atmosférica AERMOD BREEZE, desarrollado bajo la plataforma de Windows. Para la ejecución del proyecto se llevaron a cabo diferentes etapas, la primera consistió en la revisión bibliográfica de diferentes modelos de dispersión atmosférica. En la segunda, con los modelos estudiados se creó una matriz de selección que permitió elegir el modelo más apropiado para la zona de estudio en la Ciudad de Cali. Con el modelo seleccionado se llevó a cabo la tercera etapa que consistió en recopilar información tanto meteorológica como de las 40 fuentes puntuales a modelar de la Comuna Cuatro, teniendo en cuenta periodos promedios de 24 horas. En la cuarta etapa se llevó a cabo la ejecución del modelo seleccionado y la comparación con la simulación del modelo ISC3, reportada por (Aponte, 2009), y se hicieron recomendaciones acerca de la reubicación de las estaciones de monitoreo más cercanas a la Comuna Cuatro. Con el fin de considerar los dos periodos estacionales: lluvioso y seco, se realizó la simulación para los días 1 de marzo y 1 de agosto del 2006, 6 de agosto de 2009 y 1 de marzo de 2010, obteniendo concentraciones de  $30.7 \mu\text{g} / \text{m}^3$ ,  $39.9 \mu\text{g} / \text{m}^3$ ,  $29.2 \mu\text{g} / \text{m}^3$  y  $39.8 \mu\text{g} / \text{m}^3$  respectivamente.

Los resultados obtenidos permitieron visualizar que la concentración de la dispersión de material particulado en la Comuna Cuatro, aunque se encuentra por debajo de la norma establecida, requiere de mayores estudios para mantener controladas las emisiones generadas. Los estudios deben incluir la Comuna Dos ya que es la zona predominante hacia donde se dirige el material particulado emitido por dichas fuentes, afectando la salud de los habitantes de esta zona.

---

---

## INTRODUCCIÓN

---

---

La contaminación atmosférica se define como la acumulación o concentración de contaminantes, definidos estos últimos como sustancias o elementos en estado sólido líquido o gaseoso, causantes de efectos adversos en el medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana que, solos o en combinación o como productos de reacción, se emiten al aire como resultado de la actividad humana, de causa naturales o de la combinación de estas.

La contaminación atmosférica, es una consecuencia del rápido crecimiento urbano, suele ser el resultado de acciones antrópicas como son el uso de combustibles fósiles, las actividades industriales y el transporte, contribuyendo al calentamiento global, cambio climático, deterioro de la capa de ozono y afectando la calidad de vida ocasionando enfermedades respiratorias. Por estas razones se hace necesario incorporar planes de Gestión de Calidad del Aire que garanticen niveles de inmisión aceptables (Paz, 2000).

Una herramienta para llevar a cabo la previsión y cuantificación del impacto ambiental atmosférico, es el uso de software de cálculo capaz de realizar una modelación y simulación suficientemente representativa de los procesos de emisión y dispersión de los contaminantes, en las dimensiones temporal y espacial, además de aplicar conocimientos sobre los procesos físicos y químicos que intervienen en el mismo (Paz, 2000).

Los modelos matemáticos de simulación del comportamiento de los contaminantes en la atmósfera se están utilizando como herramienta de apoyo desde hace mucho tiempo. Estos modelos son útiles en la estimación de la calidad del aire en aquellas zonas donde no se dispone de una red de vigilancia de contaminación atmosférica, o en aquellas zonas donde el registro no sea suficiente. Si bien es cierto que cualquier simulación matemática de un fenómeno tan complejo como lo es la dispersión atmosférica nunca es totalmente exacta. Los resultados de un modelo constituyen un instrumento válido para ser aplicado en la decisión de la planificación y en la adopción de medidas correctoras. Con ellos se identifica y se disciernen aquellas zonas con mayor incidencia de la contaminación atmosférica (Gipuzkoa, 2009).

Una entidad encargada de proteger la salud humana y el medio ambiente: aire, agua y suelo es la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos, EPA por sus siglas en inglés, la cual ha diseñado una serie de modelos para evaluar la contaminación atmosférica de una determinada zona, se clasifican en modelos recomendados y modelos alternativos. Entre los modelos recomendados se encuentra el más utilizado: “AERMOD”

AERMOD es un modelo Gaussiano de pluma en estado estacionario que simula la dispersión de los contaminantes en el aire, realiza sus cálculos tomando en cuenta las características del terreno y la presencia de edificios cercanos a la fuente de emisión que pudieran afectar la dispersión de la pluma; usa datos del clima de la capa superior atmosférica y se considera como modelo de la “siguiente generación”.

Apoyados en el modelo AERMOD BREEZE distribuido por la empresa K2 Ingeniería Ltda., se simuló el comportamiento de material particulado emitido por fuentes fijas de la comuna Cuatro de la Ciudad de Santiago de Cali, obteniendo concentraciones máximas en un periodo de 24 horas, las cuales se presentan mediante mapas de concentración elaborados con el programa BREEZE 3d Analyst (Demo).

El contaminante elegido para evaluar, fue el material particulado ya que se contaba con la información de las emisiones de las fuentes para este contaminante, además por ser el que ocasiona niveles apreciables de deterioro en la calidad del aire y afecta notablemente la salud del ser humano al entrar en las vías respiratorias.

En el documento se presenta una descripción acerca de la contaminación atmosférica, tipos de contaminantes y fuentes, revisión bibliográfica de los modelos de dispersión más representativos. Además de los datos y resultados obtenidos en la simulación para los periodos estacionales seleccionados, finalizando con las recomendaciones para la reubicación de estaciones de monitoreo cercanas a la Comuna Cuatro y un breve manual del modelo utilizado “AERMOD BREEZE”.

---

---

## 1. ANTECEDENTES

---

---

Desde inicios de 1950 se ha observado en los países de América Latina y el Caribe una preocupación por la contaminación del aire. En 1965, el Consejo Directivo de la Organización Panamericana de la Salud (OPS) recomendó a su Director el establecimiento de programas de investigación de la contaminación del aire, con el objeto de colaborar con los Gobiernos Miembros en el desarrollo de políticas adecuadas de control.

Al iniciar la OPS su programa regional, prácticamente ningún país conocía la magnitud real de sus problemas de contaminación atmosférica. Por medio del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), que iniciaba sus actividades, la OPS acordó establecer una red de estaciones de muestreo de la contaminación del aire.

La Red Panamericana de Muestreo Normalizado de la Contaminación del Aire (REDPANAIRES) inició sus operaciones en junio de 1967, con la recolección de muestras mensuales de polvo sedimentable (PS) y muestras diarias de partículas totales en suspensión (PST) y de óxido de azufre (SO<sub>2</sub>). La REDPANAIRES comenzó con ocho estaciones y a fines de 1973 tenía un total de 88 estaciones distribuidas en 26 ciudades de 14 países.

La lucha contra la contaminación del aire en México se inicia en 1971, pero las normas ecológicas establecidas no se vigilaron en forma adecuada y esta situación originó los niveles históricos de contaminación que se registraron a principios de la década de los 90. México tomó como modelo la ciudad de Los Ángeles y se empezaron a promover mecanismos legales y cambios que favorecieron un esquema ambiental con mayor preocupación por la ecología.

Hasta diciembre de 1973 se habían recogido más de 350,000 datos sobre la calidad del aire, los que indicaban que varias ciudades duplicaban y triplicaban los niveles de referencia recomendados. Algunas ciudades mostraban además una tendencia al incremento de los niveles de contaminación.

En 1980 la REDPANAIRE desapareció como tal y pasó a formar parte del Programa Global de Monitoreo de la Calidad del Aire, iniciado en 1976 por la OMS y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), como parte de un sistema global de monitoreo ambiental llamado GEMS por sus siglas en inglés Global Environmental Monitoring System.

Durante la década de 1980, varias de las áreas urbanas de la Región operaron redes extensas de monitoreo de la calidad del aire. Estas redes midieron los contaminantes del aire más comunes, incluidos el óxido de azufre (SO<sub>2</sub>), óxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), ozono (O<sub>3</sub>), plomo (Pb) y partículas totales suspendidas (PST). Debido a la escasez de recursos, existe una gran masa de datos pero con registros incompletos.

En la década de 1990, la OMS organizó, con carácter global, el Sistema de Información para el Control de la Calidad del Aire llamado AMIS por sus siglas en inglés Air Management Information System. En 1997, la red GEMS-Air desapareció como tal para integrarse al AMIS.

La contaminación atmosférica en las áreas urbanas de Centro América nació como un tema de interés público a partir del año 1993, cuando arrancó el programa llamado "Aire Puro". El Monitoreo de la calidad del Aire se estableció en Centro América como parte integral del programa Aire Puro, dicho programa, fue ejecutado por la Fundación Suiza de Cooperación para el Desarrollo Técnico (Swisscontact) y financiado por la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE). Así, a partir de 1994 los monitoreos de la calidad del aire empezaron en Guatemala, Honduras y Costa Rica, y en 1996 en el resto de los países. En el año 1996 los técnicos del programa Aire Puro decidieron comprar un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos, en respuesta al deseo crecido de no tener conocimientos sobre la calidad del aire únicamente en puntos estratégicos de las ciudades monitoreadas, sino que poder conocer la calidad del aire en toda el área urbana de cada ciudad. Con el producto ImmProg, perteneciendo a la familia de modelos gaussianos, se pensaba hacer tanto extrapolaciones territoriales hacia toda el área urbana como pronósticos temporales hacia el futuro (Blazer, 2000).

Con el fin de consolidar en una sola agencia una variedad de actividades federales de investigación, monitoreo, establecimiento de estándares y acatamiento para asegurar la protección medioambiental se creó la EPA, cuya misión es proteger la salud humana y salvaguardar el medio ambiente natural, el aire, el agua, y la tierra.

Para cumplir con dicha misión se crean como herramientas de ayuda los modelos de contaminación atmosférica, entre los que se destaca el modelo de dispersión AERMOD. El 21 de abril de 2000, la EPA propuso que AERMOD fuera adoptado como el modelo regulador preferido del EPA para terreno simple y complejo a escala local, en sustitución del ISCST3, hasta el momento usado. Entre octubre y noviembre de 2005, AERMOD fue adoptado por la EPA como modelo de uso recomendado para la dispersión de contaminantes y fue promulgado como modelo regulador preferido, eficaz en el día 9 de diciembre de 2005. El proceso de desarrollo y de la adopción tomó 14 años.

Colombia tiene una larga tradición en materia de acciones para el control de la contaminación del aire: en 1967 se instalaron las primeras redes para el monitoreo. Existen 15 autoridades ambientales con redes de monitoreo en operación, localizadas en los principales centros urbanos del país, las cuales en conjunto cuentan con 102 estaciones. A pesar de la realización de labores de monitoreo en Colombia desde los años sesenta, las autoridades ambientales y de salud no han tenido la capacidad para coleccionar y utilizar la información generada. En general, no es posible determinar tendencias en relación con la calidad del aire, debido a que en la mayor parte de las ciudades el monitoreo y la interpretación de la información han sido discontinuos (MAVDT, 2005).

### **Guías y normas de calidad del aire**

Las guías de la calidad del aire son recomendaciones sobre los niveles de exposición a contaminantes atmosféricos para reducir o proteger de los riesgos nocivos. Las normas son las concentraciones máximas permisibles de los contaminantes atmosféricos durante un período definido. Son los valores límite diseñados con un margen de protección ante los riesgos.



En 1987, la OMS publicó las guías de calidad del aire para Europa. En 1993 se revisaron estas guías. Actualmente, la OMS está en el proceso de publicar las guías globales sobre calidad del aire (Korc, 1999).

En Colombia no hay un sistema de evaluación único y sistemático que permita mantener una visión completa sobre lo que está ocurriendo en el tema del medio ambiente, aunque en los últimos años la preocupación por la calidad de vida de los habitantes ha logrado que el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo adelante normativas relacionada con las variables que afectan la calidad del aire de los principales centros urbanos y corredores industriales (Escobar, 2007). El Gobierno Nacional, a través del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, expidió el Decreto 979 del 3 de abril de 2006, que establece nuevos y más estrictos parámetros para garantizar la calidad del aire en Colombia.

La Resolución 601 del 4 de abril de 2006 del Ministerio de Ambiente reduce niveles máximos permisibles de contaminantes atmosféricos y establece la norma de calidad de aire. La norma, que tiene cobertura y obligatoriedad en todo el territorio nacional, indica igualmente que con el fin de establecer un control efectivo sobre las fuentes de emisiones, las autoridades ambientales regionales y locales deben estructurar planes de descontaminación y planes de contingencia, concertados con las autoridades de salud, transporte y sectores de la producción. Se busca la estandarización de la forma como se mide y se cuantifica la contaminación en el país para asegurar la calidad de la información y la comparabilidad nacional.

En el artículo segundo de la Resolución 610 del 24 de marzo de 2010 (el cual comienza a regir en Enero del 2011), se modifica en el Artículo 4 de la Resolución 601 de 2006, el cual queda de la siguiente manera: *Niveles Máximos Permisibles para Contaminantes Criterio*.

La preocupación por la contaminación atmosférica ha ido creciendo con el tiempo, y alrededor del mundo se ha empezado a trabajar para disminuir los altos índices de contaminantes que son emitidos a la atmósfera.

Sozzi y Ruiz en el año 1998, elaboraron para el IDEAM la implementación de una metodología para la Meteorología y la Micro-meteorología de dispersión de los contaminantes del aire, la cual constituye una guía para el cálculo de la Capa Límite Planetaria. Ruiz (2002), realizó una simulación de la contaminación atmosférica generada por fuentes móviles en Bogotá, presentando la distribución de concentraciones promedios de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles, partículas menores a 10 micras y dióxido de carbono cerca de la superficie en la ciudad de Bogotá. Igualmente, Benavides (2003), realizó un pronóstico de la concentración de material particulado por chimeneas industriales en Bogotá, utilizando el modelo ISCST3.

Bustos en el año 2004, realizó una aplicación de modelos de dispersión atmosférica en la evaluación de impacto ambiental en Santiago de Chile para recopilar antecedentes fundados e identificar oportunidades de mejorar el uso y evaluación de modelos.

Caputo en el año 2005, realizó un estudio comparativo entre los modelos de dispersión utilizados para el transporte de contaminantes en la atmósfera en Estados Unidos. Los modelos analizados fueron ISC3, AERMOD, HPDM e HYSPLIT.

Arregocés en el año 2008, implementa un Protocolo de Vigilancia y Seguimiento de Calidad del Aire del IDEAM, en forma de herramienta metodológica para determinar la evaluación del impacto ambiental generado sobre el recurso aire en la Sociedad Portuaria de Santa Marta, apoyado en el modelo de dispersión AERMOD.

El centro de gestión de residuos de Gipuzkoa en el año 2009, estudió el impacto de la contaminación ambiental por olores para determinar si la calidad del aire, en el ámbito de olores de los núcleos urbanos cercanos pueden verse afectados, se utilizó el modelo de dispersión ISC-AERMOD, desarrollado por la EPA

---

---

## 2. PROBLEMÁTICA AMBIENTAL Y JUSTIFICACIÓN

---

---

### 2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La ciudad de Cali es una de las principales ciudades del país, con aproximadamente 2'342.000 habitantes, un parque automotor constituido por 339.000 vehículos, cuenta con 350 industrias aproximadamente adscritas al programa de control de impactos ambientales del Departamento de Gestión del Medio Ambiente DAGMA (MAVDT, 2005).

Debido al desarrollo industrial y al incremento en el parque automotor, la ciudad de Santiago de Cali presenta una alta emisión de contaminantes a la atmósfera como: material particulado, óxidos de carbono, de azufre y nitrógeno, entre otros, que al entrar en contacto con la meteorología local contribuyen a incrementar la contaminación atmosférica, afectando el entorno ambiental y la salud humana.

Según información suministrada en entrevista realizada por el DAGMA al coordinador del área de Medio Ambiente en la Comuna Cuatro, esta zona presenta problemas ambientales que se derivan, en gran medida, del uso mixto de sus suelos, que combina actividades residenciales con actividades industriales y comerciales, además del tránsito vehicular. La mayoría de fábricas en este conocido sector industrial liberan al aire grandes cantidades de material particulado. El uso inadecuado de productos químicos, pinturas y solventes, utilizados en talleres ubicados en zonas públicas sin ninguna medida de seguridad e higiene industrial, causan problemas respiratorios severos (Escobar, 2007).

La solución a esta problemática no es el traslado de las industrias sino el control de sus actividades contaminantes por medio de planes de manejo, inversión en tecnologías limpias y en dispositivos de control de la contaminación (DAGMA, 1997). Esta cuestión crea la necesidad de implementar un programa de Gestión de la Calidad del Aire (GCA), cuyo objetivo es prevenir la contaminación atmosférica de las zonas urbanas ([www.cali.gov.co](http://www.cali.gov.co)).

Una herramienta del programa de Gestión de la Calidad del Aire, es la modelación, la cual es eficaz ante la falta de efectividad en los controles ambientales aplicados a las industrias y fuentes móviles, ya que no existe la suficiente información de disponibilidad continua sobre el comportamiento de la contaminación en la zona a estudiar ([www.cali.gov.co](http://www.cali.gov.co)).

Debido a estas razones se hace necesario evaluar la dispersión de material particulado, emitido por fuentes fijas en la Comuna Cuatro, utilizando una herramienta de simulación como son los modelos de contaminación atmosférica. Una constante exposición a este contaminante puede llegar a ocasionar daños en construcciones, plantas, animales y en el ser humano la muerte.

## **2.2. JUSTIFICACIÓN**

La contaminación de aire ha tenido lugar dentro y alrededor de las zonas urbanas e industriales. La gravedad de la contaminación atmosférica para las comunidades urbanas, ha conducido a la puesta en práctica de medidas nacionales de control, aunque el control de la contaminación del aire no siempre es fácil, porque no es práctico eliminar todas las emisiones de un contaminante específico.

En la ciudad de Santiago de Cali también ha surgido la preocupación por la contaminación atmosférica que se viene presentando, por lo que se llevan a cabo monitoreos del aire cuyo objetivo es la investigación y confrontación de los niveles de contaminación medidos, contra los niveles máximos permisibles establecidos en la legislación, con el fin de conocer la concentración de cada contaminante en el aire que pueda ser respirado por los ciudadanos y afectar el medio ambiente. Es necesario conocer los tipos de contaminantes emitidos por los diferentes focos y los fenómenos meteorológicos que afectan la dispersión de los mismos.

Las estaciones de monitoreo están compuestas por equipos que toman muestras para posteriormente ser analizadas en el laboratorio, y por sensores automáticos, alojados en cabinas remotas, capaces de medir en continuo y almacenar los datos en sus equipos de adquisición, para posteriormente ser analizados.

Infortunadamente, el monitoreo de la calidad del aire implica altos costos y en muchas ocasiones no se llega a una cobertura del cien por ciento en un área urbana, por lo que deben utilizarse otros mecanismos para predecir la calidad del aire.

Uno de tales mecanismos es la modelación de contaminantes atmosféricos que permite determinar resultados o predecir los cambios en la calidad del aire causados por un conjunto de fuentes emisoras en una determinada área.

De esta manera los resultados obtenidos servirán como base para la toma de dediciones en el tema de la calidad del aire en la ciudad de Cali y en la posible reubicación de las estaciones de monitoreo para un mejor control de la contaminación atmosférica.

---

---

### 3. OBJETIVOS

---

---

#### 3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la dispersión de material particulado, emitido por fuentes fijas en la comuna cuatro de la ciudad de Santiago de Cali, por medio de la simulación de un modelo de dispersión de contaminación atmosférica.

#### 3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar modelos matemáticos de dispersión de contaminantes atmosféricos que sean de libre distribución, para evaluar la dispersión de contaminantes atmosféricos en la ciudad de Cali, la Comuna Cuatro, y con ellos crear una Matriz de Selección.
- Elegir, de la Matriz de Selección, el modelo que cumpla con los criterios de búsqueda establecidos y que se acomode a las condiciones para la ciudad de Cali.
- Simular el modelo seleccionado, con los resultados obtenidos en el inventario de emisiones, para así evaluar la dispersión atmosférica del material particulado, en la Comuna Cuatro de la Ciudad de Cali.
- Realizar una comparación entre los resultados obtenidos de la simulación y los arrojados por el modelo ISC3, para así sacar conclusiones acerca de una mejor reubicación de las estaciones de monitoreo cercanas a la Comuna Cuatro de la Ciudad de Cali.

---

---

## 4. MARCO TEÓRICO

---

---

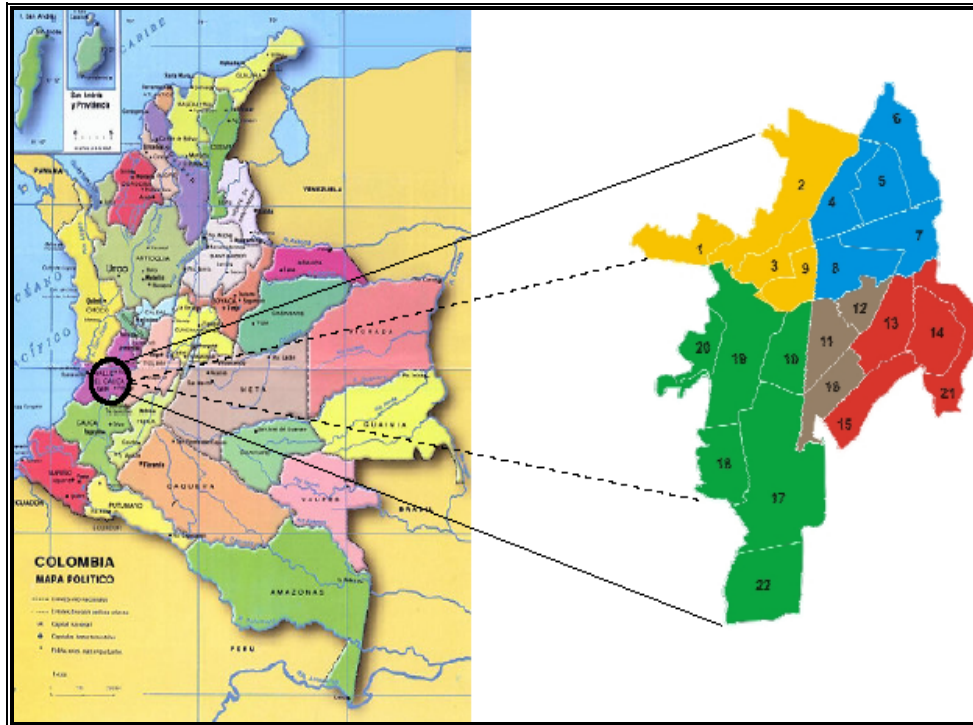
### 4.1. ZONA DE ESTUDIO

#### 4.1.1. Santiago de Cali

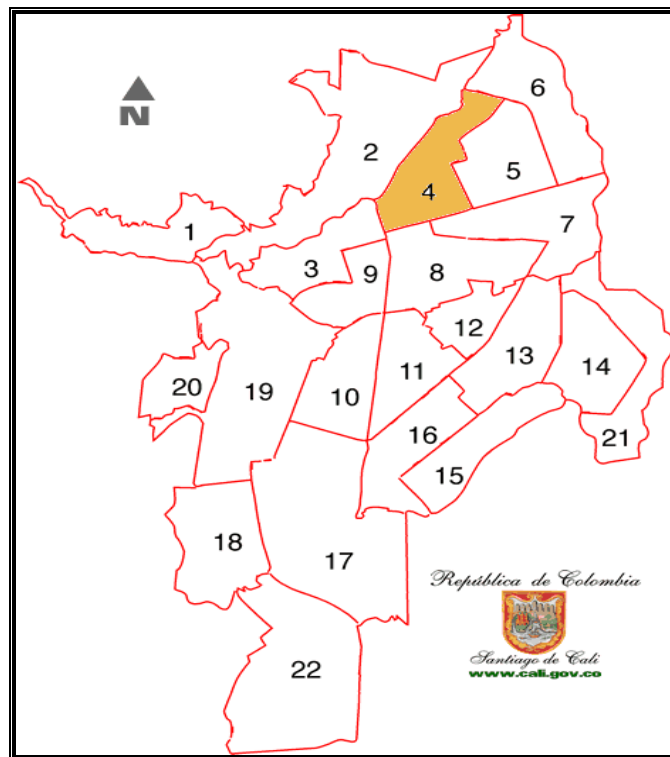
El municipio de Santiago de Cali es la tercera ciudad en importancia del país, es la capital del Departamento de Valle del Cauca y está ubicada al sur del Departamento. Limita al Occidente con los farallones de Cali de la cordillera occidental colombiana y los municipios de Buenaventura y Dagua, al Norte con Yumbo y la Cumbre, al Sur con Jamundí y al Oriente con Palmira y Candelaria (Departamento Administrativo de Planeación, 2009).

Geográficamente se encuentra ubicado a 3° 27'26" de latitud Norte y 73° 31'42" longitud Oeste (W), entre los 950 y 4.200 m.s.n.m, con una temperatura promedio de 25°C y una precipitación anual de 1682.6 mm. Su territorio comprende un área total de 560.3 Km<sup>2</sup>, está constituido por un área urbana (120.9 Km<sup>2</sup>) que corresponde al 22% del total del área del municipio, distribuida en 22 comunas y 15 corregimientos (437.2 Km<sup>2</sup>), cuenta con una población total de 2.219.633 habitantes, de los cuales 2.183.116 pertenecen a la zona urbana y 36.517 a los corregimientos (Departamento Administrativo de Planeación, 2009).

El municipio de Cali debido a su proximidad a la zona ecuatorial, no tiene variaciones estacionales importantes, está regido por los principales sistemas de circulación atmosférica, por esta razón ocurren períodos muy marcados de mayores y menores lluvias generadas básicamente por el desplazamiento de la zona de convergencia intertropical. El régimen de precipitación media mensual presenta a lo largo del año una distribución muy bien definida con dos períodos húmedos que corresponden a los meses Marzo-Abril-Mayo y Octubre-Noviembre-Diciembre y dos períodos secos correspondientes a los meses de Enero-Febrero y Junio-Julio-Agosto-Septiembre (Departamento Administrativo de Planeación, 2009).



**Figura 1.** Ubicación Geográfica y división política de Santiago de Cali  
 Fuente: <http://santiago.cali.net/hc3.asp>



**Figura 2.** Comunas de Santiago de Cali  
 Fuente: <http://santiago.cali.net/hc3.asp>





La comuna fue declarada zona mixta siendo considerada industrial, comercial y residencial, creando dinámicas que producen impactos en el medio ambiente de complejo manejo. El subempleo característico de la ciudad, ha generado en la comuna actividades de comercio ilegal y pequeña empresa sobre las cuales es muy difícil ejercer control de impactos ambientales, si bien las empresas están en procesos de prevención y control de sus impactos ambientales, la comunidad considera que todavía se presentan violaciones a las normas de protección de los recursos. Además esta comuna no solo se encuentra afectada por las emisiones de las fuentes fijas, sino también por fuentes móviles que se encuentra cerca de un corredor vial importante que comunica el interior de la ciudad con los municipios vecinos. (DAGMA, 1997)

#### **4.2. CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA**

La palabra atmósfera se origina en los vocablos griegos “*atmos*” que significa vapor y “*sphaira*” que corresponde a esfera. Es decir, se refiere al envoltorio, mayoritariamente gaseoso, que rodea a nuestro planeta. Este envoltorio tiene un espesor de no más de 1.5% de los aproximadamente 6200 Km. del radio de la tierra. En ella se producen todos los fenómenos climáticos y meteorológicos que afectan al planeta, regula la entrada y salida de energía de la tierra y es el principal medio de transferencia del calor. Está compuesta de gases y de partículas sólidas y líquidas en suspensión atraídas por la gravedad terrestre, principalmente por nitrógeno molecular ( $N_2$ ) y oxígeno molecular ( $O_2$ ) en proporciones de alrededor de 78% y 21% en volumen, respectivamente. El resto está formado por argón (Ar), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y otras especies en variados estados de agregación que, por sus ínfimas cantidades se denominan trazas atmosféricas. Son estas trazas atmosféricas, junto al  $O_2$  y al relativamente abundante  $CO_2$ , las que definen las propiedades químicas y radiactivas de nuestra atmósfera y las que interconectan los sistemas bióticos y abióticos estableciendo las condiciones para la vida.

Esta fracción de la composición de la atmósfera se ha visto fuerte y rápidamente alterada por las actividades humanas en los últimos dos siglos, teniendo ello consecuencias sobre la calidad de vida de las personas, los ecosistemas en general y el sistema climático en su conjunto (Bustos, 2004).

Entre las definiciones aceptadas de contaminación atmosférica se da la siguiente: “Es la presencia de ciertas sustancias en la atmósfera que resultan de la actividad del hombre o de procesos naturales en concentraciones lo suficientemente elevadas y de tal duración sobre el nivel ambiental natural, que producen efectos negativos para la salud del hombre, la fauna y en general en el medio ambiente”. Estas sustancias pueden tener un origen natural (volcanes, océanos, etc.), o pueden ser introducidas por actividades humanas (antropogénicas) (Derek, 1997).

La contaminación del aire ocurre tanto en exteriores (ambiental) como en interiores, y resulta de una compleja mezcla de miles de fuentes, que van desde las chimeneas industriales y los vehículos automotores, hasta el uso individual de productos de aseo, limpiadores domésticos y pinturas; incluso la vida animal y vegetal puede desempeñar un papel importante en el problema.

Debido a la contaminación atmosférica que se presenta principalmente en las ciudades, se necesitan implementar acciones para mejorar la calidad del aire de las mismas y proteger la salud de sus habitantes, siendo el primer paso el de medir cuál es esta calidad del aire, determinando sus causas y evaluando sus efectos y los problemas fundamentales que se presentan, para así poder diseñar un plan acorde con ellos (MAVDT, 1995).

#### **4.2.1. Tipos de contaminantes**

En general, un contaminante del aire puede definirse como cualquier sustancia no deseada, emitida a la atmósfera que altere la composición natural del aire y pueda ocasionar efectos adversos en seres humanos, animales, vegetación o materiales. La sola presencia de un contaminante en el aire no es suficiente para definir la calidad del aire, sino que debe conocerse la cantidad en que éste está presente, pues de su valor dependerá que provoque o no efectos nocivos a la salud ([www.Bvsde.ops-oms.org](http://www.Bvsde.ops-oms.org)).

Acorde con su naturaleza los contaminantes pueden clasificarse en:

**4.2.1.1. Contaminantes primarios:** son aquellos emitidos directamente a la atmósfera por las fuentes antropogénicas o naturales y mantienen la misma forma química, por ejemplo: el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno y azufre, NO y NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>,

partículas, PM, aerosoles, y otros menos frecuentes como halógenos y sus derivados (Cl<sub>2</sub>, HF, HCl, haluros,...), arsénico y sus derivados, ciertos componentes orgánicos, metales pesados como Pb, Hg, Cu, Zn, etc y partículas minerales (asbesto y amianto) (Piernagorda, 2006).

**4.2.1.2. Contaminantes secundarios:** no se vierten directamente a la atmósfera sino que se producen como consecuencia de transformaciones y reacciones químicas de los contaminantes primarios, a lo largo de su transporte hasta su deposición, por ejemplo: el ozono (O<sub>3</sub>) y el peroxi-acetilnitrilo (PAN), cetonas, ácidos, peróxido de hidrógeno, nitrato de peroxiacetilo, radicales libres y otras de diverso origen como sulfatos (del SO<sub>x</sub>) y nitratos (del NO<sub>x</sub>) (Piernagorda, 2006).

Un contaminante criterio es aquel considerado perjudicial para la salud y el bienestar de los seres humanos. Se les denominó contaminantes criterio porque fueron objetos de estudios de evaluación publicados en documentos de criterios de calidad del aire. Los contaminantes definidos así son: monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), oxidantes fotoquímicos: ozono (O<sub>3</sub>), plomo (Pb), y material particulado (PM). Es importante considerar que éstos no son los únicos contaminantes, pero sí son aquéllos a los que internacionalmente la gestión ambiental ha dado mayor atención, regulando las concentraciones máximas permisibles en la atmósfera para cada uno de ellos (Bustos, 2004).

En la tabla 1 se indican las principales características de los contaminantes antes mencionados:

**Tabla 1.** Principales características de los contaminantes criterio, primarios y secundarios

CONTA-MINANTE	CARACTERÍSTICAS	FUENTE EMISORA	EFFECTOS PERJUDICIALES PARA LA SALUD
Monóxido de Carbono (CO)	Gas incoloro e inodoro, inflamable, toxico y muy estable. Concentración > 750ppm, puede provocar la muerte	Combustión incompleta de combustibles fósiles, oxidación de metano, gran cantidad es producida por vehículos.	Afecta el suministro de oxígeno en el torrente sanguíneo, disminución en la percepción visual y auditiva, pérdida de la capacidad sensorial, motora y de vigilancia, dolor de cabeza, decaimiento, mareo, náusea, debilidad, confusión, colapso durante el ejercicio, pérdida de conciencia y muerte.

CONTA-MINANTE	CARACTERÍSTICAS	FUENTE EMISORA	EFFECTOS PERJUDICIALES PARA LA SALUD
Óxidos de Azufre (SO <sub>x</sub> )	Se refiere a los óxidos de este elemento. SO <sub>2</sub> , gas incoloro, que en la atmósfera se puede oxidar a tritóxido de azufre y luego a ácido sulfúrico.	Combustión de combustibles fósiles que contienen azufre	Posible incremento de los síntomas respiratorios (tos, irritación de la garganta y silbidos en el pecho, goteo de la nariz y falta de aliento) en personas con asma. Posible agravamiento de las personas con enfermedades pulmonares y cardíacas.
Óxidos de Nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	Entre los más representativos están el ácido nítrico (NO), y dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ). Son precursores del ozono y son eliminados de la atmósfera por depositación seca y húmeda	En la naturaleza: descomposición bacteriana de nitratos orgánicos, incendios forestales y de pastos, y la actividad volcánica. Antropogénicamente: escapes de los vehículos y quema de combustibles fósiles.	La exposición al NO <sub>2</sub> puede ocasionar irritación del tracto respiratorio, incremento de la resistencia de las vías aéreas, aumento de la hiperreactividad bronquial, si la exposición se prolonga, puede causar disminución de la función pulmonar.
Material Particulado (PM)	Las partículas son cualquier sustancia sólida o líquida que se encuentra suspendida en el aire, como hollín, polvos, aerosoles, humos o neblinas.  El material particulado se divide en: • Partículas totales (PST) < 100 µm ♦ Partículas suspendidas (PS) < 30 µm • PM <sub>10</sub> , partículas < 10 µm • PM <sub>2.5</sub> , partículas < 2.5 µm	En la naturaleza: procesos tales como el viento, polinización de plantas e incendios forestales. Antropogénicamente: quema de combustibles sólidos como la madera y el carbón, actividades agrícolas como la fertilización y almacenamiento de granos y la industria de la construcción.	El pequeño tamaño de las PM <sub>10</sub> ó las PM <sub>2.5</sub> les permite entrar fácilmente en los alvéolos pulmonares donde se pueden depositar causando efectos adversos sobre la salud. Las partículas pueden causar tos, jadeos y cambios, tanto en la función respiratoria, como en el pulmón mismo, disminución capacidad respiratoria, afecta la visibilidad.
Plomo (Pb)	Metal pesado, tóxico, de baja temperatura de fusión, color gris-azulado. Generalmente se encuentra combinado con otros dos o más elementos formando compuestos de plomo. El plomo no se consume en la combustión por lo que se emite como material particulado.	Ocurre naturalmente en la corteza terrestre. Sin embargo, raramente se encuentra en la naturaleza en la forma de metal. Anteriormente se hallaba en las pinturas, soldaduras, grifería cromada y combustibles.	Es de difícil remoción en el cuerpo humano dañando el sistema nervioso central irreversiblemente. La intoxicación aguda produce diarrea, vómito, convulsiones y dolor de cabeza, puede producir anemia y debilidad en dedos, muñecas y tobillos. Altos niveles de exposición causan infertilidad y hasta la muerte.

CONTA-MINANTE	CARACTERÍSTICAS	FUENTE EMISORA	EFFECTOS PERJUDICIALES PARA LA SALUD
Ozono (O <sub>3</sub> )	Gas toxico y reactivo	Es el oxidante fotoquímico más abundante, no se emiten directamente a la atmósfera si no que se forman por las reacciones químicas entre los hidrocarburos y los NO <sub>x</sub> en presencia de luz solar.	Puede ocasionar disminución en la función pulmonar, respiración rápida y poco profunda, bronquitis y el enfisema, tos y dolor de cabeza.

Fuente: Bustos, 2004

En la tabla 2, se presentan los niveles máximos permisibles a condiciones de referencia para contaminantes criterio establecidos por la Resolución 601 del Ministerio de Ambiente, los cuales se calculan con el promedio geométrico para PST y promedio aritmético para los demás contaminantes. Además de la declaración de los niveles de prevención, alerta y emergencia (MAVDT, 2006).

Tabla 2. Niveles máximos permisibles, concentración y tiempo de exposición para contaminantes criterio, niveles de prevención, alerta y emergencia

Contaminante	Nivel Máximo Permissible ppm ( $\mu\text{g} / \text{m}^3$ )	Tiempo de Exposición	Estados Excepcionales		
			Prevención ( $\mu\text{g} / \text{m}^3$ )	Alerta ( $\mu\text{g} / \text{m}^3$ )	Emergencia ( $\mu\text{g} / \text{m}^3$ )
PST	100 300	Anual 24 horas	375	625	875
PM <sub>10</sub>	70 150	Anual 24 horas	300	400	500
SO <sub>2</sub>	0.031 (80) 0.096 (250) 0.287 (750)	Anual 24 horas 3 horas	0.191 (500)	0.382 (1000)	0.612 (1600)
NO <sub>2</sub>	0.053 (100) 0.08 (150) 0.106 (200)	Anual 24 horas 1 hora	0.212 (400)	0.425 (800)	1.064 (2000)
O <sub>3</sub>	0.041 (80) 0.061 (120)	8 horas 1 hora	0.178 (350)	0.356 (700)	0.509 (1000)
CO	8.8 (10) 35 (40)	8 horas 1 hora	14.9 (17)	29.7 (34)	40.2 (46)

Fuente: MAVDT, 2006

## 4.2.2. Clasificación de las fuentes de contaminación

Las fuentes se pueden clasificar como el esquema mostrado en la figura 4:

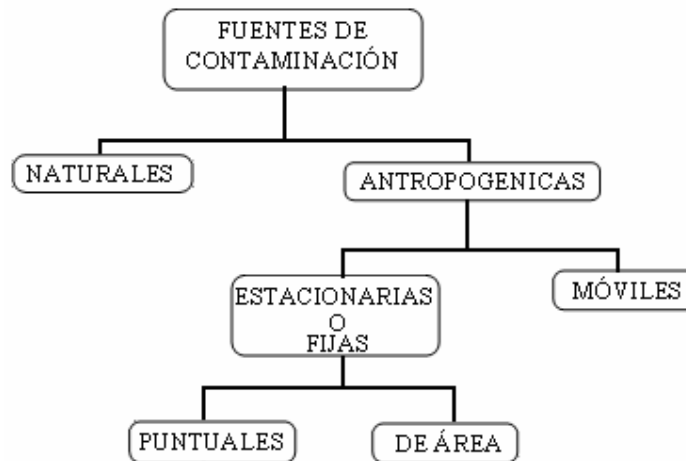


Figura 4. Clasificación de las fuentes de contaminación atmosférica.

### 4.2.2.1. Fuentes naturales

Se consideran fuentes naturales aquellas fuentes que emiten contaminantes a la atmósfera sin la intervención del hombre, es decir que son procedentes de la propia naturaleza, debido a eventos meteorológicos, geológicos y/o procesos metabólicos. En este tipo de fuentes se encuentran los suelos erosionados, las emisiones volcánicas ( $\text{SO}_x$ , partículas), las emisiones generadas por los incendios forestales ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , partículas), por la cría de ganado y por procesos metabólicos y descomposición de la vegetación (hidrocarburos, polen, metano, sulfuro de hidrogeno).

La erosión del viento es otro fenómeno natural que genera emisiones. Sin embargo, debido a que dichas emisiones se asocian por lo general con tierras alteradas a veces se les trata como fuentes de área. Otras categorías más pequeñas de fuentes naturales incluyen a las termitas ( $\text{CH}_4$ ), los relámpagos ( $\text{NO}_x$ ) y los volcanes y alguna otra actividad geotérmica ( $\text{SO}_x$ ) (IDEAM, 2005)

### 4.2.2.2. Fuentes antropogénicas

Las fuentes antropogénicas son aquellas que tienen su origen en las actividades humanas. Se clasifican en estacionarias y móviles.

- **Fuentes Estacionarias o fijas**

Los contaminantes de fuentes estacionarias provienen principalmente de dos actividades: la combustión de carbón y petróleo en plantas de generación de energía y la pérdida de contaminantes en procesos industriales. Los procesos industriales incluyen refinerías, industrias químicas y fundiciones.

Existen muchos puntos específicos de emisión dentro de una fuente estacionaria que contamina el aire. Por ejemplo, en una industria química, los contaminantes del aire pueden emitirse de conductos de ventilación, tanques de almacenamiento, manejo de aguas residuales, áreas de tratamiento, instalaciones de carga y descarga, y fugas en el equipo (INE, 2003)

Estas fuentes estacionarias se dividen a su vez en fuentes puntuales y en fuentes de área.

**Fuentes puntuales:** Una fuente es considerada puntual cuando su área de emisión es mucho menor que el área de dispersión. Se asemejan para tal efecto las instalaciones industriales que expulsan contaminantes a través de chimeneas, para cada fuente se tienen coordenadas geográficas fijas (INE, 2003)

**Fuentes de área:** Su área de emisión es mucho mayor que el área de dispersión, por ejemplo todos aquellos establecimientos o lugares donde se desarrollan actividades que de manera individual emiten cantidades relativamente pequeñas de contaminantes, pero en conjunto sus emisiones representan un aporte considerable de contaminantes a la atmósfera y que no llegan a considerarse como fuentes puntuales. Los principales contaminantes que emiten son los compuestos orgánicos volátiles, además de los gases de combustión. En esta categoría se incluyen la mayoría de los establecimientos comerciales y de servicios y los hogares. Como ejemplo, se pueden mencionar a las panaderías, tintorerías, fabricación de tabiques, uso de combustibles y productos en el hogar, uso de pinturas y tintas, manejo de maquinaria de construcción, tractores, locomotoras, extracción de arena y grava y almacenamiento de combustibles, entre otros (Piernagorda, 2006).



- **Fuentes móviles**

Es aquella fuente que utiliza elementos de combustión y que genera emisiones de contaminantes al ambiente al moverse de un sitio a otro, por ejemplo todo vehículo automotor que transita por vías de circulación como calles, carreteras, caminos y avenidas, motocicletas, aviones, barcos, trenes, tractores, etc. (Piernagorda, 2006).

#### **4.2.3. Inventario de emisiones**

Los inventarios de emisiones son listados detallados de contaminantes emitidos por fuentes específicas en una determinada área. El inventario de emisiones es un componente clave de todo programa de Gestión de la Calidad del Aire. Es una herramienta valiosa de planificación y evaluación que se usa para identificar fuentes que están sujetas a posibles medidas de control, y su relación con las comunidades vecinas, contribuyendo al desarrollo de estrategias alternativas para el control de la contaminación y proporcionar información concisa sobre contaminantes, fuentes y emisiones, con dicha información se podrá predecir futuros niveles de calidad del aire a través de modelación.

Antes de desarrollar estrategias para mejorar la calidad del aire, se debe recopilar información sobre las emisiones para determinar los tipos de fuentes de emisiones, cantidades de contaminantes emitidos, características temporales y espaciales de las fuentes, procesos y prácticas de control de emisiones que usan las fuentes en la región.

Entre los objetivos de un inventario están:

- Identificar y cuantificar las emisiones de diferentes tipos de contaminantes.
- Determinar la tasa de descarga en plantas industriales.
- Evaluar la contaminación en un área geográfica específica
- Cuantificar el nivel de emisiones por sector industrial
- Verificar tipos de procesos y de tecnologías existentes en el área.
- Ayudar a tomar decisiones y planear estrategias a utilizar en el caso de presentarse problemas ambientales (Jaramillo, 2005)

Las metodologías utilizadas en el inventario de emisiones son:

**Factores de emisión:** Un factor de emisión es razón que relaciona la cantidad de contaminante liberado a la atmósfera por unidad de actividad. Por ejemplo: los kilogramos de dióxido de azufre emitidos por tonelada de acero producido.

Los factores de emisión se usan a menudo para calcular las emisiones cuando los datos de monitoreo de chimeneas específicos del sitio no están disponibles. En el caso de las fuentes de área, el factor considera la cantidad de materia prima consumida, la cantidad de producto elaborado, el consumo de combustible, el número de empleados y la densidad de población, entre otros datos.

**Balances de masa:** también conocido como balance de materiales, es un método muy utilizado para estimar las emisiones de muchas categorías de fuentes. El método de balance de masa puede usarse en los casos en que no hay datos disponibles de muestreos en la fuente, factores de emisión u otros métodos desarrollados.

El uso de un balance de materiales implica el análisis de un proceso para determinar si las emisiones pueden ser estimadas solamente con el conocimiento de los parámetros específicos de operación y de las composiciones de los materiales.

**Muestreos isocinéticos:** El muestreo isocinético es un método de toma de muestra de material particulado o de metales en suspensión en una corriente de gas para determinar su concentración, de tal modo que la velocidad de muestreo (velocidad y dirección del gas entrando al conducto de toma de muestra) sea la misma que la de la corriente gaseosa en el punto de muestreo. Para ello es necesario medir la velocidad del gas.

**Encuestas:** Son cuestionarios utilizados para obtener información concerniente a las actividades de una industria las cuales están asociadas a la emisión de contaminantes atmosféricos.

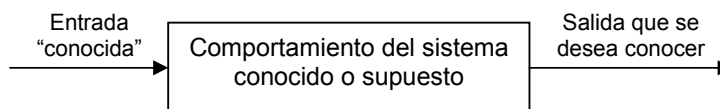
### 4.3. MODELACIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Los modelos de dispersión atmosférica son ecuaciones matemáticas que pronostican teóricamente (simulan o modelan) el movimiento de sustancias químicas en el aire, es decir la concentración en muchos puntos alrededor de la fuente de emisión. Este movimiento también se conoce como dispersión puesto que las sustancias químicas se dispersan una vez liberadas en el aire (Seinfeld, 1978)

Dependiendo del modelo a utilizar se requerirá información relacionada con el inventario de emisiones de la zona y en algunos casos de las características y parámetros particulares de operación de los equipos, tales como: tipos de calderas, tanques de almacenamiento, tipo de locomotoras, tipo de combustibles utilizados, kilómetros recorridos y características fisicoquímicas de los materiales entre otros; así mismo, los modelos requieren de: información meteorológica, geográfica, topográfica, altitud, cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera.

En las últimas décadas, la modelación se ha convertido en una herramienta habitual de diversas disciplinas que buscan explicar o reproducir sus respectivas observaciones. En la figura 5 se muestra esquemáticamente la modelación que permite determinar los resultados o predecir lo que podría ocurrir a un sistema a partir de un conjunto de datos de entrada (Bustos, 2004).

Suponiendo que se desea modelar un contaminante descargado a la atmósfera a través de una chimenea, los datos de entrada serán la altura de la chimenea, la tasa de emisión del contaminante, las condiciones meteorológicas, la topografía del terreno, etc. Mientras que los resultados esperados serán los niveles del contaminante a una determinada distancia de la fuente o las tasas de deposición del contaminante sobre el terreno.



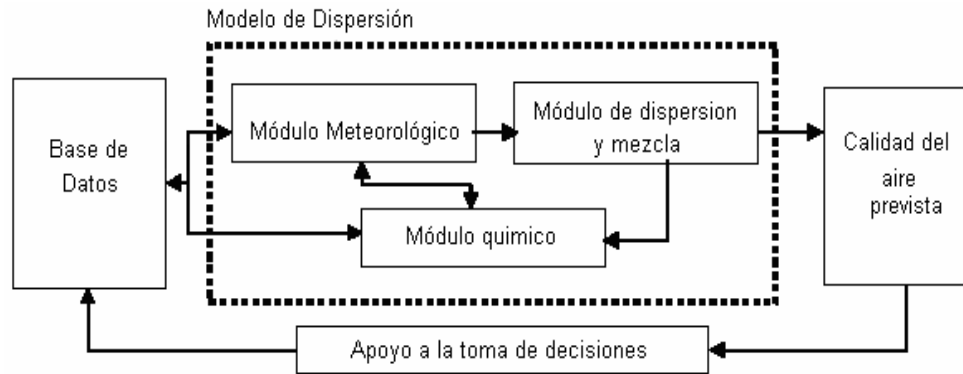
**Figura 5.** Representación esquemática de la modelación simple.  
Fuente: Bustos, 2004. En: Kiely, 1999.

El primer paso de la construcción o selección de un modelo es determinar que propiedades del sistema real permanecen fijas (parámetros) y cuáles pueden variar durante todo el funcionamiento del modelo (variables), para, a continuación, deducir, desarrollar o seleccionar una expresión matemática que describa el sistema. Esta expresión puede ser tan sencilla como una simple expresión algebraica o una ecuación diferencial o compleja como un conjunto de ecuaciones diferenciales y expresiones algebraicas (Bustos, 2004).

Luego de construir o seleccionar el modelo, es necesario especificar los valores que tomarán las variables y parámetros durante la modelación, a objeto, que dichos valores reflejen en la mejor forma posible el estado del sistema. La ejecución del modelo propiamente dicho, consiste en resolver analítica o numéricamente la(s) ecuación(es) y obtener los resultados de dicha ejecución.

Las conclusiones que pueden extraerse de una modelación dependen, naturalmente, del grado en el cual el modelo refleja al sistema real, pero también dependen del diseño del modelo en un sentido estadístico. La validación se refiere al hecho de probar el modelo para garantizar que la simulación esté correcta. Específicamente, se trata de verificar si el modelo representa al sistema real de manera adecuada. Durante el desarrollo, selección o aplicación del modelo pueden surgir errores en cualquiera de las etapas de la modelación. El modelo puede funcionar, pero fallar en la producción de resultados correctos (Bustos, 2004).

La figura 6 presenta un esquema de las diferentes componentes de un modelo. Dependiendo del objetivo de la modelación y del tipo de contaminante, existe un módulo químico que representa los procesos de transformación química y de fase, como por ejemplo, la formación de aerosoles. El módulo meteorológico que entrega los campos de vientos, temperatura, humedad, etc., necesarios para resolver la ecuación de continuidad de cada contaminante. Un tercer módulo principal resuelve los aspectos relativos a los múltiples y complejos procesos de transporte (advección, convección, turbulencia, etc.).



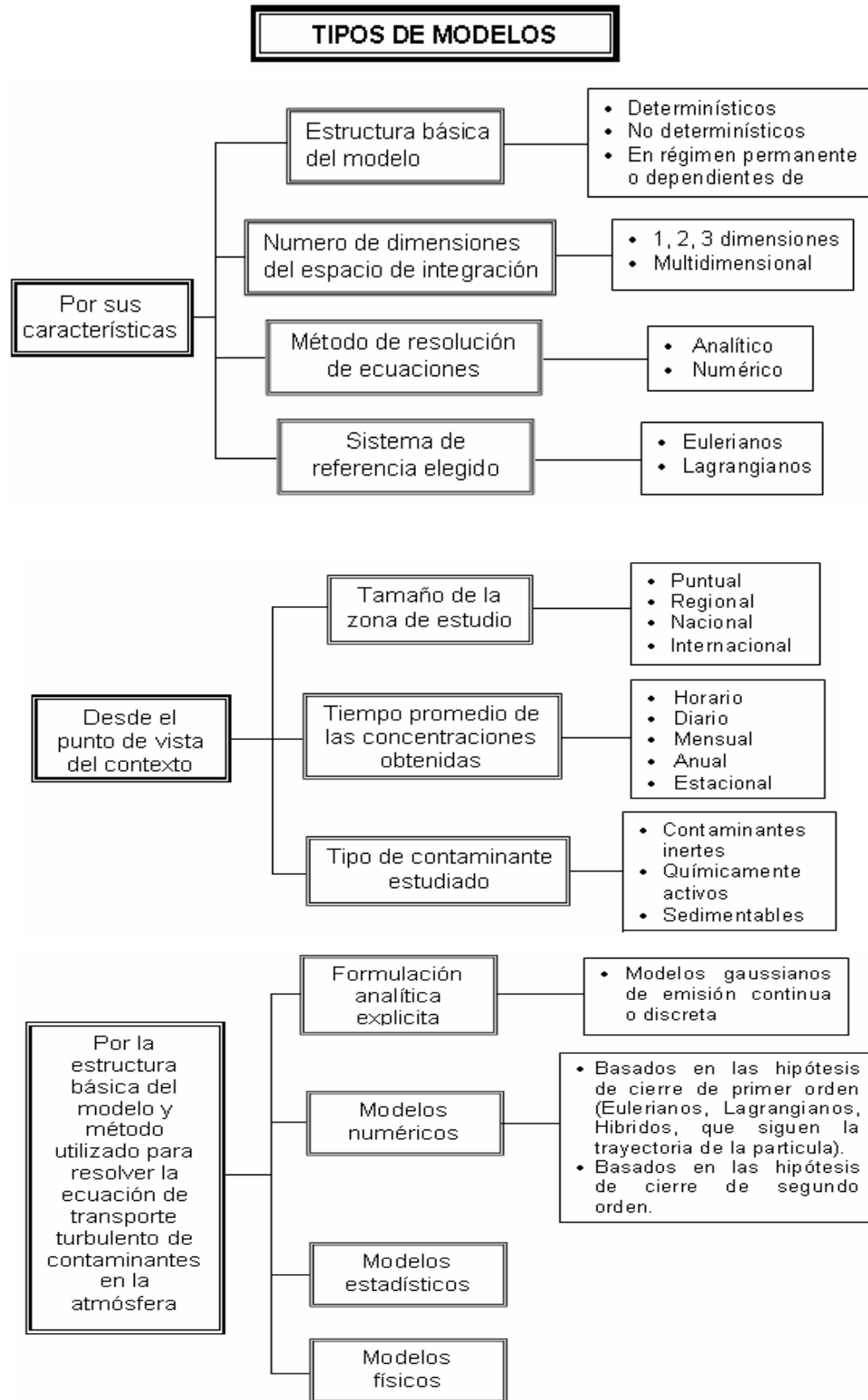
**Figura 6.** Conexión entre los diversos módulos de un modelo de dispersión y su integración al proceso de toma de decisiones. Fuente: Bustos, 2004

Todos estos módulos están conectados con bases de datos, por ejemplo, el inventario de emisiones y la topografía y uso del suelo de la zona. El conjunto de estos módulos se conecta con el no menos complejo proceso de gestión y apoyo a la toma de decisiones.

La exactitud de los resultados obtenidos por medio de la simulación del modelo, siempre dependerá de la calidad de los datos con que se alimente el modelo y de las suposiciones en que éste se base. Por lo tanto, antes de decidir utilizar un modelo como la alternativa para un tipo específico de fuente es importante comparar las necesidades del modelo con los datos disponibles.

#### 4.3.1. Tipos de modelos

En el esfuerzo de predecir las concentraciones de contaminantes en un punto alejado del foco emisor y resolver la ecuación de continuidad, se han desarrollado varios tipos de modelos matemáticos para estimar la calidad del aire. En la figura 7 se presenta una clasificación de los tipos de modelos existentes de acuerdo a diferentes puntos de vista.



**Figura 7.** Clasificación de los tipos de modelos matemáticos para estimar la calidad del aire.  
Fuente: Espert y López, 2004; Moreno, 2001.

Los modelos matemáticos de acuerdo con la forma de resolver la ecuación de transporte, se clasifican de la siguiente manera:

- **Determinísticos:** (no estadísticos), en ellos las concentraciones se calculan a partir del inventario de emisiones, de las condiciones meteorológicas, de las características del terreno, y en algunos casos se considera la eliminación de contaminantes por deposición o reacciones químicas. Se utilizan principalmente en estudios de contaminación con tiempos de promedio cortos o largos.
- **No Determinísticos:** (estadísticos) las concentraciones se conocen a partir de los parámetros meteorológicos, y después de haber obtenido unas relaciones empíricas por medio de las series históricas de mediciones de contaminación. Se utilizan en la predicción de concentraciones para cortos intervalos de tiempo (Espert y López, 2004).
- **Eulerianos:** Su sistema de referencia es fijo. Se basa en la conservación de la masa y calor, en un sistema de referencia absoluto (sistema de coordenadas fijas) y tratan de calcular la difusión referida a este sistema a partir de diferentes aproximaciones, igual que la dispersión, las reacciones químicas y la remoción del contaminante. Es bastante más preciso y costoso, recomendado para contaminantes reactivos y situaciones complejas.
- **Lagrangianos:** Su sistema de referencia sigue el movimiento de la atmósfera. Distingue dos sistemas de coordenadas para el cálculo del desplazamiento de los contaminantes: uno fijo o absoluto, referido a las coordenadas del foco emisor sobre el que se calcula la traslación media de los contaminantes y otro relativo, referido a un punto representativo de la traslación media del penacho, para tener en cuenta la dispersión debida a la turbulencia. Es la alternativa a elegir cuando se pretende simular la influencia de un número reducido de focos emisores sobre el entorno, con un cierto detalle espacial (resolución de 1Km o menor) y en el caso de que el comportamiento químico del contaminante considerado sea sencillo (Moreno, 2001)
- **Modelos físicos:** Son una réplica a escala de un área urbana o corresponden a representaciones del fenómeno al nivel de laboratorio. Se utilizan cuando se desea poner en evidencia la influencia que tiene la topografía del terreno en las características del flujo de aire (Espert y López, 2004).

### 4.3.2. Modelo de dispersión gaussiana

Los modelos “gaussianos” son de uso común en problemas de dispersión de contaminantes no reactivos de fuentes puntuales. Básicamente estos suponen que el penacho de un efluente presenta una distribución normal o de Gauss (gaussiana) de las concentraciones para los cortes verticales y horizontales perpendiculares a la dirección en que el penacho es transportado definido por la dirección del viento. Estos modelos son aptos para estimar efectos locales y que su grado de precisión y acierto es, en general, decreciente en tanto se aplican en localidades con relieve complejo y caracterizados por circulaciones atmosféricas complejas (Bustos, 2004)

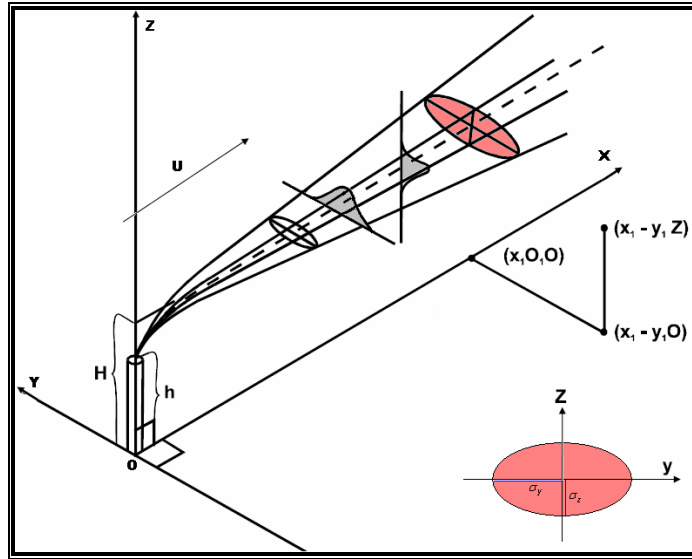
El modelo basado en la teoría gaussiana de la dispersión atmosférica estacionaria satisface la solución de la ecuación de transporte aplicada a la atmósfera en ciertas condiciones prefijadas, siendo algunas de las más importantes: velocidad y dirección del viento constante, condiciones de los parámetros que caracterizan las propiedades dispersivas de la atmósfera constantes, suelo uniforme y plano. Es también una solución particular de las dos teorías básicas usadas en el estudio de la dispersión turbulenta: La teoría gradiente y la estadística. La primera establece que los parámetros de difusión turbulenta en las ecuaciones de transporte de masa son proporcionales al gradiente de la concentración. Esta teoría se conoce también como K-gradiente, o Fickiana, por su analogía con las aplicaciones de la Ley de Fick de la difusión. La teoría estadística se basa en las propiedades derivadas del movimiento aleatorio de las partículas debido al campo de movimientos turbulento, cuando el fluido está en movimiento, esta ley se combina con el transporte convectivo para dar la siguiente ecuación diferencial en derivadas parciales de tipo parabólico:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(uc)}{\partial x} + \frac{\partial(vc)}{\partial y} + \frac{\partial(wc)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{dm} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{dm} \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{dm} \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (1)$$

Donde  $c$  es la concentración instantánea de la sustancia que se difunde,  $u, v$  y  $w$  las componentes del vector velocidad en las direcciones  $x, y, z$ , respectivamente, y  $K_{dm}$  es coeficiente de difusión molecular (Espert y López, 2004).



En la figura 8 se observa un esquema que representa la modelación que produce la teoría gaussiana de pluma estacionaria.



**Figura 8.** Esquema representativo del modelado que produce la teoría gaussiana de pluma estacionaria

A pesar de todas las aproximaciones y simplificaciones, el modelo gaussiano es físicamente consistente por ser una solución particular de la ecuación de transporte en la atmósfera. Además, está soportado por una extensa validación experimental lo que lo hace apropiado y adecuado para las evaluaciones que nos convocan.

Si se considera que el eje x sigue la línea media de la columna en la dirección del viento medio, con y (el eje horizontal) y z (el eje vertical) perpendiculares a la línea media de la columna, entonces, el modelo más sencillo es suponer que una columna que viaja en sentido horizontal a una velocidad media  $\bar{u}$  se dispersa horizontalmente (y) y verticalmente (z), de modo que la concentración de un contaminante en un corte transversal cualquiera de la columna sigue la distribución normal (gaussiana) de probabilidad (Henry, 1999).

Si además, para cualquier punto (x, y, z) de la columna la concentración C de contaminante en ese punto es tal que:

$$C_{(x,y,z)} \propto \frac{1}{\bar{u}}; \quad \bar{u} : \text{Velocidad media del viento}$$

$C_{(x,y,z)} \propto Q$ ;  $Q$ : Intensidad de la fuente

$C_{(x,y,z)} \propto G$ ;  $G$ : Curva gaussiana normalizada en las direcciones  $y$  y  $z$

Entonces:

$$C_{(x,y,z)} = \frac{Q}{\bar{u}} G_y G_z \quad (2)$$

La expresión para la función gaussiana  $G_y$  normalizada de modo que el área de la curva es la unidad es:

$$G_y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \quad (3)$$

Y de forma similar para  $G_z$  de modo que:

$$C_{(x,y,z)} = \frac{Q}{\bar{u}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \right\} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad (4)$$

$$C_{(x,y,z)} = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (5)$$

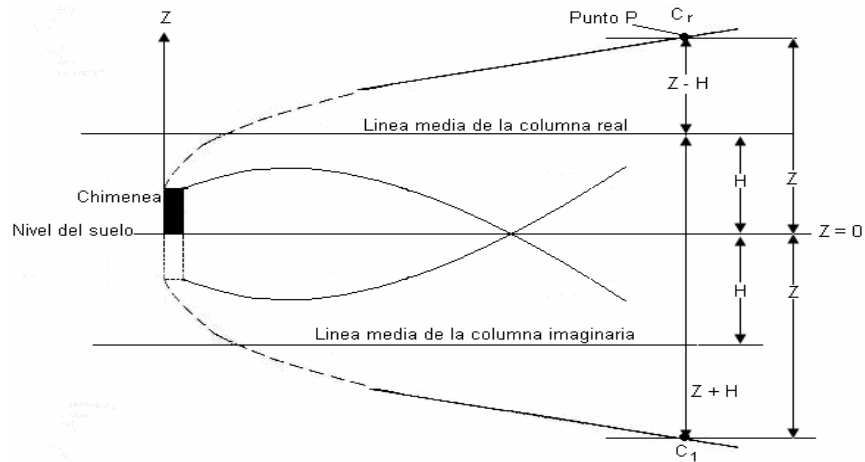
Donde:  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  son las desviaciones estándar de la dispersión en las direcciones  $y$  y  $z$ , respectivamente,  $x = 0$  en la fuente (origen); en tanto  $y$  y  $z$  son cero en la línea media de la columna (Henry, 1999).

Para correlacionar esta expresión con el nivel del suelo en vez de la línea media de la columna se hace que la altura de cualquier punto P de la columna sea una distancia  $Z$  arriba del suelo.

En este caso la altura vertical del punto P arriba de la línea media de la columna es  $Z - H$  y la ecuación se transforma en:

$$C_{(x,y,z)} = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (6)$$

Lo anterior se puede observar en la figura 9:



**Figura 9.** Dispersión de la columna en sentido vertical y la reflexión de los contaminantes en el nivel del suelo.

Este modelo es aplicable, siempre y cuando la columna no choque con el suelo. Debido a que el suelo tiende a reflejar más contaminantes que a eliminarlos, se utiliza una técnica que supone 100% de reflexión de los contaminantes, entonces se toma en cuenta la mayor concentración de contaminantes en el nivel del suelo. La figura también muestra una imagen en el espejo de la columna, y la concentración del contaminante en un punto imaginario ( $Z + H$ ) se suma a la concentración en la columna real (Henry, 1999).

La ecuación de difusión de columnas en su forma más común es:

$$C_{(x,y,z)} = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad (7)$$

Donde C es la concentración del contaminante en ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) en un receptor ubicado en ( $x,y,z$ ).

La utilización de esta fórmula está limitada a distancias entre 100 m y 10 Km. y es aplicable para cortos períodos de tiempo, hasta unos diez minutos, que es el tiempo promediado o tiempo de muestreo normalizado.

Para períodos de tiempo superiores a diez minutos, la concentración viento abajo de la fuente de emisión es en cierta manera inferior, debido a la alteración de la dirección del viento.

Ascenso del penacho: la emisión de contaminantes puede hacerse con un cierto empuje vertical debido a la diferencia de temperatura del gas emitido-atmósfera. Por otra parte, algunas instalaciones tienen ventiladores que le imponen una velocidad vertical elevada a los gases con el objeto de alejar los contaminantes del suelo. Este momento vertical se va “diluyendo” por un proceso de mezcla con la atmósfera exterior que reduce e iguala la temperatura de los gases a la de la atmósfera. Dicho proceso de mezcla también intercambia la velocidad vertical de las emisiones con la de la atmósfera, reduciendo y anulando la diferencia (en general los movimientos verticales de la atmósfera suelen ser despreciables). Esta pérdida de momento vertical produce que la nube, luego de ser emitida, se “horizontalice” rápidamente una vez que alcanza lo que se denomina *altura efectiva*. (<http://www.ib.cnea.gov.ar>).

Los requisitos de los datos de modelos de dispersión de tipo gaussiano se clasifican en tres categorías:

- **Datos de la fuente:** ubicación de chimeneas y otras fuentes (coordenadas), altura física de la chimenea y su diámetro interno, velocidad de salida del gas desde la chimenea, temperatura y tasa de emisión del contaminante. Este último normalmente se expresa en valores promedio temporales (por 1 hora, 24 horas o 1 año).

Algunos modelos de dispersión pueden requerir de datos de entrada adicionales tales como la elevación de la fuente y el terreno, dimensiones de edificaciones próximas (por ejemplo, el ancho promedio del edificio y el espacio entre los edificios), distribución del tamaño de la partícula y sus correspondientes tasas de deposición y coeficientes de reflexión superficial.

- **Datos meteorológicos:** La mayoría de los modelos gaussianos acepta datos meteorológicos de superficie que consideran la clasificación de estabilidad a cada hora, dirección y rapidez del viento, la temperatura atmosférica y la altura de la capa de mezcla.

Es deseable que como mínimo se disponga de un año de datos meteorológicos. Sin embargo, en los casos dónde algunos datos de largo plazo están disponibles sólo para la región (típicamente, lecturas tomadas en un aeropuerto), las observaciones locales para el sitio bajo examen pueden ser obtenidas a partir de éstas, previa revisión de los datos de largo plazo obtenidos en la región.

Hay muchos factores meteorológicos que tienen influencia sobre el destino de la pluma contaminante. Estos incluyen velocidad y dirección de viento, turbulencia, altura efectiva de la chimenea, y estabilidad atmosférica. Los vientos de valle y la inversión nocturna (estabilidad atmosférica).

De manera muy general, el grado de mezcla atmosférica depende del gradiente de temperatura vertical en una columna de aire. Debido a que el aire caliente sube y el aire frío baja, la mezcla atmosférica se lleva a cabo cuando el sol calienta el suelo y el aire durante el día. El aire caliente se mueve continuamente hacia arriba y el aire frío se mueve hacia abajo tomando el lugar del primero. Esto produce una “capa de mezcla” que tiene hasta miles de metros de altura. La contaminación emitida hacia esta capa de mezcla afectaría la calidad de aire a nivel del suelo. Cuando el sol se oculta y la superficie de la tierra empieza a enfriarse, la mezcla se detiene y la capa convectiva (mezclada) colapsa para convertirse en una capa estable de menor altura. Esta capa estable contiene algo de la contaminación de las emisiones diurnas.

Las concentraciones de contaminantes están inversamente relacionadas con la velocidad de viento debido a que su concentración atmosférica disminuye cuando grandes volúmenes de aire pasan sobre un lugar, asumiendo tasas constantes de emisión. A su vez la velocidad del viento está determinada por la topografía local incluyendo montañas, valles, y edificios. En general cuanto más agreste el terreno, más lentos son los vientos.

La dirección del viento y la frecuencia del cambio en su dirección también son importantes. Si la dirección del viento es relativamente constante, el mismo lugar (en una ubicación alejada) estará constantemente expuesto a altas concentraciones de contaminantes. Si la dirección de viento cambia con frecuencia, la contaminación se dispersará para impactar una región más grande pero con menor concentración.

- **Datos de los receptores:** La identificación y codificación de todos los receptores (por ejemplo, áreas con alta población o concentración máxima esperada a nivel del suelo). Normalmente, los receptores son especificados por sus coordenadas y elevación.

Los resultados de modelos de dispersión gaussianos son comúnmente la representación de mapas con la concentración de los contaminantes a lo largo del área inmediata que rodea a la fuente. El mapa consiste en las concentraciones calculadas en lugar y gráficas de isolíneas de concentraciones. Luego que se trazan los resultados, se evalúan los datos calculados (Bustos, 2004).

---

---

## 5. METODOLOGÍA

---

---

La metodología empleada para el desarrollo del proyecto se dividió en cuatro etapas fundamentales:

### **5.1. PRIMERA ETAPA. Revisión Bibliográfica de diferentes modelos de dispersión atmosférica.**

Se realizó una continua revisión bibliográfica por Internet (oficina de la EPA, OMS) y en documentos escritos (libros y revistas especializadas), que permitieran conocer y estudiar los diferentes modelos de dispersión de contaminantes existentes y sus características. Como resultado de esta etapa se tiene una descripción de los modelos consultados.

### **5.2. SEGUNDA ETAPA. Matriz de Selección y selección del modelo a trabajar**

Con los modelos estudiados se creó una matriz de selección que se basó en criterios de búsqueda como:

- Nombre del modelo
- Marco de referencia
- Tipo de modelo
- Emisiones
- Tipo de contaminantes
- Tipo de fuentes
- Usos del suelo y topografía
- Información meteorológica
- Escala espacial
- Escala temporal
- Tipo de software
- Código de fuente disponible

Esta matriz al describir las principales características de los modelos permitió facilitar la selección del mas apropiado para trabajar en la zona de estudio de la Ciudad de Cali.

Con base en la matriz de selección se escogió uno de los modelos de libre distribución de la EPA, que se acomodara a las condiciones dadas en la ciudad de Cali y permitiera relacionar las concentraciones ambientales de los diferentes contaminantes directamente con sus fuentes de emisión, así como con las condiciones topográficas y meteorológicas.

### **5.3. TERCERA ETAPA. Recopilación de información para alimentar el modelo**

Con el modelo seleccionado se llevo a cabo la tercera etapa que consistió en recopilar la información tanto meteorológica como de las fuentes de la Comuna Cuatro, para los días 1 de marzo y 1 de agosto del 2006, 6 de agosto de 2009 y 1 de marzo de 2010, y así considerar los dos periodos estacionales: lluvioso y seco. Los datos que alimentaran el modelo son:

- Tipo de contaminante
- Mapa base
- Datos de las fuentes
- Datos meteorológicos
- Datos de los receptores.

### **5.4. CUARTA ETAPA. Aplicación del modelo seleccionado y comparación con el modelo ISC3**

En la cuarta etapa se llevo a cabo la ejecución del modelo seleccionado y la comparación con la simulación del modelo ISC3, realizada en el estudio “Inventario de emisiones de contaminantes primarios y simulación de la dispersión atmosférica de partículas suspendidas totales emitidas por fuentes fijas puntuales en la Comuna Cuatro de Santiago de Cali” (Aponete, 2009). De acuerdo a los resultados obtenidos se concluyó sobre una mejor reubicación de las estaciones de monitoreo cercanas a la Comuna Cuatro de la Ciudad de Cali.



---

---

## 6. RESULTADOS

---

---

### 6.1. MODELOS CONSULTADOS

En la actualidad existen numerosos modelos para simular los efectos de diversos tipos de emisiones (SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, Material Particulado, etc) liberadas al medio ambiente producto de las distintas actividades humanas, la existencia de estos modelos es un intento para estimar de forma cuantitativa los efectos de las emisiones liberadas por las distintas fuentes emisoras y así facilitar la predicción del impacto correspondiente.

De todos los modelos actualmente disponibles en el mercado son pocos los reconocidos por instituciones de prestigio y relevancia internacional como las oficinas encargadas del medio ambiente de las principales naciones como por ejemplo la EPA, la cual muestra preferencia y recomienda el uso de los siguientes Modelos de Dispersión para Calidad del Aire. Cada uno de los modelos mencionados tiene un uso preferente ante situaciones específicas debido a sus características.

#### ➤ **MODELOS RECOMENDADOS POR LA EPA**

- ✓ AERMOD
- ✓ CALPUFF
- ✓ BLP
- ✓ CALINE3
- ✓ CAL3QHC/CAL3QHCR
- ✓ CTDMPPLUS
- ✓ OCD

La EPA establece una serie de modelos recomendados para abordar distintos problemas de calidad del aire. El proceso de selección de modelos recomendados es muy riguroso, aunque lento, de tal forma que los modelos son sometidos a pruebas exhaustivas para verificar su capacidad de reproducir los procesos atmosféricos (evaluación frente a datos de experimentos de campo) y su validez frente a otros modelos (intercomparación con otros modelos). Aunque en muchos casos, estos modelos no sean los más actuales y, por tanto, quizá sean superados por otros modelos más recientes, sí se puede afirmar que tienen una fiabilidad contrastada (CIEMAT, 2010)

## ➤ **MODELOS ALTERNATIVOS**

Además, la EPA ofrece una lista de modelos alternativos a los anteriores que pueden ser utilizados en aplicaciones reglamentarias con una justificación clara según el caso a tratar.

- |           |             |
|-----------|-------------|
| ✓ ADAM    | ✓ ISC3      |
| ✓ ADMS-3  | ✓ PLUVUE II |
| ✓ AFTOX   | ✓ SCIPUFF   |
| ✓ ASPEN   | ✓ SDM       |
| ✓ DEGADIS | ✓ SLAB      |

La descripción de los modelos consultados se observa en el anexo 1.

### **6.2. MATRIZ DE SELECCIÓN Y MODELO SELECCIONADO**

Con base en las características de los modelos consultados, los criterios de búsqueda como tipo de contaminante, tipos de fuentes, topografía, información meteorológica, escala espacial, temporal, etc., se creó la matriz de selección, expuesta en el anexo 2.

De dicha matriz, el modelo escogido para la zona de estudio en la ciudad de Cali fue **AERMOD**, ya que en publicaciones realizados anteriormente en otros países y ciudades demuestran que es uno de los modelos más trabajados y robustos, que ha sido demostrado y documentado, tanto por evidencias científicas como por estudios de validación, representa un sólido y significativo avance respecto al ISCST3.

La formulación del AERMOD ha sido sometida a una revisión profunda e independiente, lo que permite concluir que las bases científicas del AERMOD están al nivel del estado del arte de la ciencia.

AERMOD es un modelo que representa una técnica de dispersión que incorpora las técnicas más avanzadas de parametrización de la capa límite planetaria, dispersión convectiva, formulación de la elevación de la pluma e interacciones complejas del terreno con la pluma.

En comparación con el ISCST3, AERMOD contiene nuevos o mejorados algoritmos para:

1. Dispersión tanto en las capas límite estable como convectiva.
2. Flotabilidad y elevación de la pluma.
3. Penetración de la pluma dentro de la inversión elevada.
4. Tratamiento de fuentes elevadas y bajas.
5. Perfiles verticales de viento, temperatura y turbulencia.
6. Tratamiento de receptores en todo tipo de terrenos.

AERMOD incorpora los conceptos más actuales en cuanto a dispersión en terreno complejo, de forma que modeliza la pluma impactando en el terreno y/o siguiendo su topografía. Utiliza datos meteorológicos horarios procesados secuencialmente con el objetivo de calcular las concentraciones de contaminantes para cualquier período que defina el usuario, desde una hora hasta un año.

La principal mejora que AERMOD introduce en cuanto al cálculo de los parámetros de dispersión es el uso de funciones continuas, a diferencia del tratamiento discreto que realizan otros modelos basados únicamente en la estabilidad atmosférica. De la misma forma, AERMOD construye perfiles verticales de dichos parámetros, con lo cual tiene en cuenta la variación con la altura del crecimiento de la pluma debido a la turbulencia.

Las fuentes de emisión pueden estar ubicadas en áreas rurales o urbanas, y los receptores pueden estar localizados en terreno simple o complejo, trabaja a distancias de transporte de contaminantes hasta 50Km y emisiones continuas de sustancias tóxicas. AERMOD tiene en cuenta los efectos de la turbulencia en el aire originada por los edificios (remoción en la pluma de contaminantes), utilizando los algoritmos incluidos en el modelo Plume Rise Model Enhancements (PRIME).

Además, la formulación del modelo ha sido diseñada para evitar cualquier tipo de discontinuidad, de modo que, pequeñas variaciones en los parámetros de entrada no puedan provocar grandes cambios en las concentraciones de salida calculadas con el modelo. La configuración del modelo AERMOD se realiza utilizando la misma información y procesamiento de datos que en el caso del modelo ISC3, la excepción es que el modelo AERMOD incorpora un procesador de información de terreno (AERMAP) que no tiene contraparte en el caso del modelo ISC3.

Además, el procesador meteorológico de AERMOD (AERMET) posee extensiones y mayor flexibilidad que el procesador meteorológico de ISC3 (PCRAMMET). Por ejemplo, PCRAMMET solo acepta un tipo de uso de suelos, mientras que AERMET acepta sectores angulares con diferentes propiedades de rugosidad, albedo y razón de Bowen, dependiendo de la dirección del viento predominante. Esto es particularmente apropiado para el caso de una localidad costera donde haya una clara distinción entre la superficie del mar y la del continente.

Varias empresas privadas ofrecen versiones mejoradas de modelos gaussianos. Las mejoras incorporan interfaces amigables entre la computadora y el usuario, facilitando la entrada y análisis de datos, el despliegue gráfico de los resultados y personalizando los resúmenes de resultados.

Una vez estudiado a fondo el modelo AERMOD y definido sus características, se adquirió el modelo “AERMOD BREEZE” distribuido por la empresa K2 Ingeniería Ltda., utilizando recursos que la Universidad del Valle aportó para este fin.

Aunque el objetivo era trabajar con un modelo de libre distribución se optó por la anterior propuesta debido a que AERMOD BREEZE es un modelo de fácil acceso, intuitivo porque está basado en estándares Microsoft, con interfaz gráfica de usuario, y características estándar como barra de herramientas, vistas, menús, comandos, y cuadros de diálogo, y su licencia es asequible. Para el desarrollo del proyecto se contó con la versión estándar, limitando un poco las funciones de la herramienta.

Ver la descripción del modelo seleccionado AERMOD, y AERMOD BREEZE en el anexo 3

### **6.3. Recopilación de información para alimentar el modelo**

En la figura 10 se muestra un diagrama de los datos necesarios para alimentar el modelo aermod breeze, los cuales luego de ser procesados pasan a la herramienta Analyst 3D para visualizar los resultados obtenidos.



**Figura 10.** Datos necesarios para alimentar el modelo AERMOD BREEZE



### **6.3.3. Datos de las fuentes**

Los datos de emisiones de las fuentes fijas de la Comuna Cuatro utilizados en este estudio fueron los reportados por Aponte (2009), donde por medio de un inventario de emisiones se clasificaron por actividad económica, procesos productivos, tipo de fuentes fijas y tipo de combustible utilizado.

Esta clasificación permitió caracterizar la zona de estudio y además fue la base para seleccionar los factores de emisión que permitieron hacer los cálculos de la cantidad de emisiones contaminantes, por cada una de las fuentes fijas inventariadas.

Se tomó como base que el modelo ISCST3 se ejecutó para 40 chimeneas; representadas en 29 industrias de las cuales 5 operan sus equipos de combustión con carbón y el resto lo hacen con gas natural.

Para la ejecución del modelo se asume que las industrias operan sus equipos las 24 horas de manera continua y que la cantidad de PST se emite de manera constante. Algunas de las empresas tienen varios puntos de emisión (Aponte, 2009)

La ubicación de las empresas se realizó en el sistema de coordenadas planas de la ciudad de Cali, generado por Planeación Municipal. Se hizo una localización aproximada para cada empresa, la cual se representó como un punto que se situó a partir de la dirección de la misma.

En el Anexo 4 se muestran los datos suministrados por el inventario de emisiones para las fuentes seleccionadas, como: coordenadas de las fuentes, altura, diámetro interno, velocidad de emisión, y temperatura que son los datos que se requieren para alimentar el modelo.

### **6.3.4. Datos meteorológicos**

Los datos meteorológicos básicos necesarios para el modelo como: velocidad y dirección del viento, temperatura, se obtuvo de la estación meteorológica PTAR la cual es la más cercana a la zona de estudio. Con estos datos y debido a que no se contaba con el preprocesador AERMET, se procedió a crear los archivos de entrada: .SFC y .PFL.

Para el archivo .SFC (archivo de caracterización de superficie), se requiere los siguientes datos:

- ◆ Año
- ◆ Mes
- ◆ Día
- ◆ Día juliano
- ◆ Hora
- ◆  $H_o$  : Flujo de calor sensible [W/m<sup>2</sup>]
- ◆  $u^*$ : Velocidad de fricción [m/s]
- ◆  $w^*$  : Escala de velocidad convectiva [m/s]
- ◆ VPTG : Gradiente vertical de temperatura en la capa limite PBL por encima de 500m
- ◆ Zic: : Altura convectiva de la capa limite [m]
- ◆ Zim : Altura mecánica de la capa limite [m]
- ◆ L : Longitud de Monin-Obukhov [m]
- ◆  $Z_o$  : Rugosidad superficial [m]
- ◆ Bo : Relación de Bowen
- ◆ r : Albedo
- ◆  $W_s$  : Velocidad del viento [m/s]
- ◆  $W_d$  : Dirección del viento [grados]
- ◆  $Z_{ref}$  : Altura de referencia para la velocidad y Dirección del viento [m]
- ◆ Temp : Temperatura [K]
- ◆  $Z_{temp}$  : Altura de referencia para la temperatura [m]

Para el archivo .PFL (archivo de caracterización del perfil), se requiere:

- ◆ Año
- ◆ Mes
- ◆ Día
- ◆ Height : Altura de medición [m]
- ◆ top : 1, si este es el nivel mas alto nivel para esta hora, o 0 de lo contrario
- ◆  $WD_{nn}$  : Dirección del viento [grados]
- ◆  $WS_{nn}$  : Velocidad del viento [m/s]
- ◆  $TT_{nn}$  : Temperatura a dicho nivel [°C]
- ◆  $SA_{nn}$  : Desviación estándar de la dirección del viento [grados]
- ◆  $SW_{nn}$  : Desviación estándar de la velocidad del viento [m/s]

Siguiendo la metodología de Sozzi y Ruiz (1998) en “Implementación de metodologías para la meteorología y la micrometeorología de dispersión de los contaminantes en el aire”, que se basa en el conocimiento de los promedios horarios de las variables meteorológicas medidas y partiendo del balance radiactivo en la superficie terrestre se procede a realizar los cálculos tanto para el día como para la noche. En horas nocturnas se utilizó el procedimiento desarrollado por Venkatram (1980), (Benavides, 2003).



### 6.3.4.1. CÁLCULOS HORAS DIURNAS

#### Flujo de calor sensible

Por medio de las ecuaciones 7 y 8 se calcula del flujo de calor sensible, el cual permitirá calcular la velocidad de fricción, la temperatura de escala, la relación de Bowen y el calor latente. Su valor debe ser mayor de cero en horas diurnas.

$$H_o = 0,3R_g + A \quad (8)$$

$$A = 2,4N - 25,5, \quad (9)$$

$R_g$ : radiación solar global

#### Radiación solar global:

$$R_g = (a_1 \text{sen}\Psi + a_2)(1 + b_1 N^{b_2}) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{sen}\Psi &> 0 && \text{de día} \\ \text{sen}\Psi &< 0 && \text{de noche} \end{aligned}$$

$$a_1 = 990, a_2 = -30, b_1 = -0.75, b_2 = 3.4,$$

$N$  = Factor de cobertura global del cielo (nubosidad medida en octas)

$\Psi$  = Angulo de elevación solar local (altura del sol sobre el horizonte).

#### Ángulo de elevación solar local:

$$\text{sen}\Psi = \text{sen}\Phi \text{sen}\delta_s - \cos \Phi \cos \delta_s \cos \left[ \left( \frac{\pi t_{utc}}{12} - \lambda_e \right) \right] \quad (11)$$

$$t_{utc} = t_L - t_F \quad (12)$$

$\Phi$  = Latitud (positiva al Norte),  $\delta_s$  = Declinación solar (ángulo del sol sobre el ecuador, en radianes),  $\lambda_e$  = Longitud (positiva al oriente) en radianes,  
 $t_L$  = Hora local,  $t_F$  = Uso horario (time zone, para Colombia es -5)

#### Ángulo de declinación solar:

$$\delta_s = \Phi_r \cos \left[ \frac{2\pi(d - d_r)}{d_y} \right] \quad (13)$$

$\Phi_r$  = Latitud del Trópico de Cáncer ( $23,45^\circ = 0,409$  radianes),  $d$  = Día juliano,  
 $d_r$  = Día del solsticio de verano (173),  $d_y$  = Numero de días en un año (365)

### Velocidad de fricción:

Es la que caracteriza el nivel de turbulencia mecánica generado por la cortante del viento.

$$U_* = U_o \left[ 1 + a \ln \left( 1 + b \frac{Q_o}{Q_*} \right) \right] \quad (14)$$

$$U_o = \frac{kU}{\ln(Z_m / Z_o)} \quad (15) \quad Z_m = Z_r - 4Z_o \quad (16)$$

$$Q_o = H_o / \rho C_p \quad (17) \quad Q_* = (TU_o^3) / (kgZ_m) \quad (18)$$

$$b = 1,95 + 32,6(Z_o / Z_m)^{0,45} \quad (19)$$

$$a = \begin{cases} 0,128 + 0,005 \ln(Z_o / Z_m) & \text{si } Z_o / Z_m \leq 0,01 \\ 0,107 & \text{si } Z_o / Z_m > 0,01 \end{cases} \quad (20)$$

$k$  = Constante de Von Kaman (0,41),  $g$  = Gravedad,  $Z_r$  = Altura del anemómetro donde se hace la medición del viento,  $Z_o$  = Rugosidad superficial,  $\rho$  = Densidad del aire y  $C_p$  = Calor específico a presión constante

Para el cálculo de la densidad y el calor específico se utiliza la expresión:

$$\rho C_p = 350,175 * P / T \quad (21)$$

$P$  = Presión atmosférica en milibares,  $T$  = Temperatura

### Longitud de Monin-Obukhov:

$$L = - \frac{TU_*^2}{kgT_*} \quad (22)$$

$T$  = Temperatura,  $U_*$  = Velocidad de fricción,  $k$  = Constante de Von Kaman (0,41),  $g$  = Gravedad,  $T_*$  = Temperatura de escala

### Temperatura de escala:

$$T_* = - \frac{H_o}{\rho C_p U_*} \quad (23)$$

**Relación de Bowen:**

$$B_o = \frac{H_o}{H_E} = \frac{\text{Flujo de calor sensible}}{\text{Flujo de calor latente}} \quad (24)$$

**Calor latente:**

$$H_E = (R_n - G) - H_o \quad (25)$$

**Flujo de calor en el suelo:**

$$G = \alpha R_n \quad (25)$$

$\alpha$  = Albedo, horas diurnas es igual a 0,1

Los valores del albedo varían de acuerdo a la cobertura que tenga el suelo. El albedo es casi constante para ángulos de elevación solar por encima de 30°, pero crece aunque en forma poco significativa para ángulos inferiores de 30° (Benavides, 2003)

**Radiación neta:**

$$R_n = \frac{(1 - \alpha)R_g + C_1T^6 + C_2N - \sigma T^4}{1 + C_3} \quad (27)$$

T = Temperatura del aire en las cercanías del suelo en °K,  
 $C_1 = 5,31 \times 10^{-13}$ ,  $C_2 = 60$ ,  $C_3 = 0,12$ ,  
 $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$  [W/(m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)]

**6.3.4.2. CÁLCULOS HORAS NOCTURNAS**

Las ecuaciones de la radiación solar global, ángulo de elevación solar local, a ángulo de declinación solar, y radiación solar neta son las utilizadas para los cálculos en horas diurnas.

**Flujo de calor sensible**

$$H_o = -\rho C_p U.T. \quad (28)$$

$$A = 2,4N - 25,5,$$

**Rg:** radiación solar global

**Velocidad de fricción:**

$$U_* = \frac{C_{DN}U}{2} (1 + C^{0.5}) \quad (29)$$

$$C_{DN} = \frac{k}{\ln(Z_m / Z_o)} \quad (30) \quad C = 1 - \frac{4U_o^2}{C_{DN}U^2} \quad (31)$$

$$U_o^2 = \frac{YZ_m}{kA} \quad (32) \quad Z_m = Z_r - 4Z_o \quad (33)$$

$k$  = Constante de Von Kaman (0,41),  $C_{DN}$  = Coeficiente de arrastre,  
 $Z_o$  = Rugosidad superficial,  $U$  = Velocidad del viento,  $Z_r$  = Altura del anemómetro  
 $Y$  = Gradiente potencial de temperatura igual a 4,7,  $A$  = 1100

**Longitud de Monin-Obukhov:**

$$L = AU_*^2 \quad (34)$$

$U_*$  = Velocidad de fricción,  $A$  = 1100

**Temperatura de escala:**

$$T_* = \frac{T}{kgA} \quad (35)$$

$T$  = Temperatura,  $k$  = Constante de Von Kaman (0,41),  
 $g$  = Gravedad,  $A$  = 1100

**Relación de Bowen:**

$$B_o = \frac{H_o}{H_E} = \frac{\text{Flujo de calor sensible}}{\text{Flujo de calor latente}} \quad (36)$$

**Calor latente:**

$$H_E = (R_n - G) - H_o \quad (37)$$

**Flujo de calor en el suelo:**

$$G = \alpha R_n \quad (38)$$

$\alpha$  = Albedo, horas nocturnas es igual a 0,5

**Altura de Mezcla**

Altura en la atmósfera hasta donde los contaminantes alcanzan a ser mezclados y dispersados. Se define de la siguiente forma:

$$\text{En horas estables (noches)} \quad h_{mix} = h_{mec} \quad (39)$$

$$\text{En horas convectivas (día)} \quad h_{mix} = \text{MAX}(h_{conv}, h_{mec}) \quad (40)$$

### Altura de Mezcla Mecánica

La estimación de la altura de mezcla se hace teniendo en cuenta tanto la contribución de tipo mecánico (siempre presente) representada por la velocidad de fricción, como la contribución convectiva (presente solo en las horas con flujo sensible de calor positivo) representada por  $H_o$ . Por lo tanto, en todas las horas del día se puede definir la altura de mezcla de tipo mecánico, mediante la siguiente relación:

$$h_{mec} = 1330U_* \quad (41)$$

### Altura de Mezcla Convectiva

Para el cálculo de esta variable fue necesario recurrir al método de mínimos cuadrados, se realizó un ajuste al polinomio y se obtuvo el área bajo la curva de la función resultante de graficar Tiempo vs Flujo de calor sensible ( $H_o$ ), dicha área es la altura de mezcla convectiva.

### Velocidad Convectiva

$$w_* = \left( \frac{gH_o h_{conv}}{\rho C_p T} \right)^{1/3} \quad (42)$$

$h_{conv}$  = Altura de mezcla convectiva,  $H_o$  = Flujo de calor sensible  
 $\rho$  = Densidad del aire  $C_p$  = Calor específico a presión constante  
 $g$  = Gravedad,  $T_*$  = Temperatura de escala

Estas formulas se sistematizaron en hojas de cálculo de Excel para disminuir el error a la hora de calcular cada variable, además por la cantidad de datos que se manejan.

Estos cálculos se presentan en el Anexo 5, y los archivos conformados en el Anexo 6.

Para tener en cuenta:

<b>Criterios de Estabilidad</b>				
Condición Inestable (Convectiva)	$U_* > 0$	$H_o > 0$	$T_* < 0$	$L < 0$
Condición adiabática (Neutra)	$U_* > 0$	$H_o = 0$	$T_* = 0$	$L = \pm \infty$
Condición Estable	$U_* > 0$	$H_o < 0$	$T_* > 0$	$L > 0$

**Tabla 3.** Criterios de Estabilidad

### **6.3.5. Datos de los receptores**

Los receptores son aquellos puntos en los que se quieren calcular la concentración de contaminantes a nivel de suelo. Se obtiene una malla creada alrededor de las fuentes de emisión. Las mallas pueden ser utilizadas tanto en un sistema de coordenadas cartesianas como polares.

En el sistema de coordenadas polares ( $r, \theta$ ), la distancia  $r$  se mide desde el origen definido por el usuario, y el ángulo  $\theta$  tiene como origen la dirección norte y sentido positivo de las agujas del reloj.

En el sistema cartesiano, el eje X es positivo dirección este desde el origen, y el eje Y es positivo desde el mismo origen hacia el norte.

Los receptores están representados por nodos de una malla polar o rectangular en función del sistema de coordenadas seleccionado. El modelo permite definir diversas mallas de receptores simultáneamente en un mismo estudio. A parte de las mallas, el modelo también permite la opción de definir receptores discretos.

Para el presente estudio se escogió una extensión de 5x5km, la zona se dividió en una malla de 40x40 puntos por cada lado separados uniformemente por una distancia de 125 m, para un total de 1600 receptores, se escogió esta malla ya fue la que se trabajó en el estudio realizado con el cual se realizó la comparación de las concentraciones obtenidas. El área seleccionada es totalmente plana, es decir que todos los receptores están a la misma altura, (nivel del suelo  $Z=0$ ).

Para observar la variación de la dispersión con respecto a los datos meteorológicos se realizaron dos nuevas simulaciones para los días 1 marzo de 2010 y 6 de agosto de 2006, donde la grilla de receptores que se modificó a 50x50 puntos por cada lado, separados uniformemente por una distancia de 125 metros, es decir que se tiene un total de 2500 receptores, con el fin de cubrir toda la dispersión.

#### 6.4. APLICACIÓN DEL MODELO AERMOD Y COMPARACIÓN CON ISC3

El resultado de la simulación del modelo AERMOD para el día 1 de Marzo de 2006 se presenta en la figura 12, donde se obtuvo una concentración máxima de  $30.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$

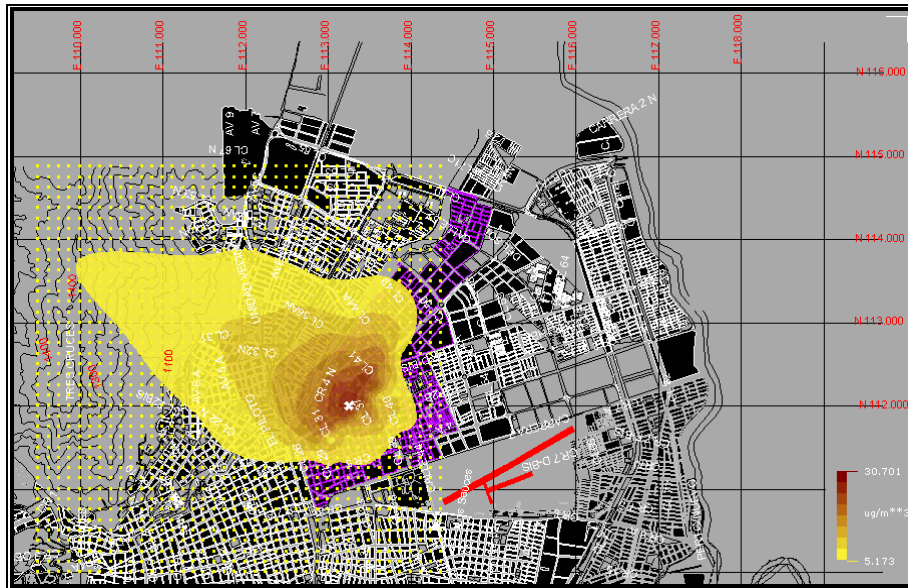


Figura 12. Concentración Aermოდ Breeze 1 marzo de 2006

La simulación para el día 1 de marzo de 2006 con el modelo ISC3 se presenta en la figura 13, donde la concentración máxima obtenida es de  $40.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$

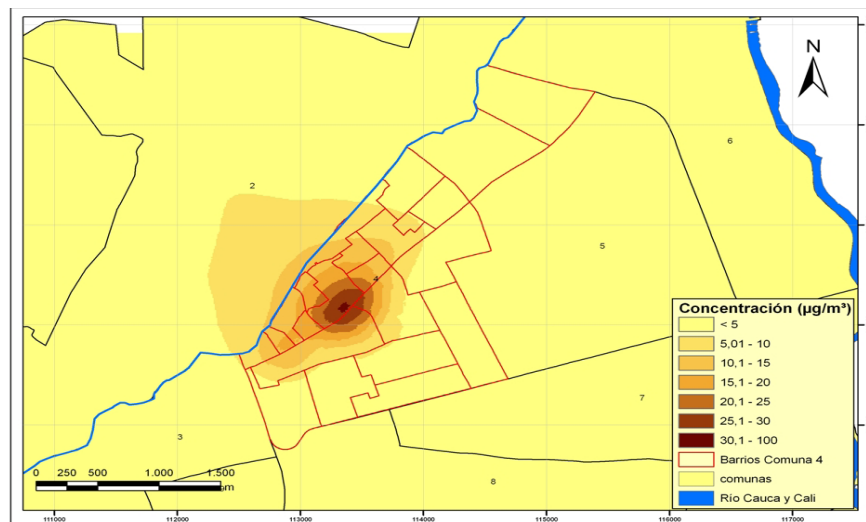


Figura 13. Concentración ISC3 1 marzo de 2006

Se observa un comportamiento similar, aunque la dispersión toma un sentido un poco diferente, esto debido a la forma en que se tomaron los datos.

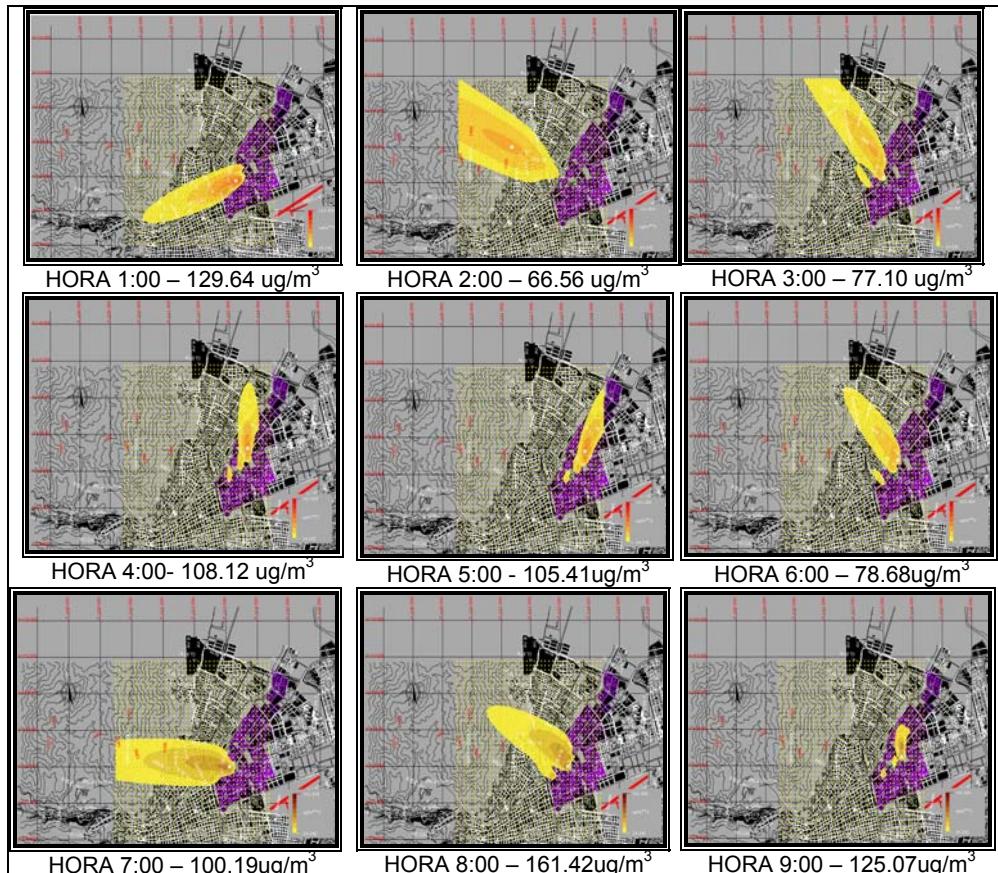
La estación entrega datos meteorológicos desde la hora 00:00 hasta la hora 23:00, para la modelación en ISC3, se tomo la hora 00:00 como la hora 1, mientras que en el modelo AERMOD BREEZE la hora tomada como la hora 1 fue la 01:00.

La mayor concentración se obtuvo en las coordenadas X = 113250 y Y = 112000, donde están ubicadas las empresas de Lavamodas, Promodet, C.I Cobres de Colombia, y Laboratorios Baxter, las cuales pertenecen a los sectores de Fibras y textiles, mármol y acabados en madera y químico y farmacéutico, respectivamente.

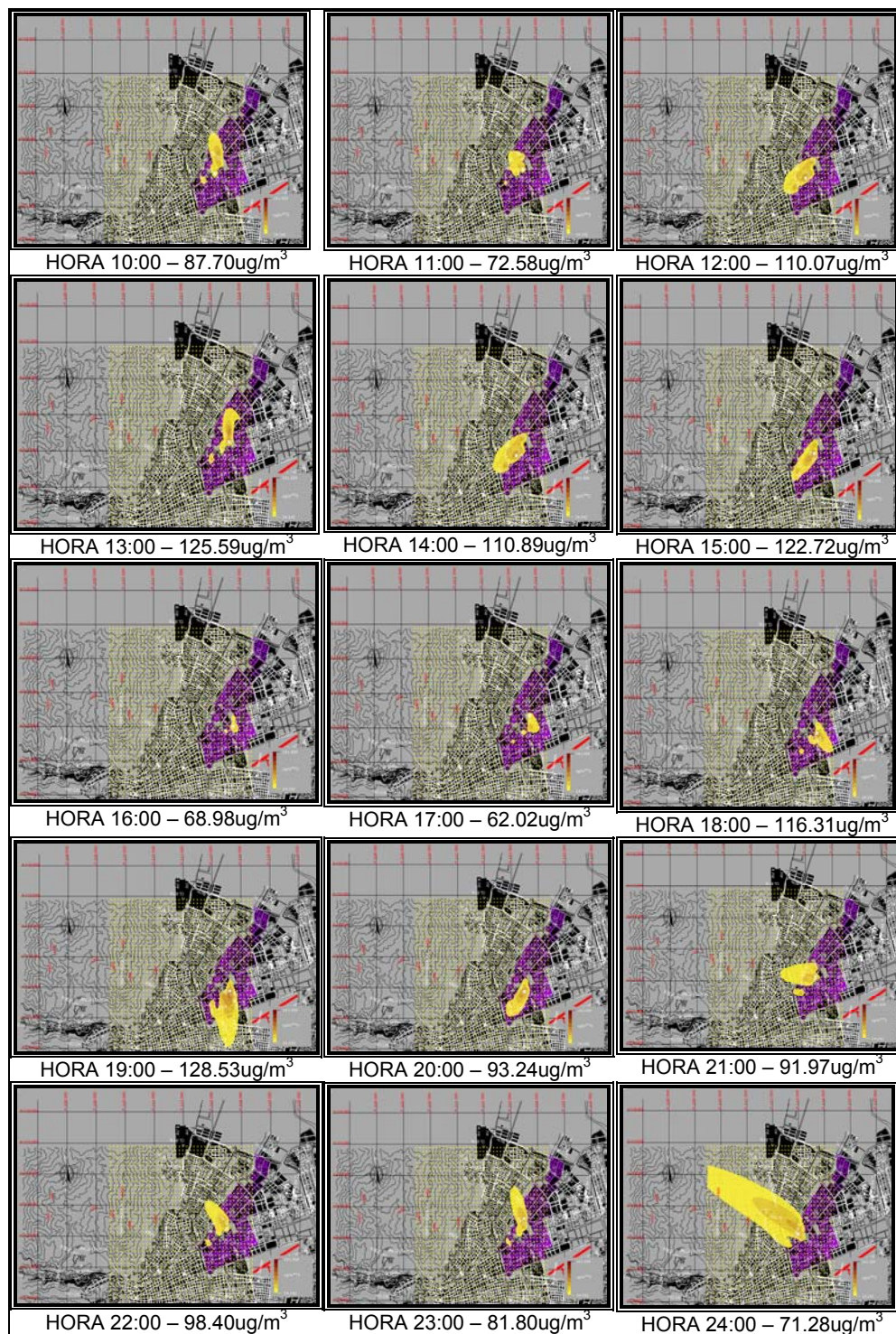
Los mapas también muestran que la dispersión disminuye hacia la dirección nor-oeste de la Comuna Cuatro, presentando una dirección predominante hacia la zona sur-oriental de la Comuna Dos, en los barrios Prados del Norte y San Vicente.

- **Concentraciones hora a hora marzo 1 de 2006**

Se realizó además la simulación para un periodo de tiempo de promediación de una hora, para determinar si se cumple con la norma establecida o si sobrepasa los límites.



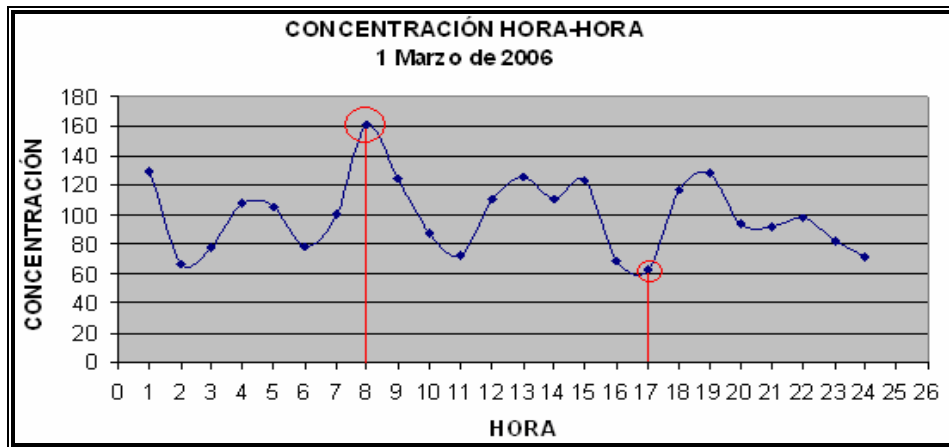




**Figura 14.** Concentraciones hora-hora Aermód Breeze 1 marzo de 2006

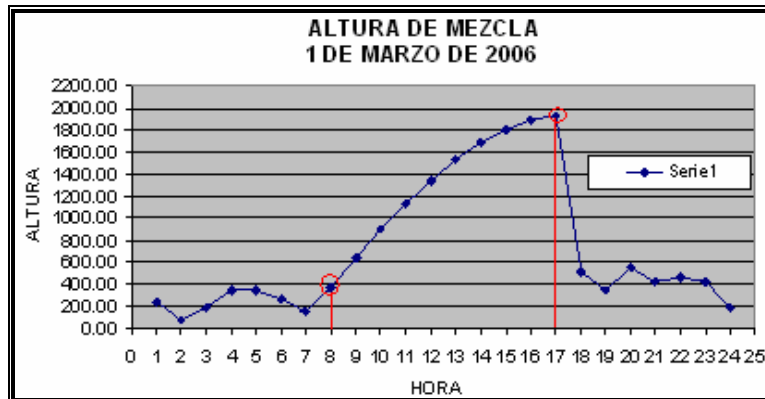
En la figura 14 se puede observar que la mayor concentración ocurre en la hora 8:00 a.m., y la menor a las 17:00 p.m., lo que se relaciona con la altura de mezcla, ya que hay un cambio en su comportamiento de forma ascendente a las 8:00 a.m. y de forma descendente a las 17:00 p.m.

En la grafica 15 se puede observar con más detalle el comportamiento de la concentración hora-hora para el 1 de marzo de 2006.

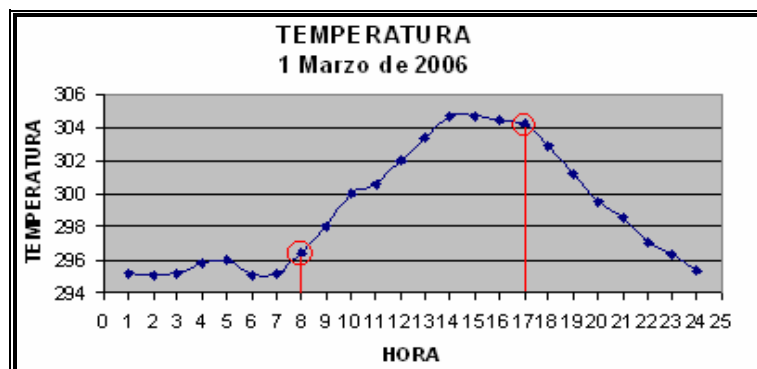


**Figura 15.** Concentración hora-hora 1 marzo de 2006

La altura de mezcla se encuentra relacionada con la radiación solar y a su vez con la temperatura, la cual se empieza a incrementar de manera importante a partir de las 8 a.m. hasta las 17 p.m, es a esta hora que la capa de mezcla alcanza su mayor espesor. Luego adquiere valores mínimos hasta las primeras horas de la mañana.



**Figura 16.** Altura de mezcla 1 marzo de 2006



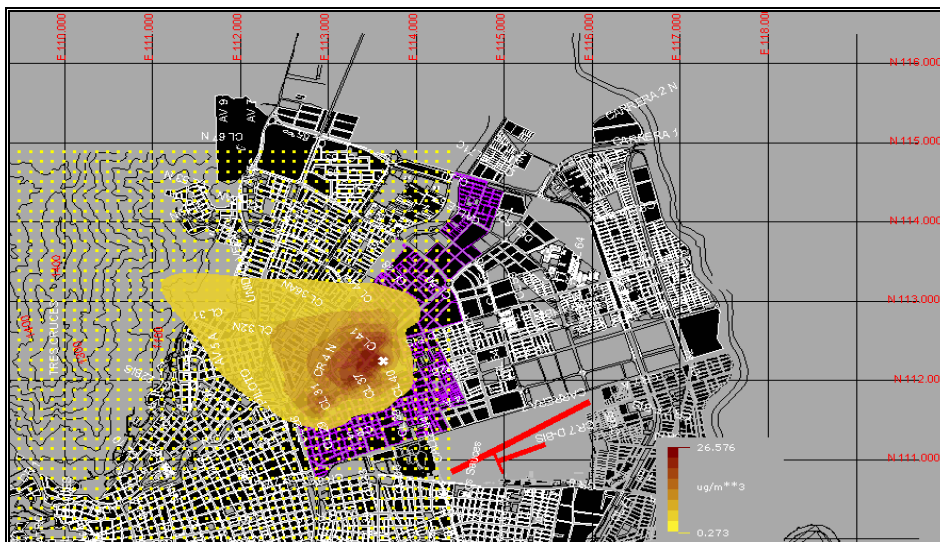
**Figura 17.** Temperaturas para el 1 marzo de 2006

En general, la concentración de un contaminante, es directamente proporcional a la emisión del mismo pero inversamente proporcionales a la intensidad del viento y la altura de capa de mezcla, es decir, si el viento es fuerte y la altura de mezcla es máxima, entonces el transporte y la dispersión son mayores y por lo tanto la concentración del contaminante es menor, entonces, el efecto más adverso a los receptores (seres vivos e inertes) ocurren cuando los vientos son débiles y/o la altura de mezcla es muy baja. (Costa, 2005).

Con la anterior simulación se observa la influencia que tienen los datos meteorológicos, tanto la velocidad, dirección del viento, radiación solar, temperatura y altura de mezcla.

Con el fin de determinar la sensibilidad del modelo AERMOD, se realizó la simulación incrementando el doble y disminuyendo a la mitad un parámetro meteorológico importante como lo es la velocidad del viento.

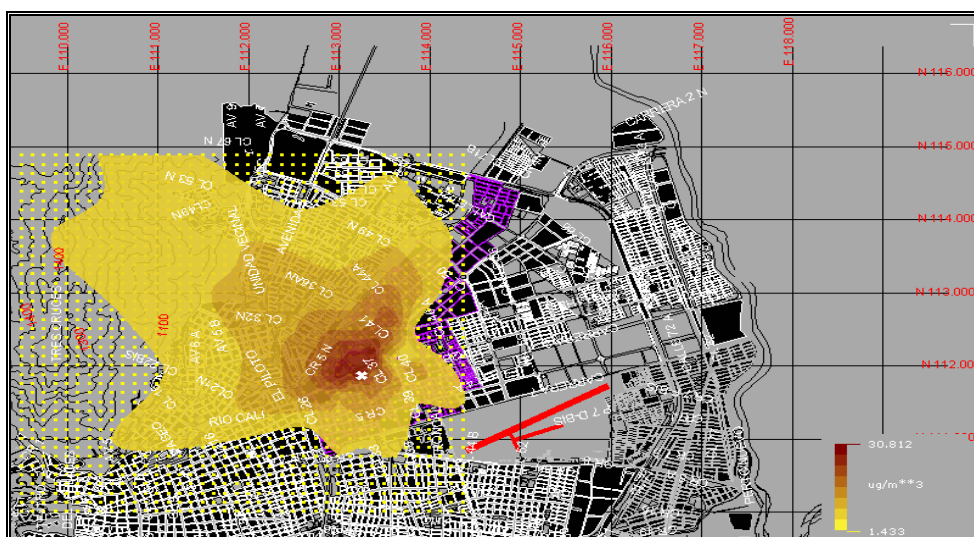
Al aumentar la velocidad del viento al doble se obtuvo una concentración máxima de  $26.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , la dispersión se muestra en la figura 18



**Figura 18.** Concentración Aermod Breeze 1 Marzo de 2006, velocidad del viento al doble

Al aumentar la velocidad del viento se puede observar que se cumple la relación inversa que existe entre esta y la concentración, ya que a mayor velocidad la concentración disminuye, se presenta una reducción del 13.45%, con respecto a la modelación inicial.

Al disminuir la velocidad del viento a la mitad, la concentración máxima obtenida fue de  $30.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ , la dispersión se observa en la figura 19.

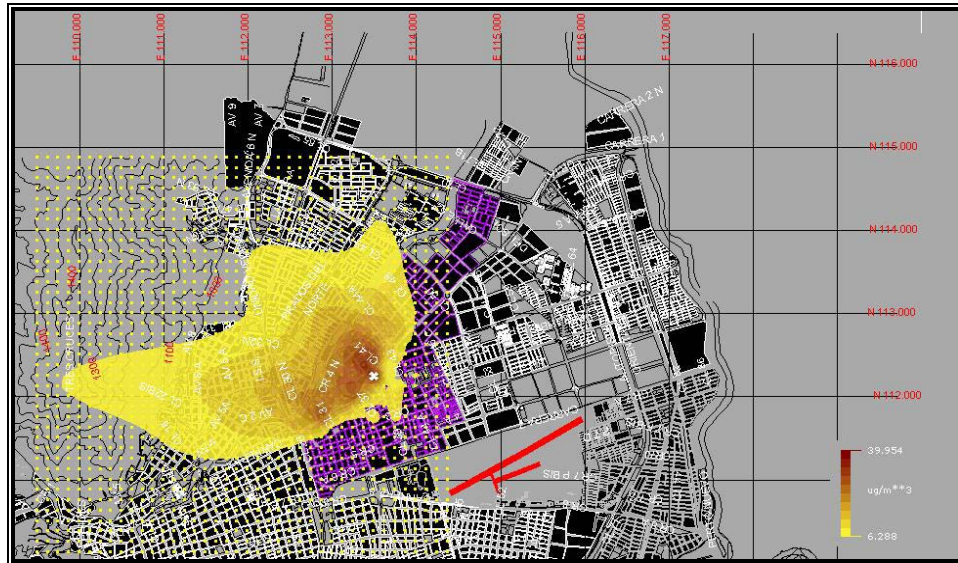


**Figura 19.** Concentración Aermod Breeze 1 Marzo de 2006, velocidad del viento a la mitad



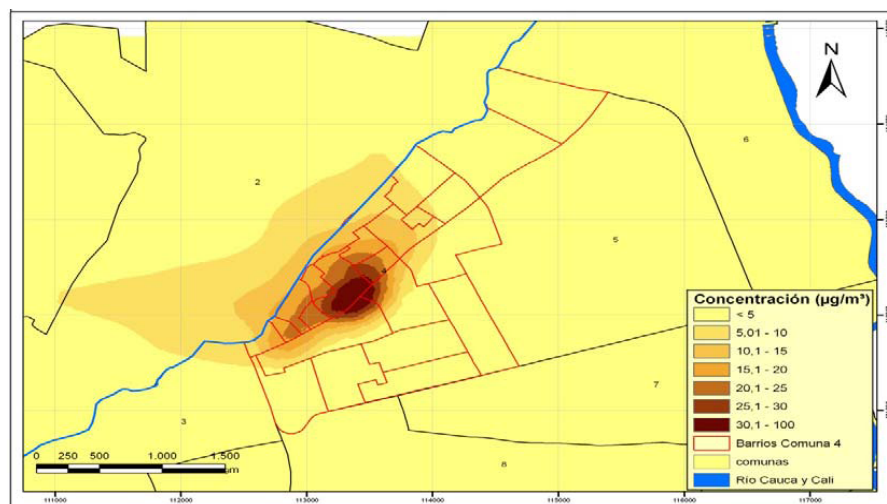
Se obtiene el resultado contrario a la anterior simulación ya que a menor velocidad del viento se obtiene una concentración mayor, incrementada en un 0.32%

Para el día 1 de Agosto de 2006, el resultado de la simulación del modelo AERMOD se presenta en la figura 20, donde se obtuvo una concentración máxima de  $39.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$



**Figura 20.** Concentración Aermოდ Breeze 1 agosto de 2006

La simulación para el día 1 de Agosto de 2006 con el modelo ISC3 se presenta en la figura 21, donde la concentración máxima obtenida es de  $59.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$



**Figura 21.** Concentración ISC3 1 agosto de 2006

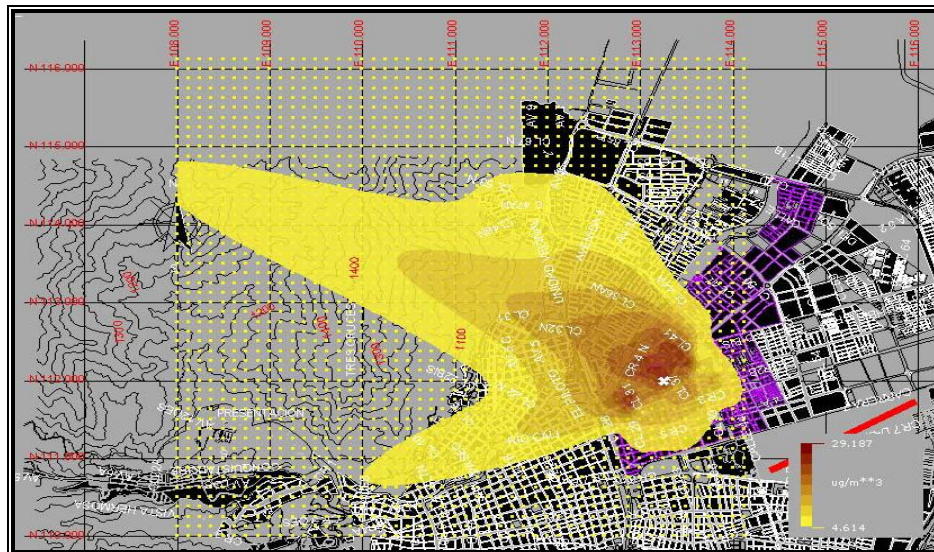
Se observan comportamientos similares tanto en la forma en que se dispersa el contaminante como en la dirección a la que se dirige.

Los mapas muestran que la dispersión disminuye hacia la dirección sur-oeste de la Comuna Cuatro, presentando una dirección predominante hacia la zona sur-oriental de la Comuna Dos, principalmente en los barrios Versalles, Santa Mónica y San Vicente, siguiendo hacia el cerro de las Tres Cruces.

Para este caso la mayor concentración se obtuvo en las coordenadas  $X = 1135000$  y  $Y = 112250$ , donde están ubicadas las empresas de Britilana, Modatex, Colombiana de Adhesivos, y Colgate Palmolive, que pertenecen a los sectores de fibras y textiles, artes graficas y conversión de papel y aseo y cosméticos, respectivamente.

Para observar la variación de la dispersión con respecto a los datos meteorológicos se realizaron dos nuevas simulaciones para los días 1 marzo de 2010 y 6 de agosto de 2006.

La simulación obtenida con el modelo AERMOD para el día 1 de Marzo de 2010 se muestra en la figura 22, donde la concentración máxima es de  $29.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

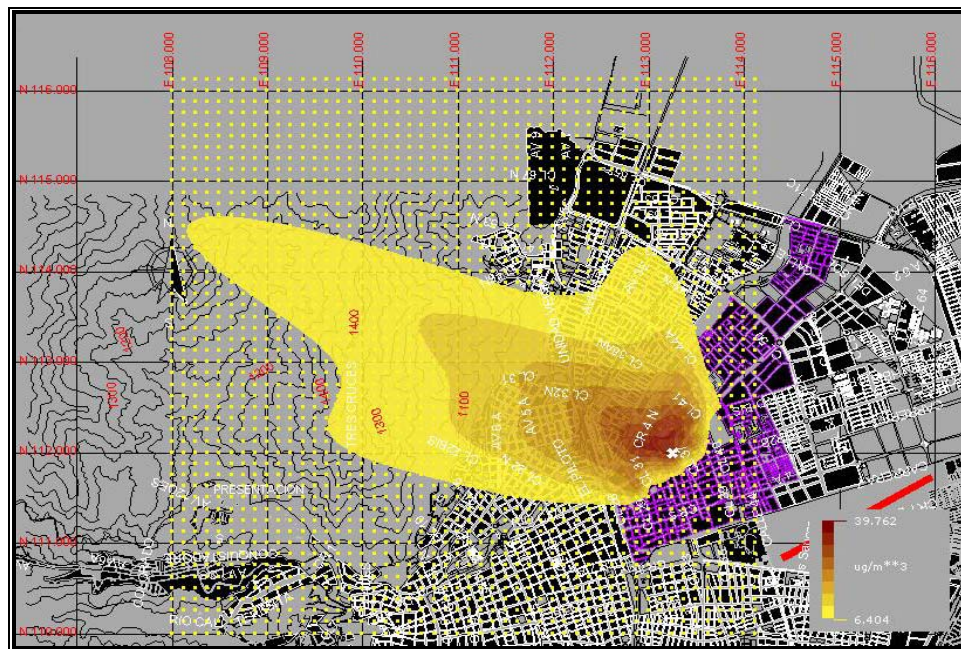


**Figura 22.** Concentración Aermოდ Breeze 1 marzo de 2010

La mayor concentración obtenida se presentó en las coordenadas  $X = 113250$  y  $Y = 112000$ , donde están ubicadas las empresas, Lavamodas, Modatex, Colombiana de Adhesivos, Alimentos La Cali y CI Cobres, pertenecientes a los sectores de fibras y textiles, artes graficas y conversión de papel, alimentos y bebidas y mármol y acabados en madera, respectivamente.

La dispersión disminuye hacia la dirección nor-oeste de la Comuna Cuatro, presentando una dirección predominante hacia la zona sur-oriental de la Comuna Dos, principalmente en el barrio Prados del Norte y en forma más ligera en el barrio San Vicente.

Para el día 6 de Agosto de 2009 la simulación obtenida con el modelo AERMOD se presenta en la figura 23, la concentración máxima fue de  $39.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$



**Figura 23.** Concentración Aermოდ Breeze 6 agosto de 2009

Para esta simulación la dirección de la dispersión tiene la misma tendencia que en las simulaciones anteriores, afectando también el barrio Prados del Norte de la Comuna Dos. La mayor concentración obtenida se presentó en las coordenadas  $X = 113250$  y  $Y = 112000$ , cuyas empresas más cercanas son: Lavamodas, Colombiana de Adhesivos, Alimentos La Cali y CI Cobres, pertenecientes a los sectores de fibras y textiles, artes graficas y conversión de papel, alimentos y bebidas y mármol y acabados en madera, respectivamente.

Con los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones se observa como influye la variación de la velocidad y principalmente la dirección del viento, en la dispersión del contaminante evaluado.

Además se puede concluir que los sectores que más aportan emisiones de material particulado son: el sector de fibras y textiles, artes gráficas y conversión de papel y mármol y acabados en madera.

En una fuente consultada (U.S. EPA, 2003) se realiza una comparación de las concentraciones máximas del ISC3 y el AERMOD para 396 receptores y en condiciones de modelación diversas se obtienen como resultados generales, que:

1. En condiciones rurales con chimeneas medianas, los valores de AERMOD son menores.
2. Para períodos largos en zonas rurales y con chimeneas altas, los valores de AERMOD son mayores.
3. Para períodos cortos y chimeneas pequeñas, tanto en zonas urbanas como rurales, los valores de AERMOD son menores.
4. Para chimeneas muy altas en zonas urbanas (AERMOD menor).

Teniendo en cuenta las condiciones en que se realizó la modelación, es decir, zona urbana, con chimeneas cortas, el numeral 3 se ajusta más a las condiciones de modelación simuladas y concuerdan con el resultado arrojado en el presente trabajo (Carbonel, 2003).

De acuerdo con los mapas de dispersión de la concentración de material particulado se puede deducir que el sector más afectado de la Comuna Dos es el barrio Prados del Norte al Nor-Oeste de las fuentes emisoras.

Para realizar una mejor evaluación de la calidad del aire en este sector sería conveniente situar una estación de monitoreo en el sentido predominante del viento desde la zona emisora, que permita tener un mejor control de las inmisiones que allí se presentan y así evitar el deterioro de la salud de sus habitantes.



La estación ubicada en la Base Aérea Marco Fidel Suárez ayuda en la evaluación de la calidad del aire de la Comuna Cuatro, pero debido a que se encuentra en el punto opuesto al sentido predominante del viento en la zona, no registra los valores de inmisión relacionados con las fuentes de interés.

Es claro que la puesta en marcha de la red de monitoreo es costosa, pero con la ayuda de los modelos de dispersión de contaminantes se pueden mitigar los costos, ofreciendo una mejor ubicación de cada estación, que permita un mejor monitoreo y ayude a contribuir a una óptima calidad del aire para los ciudadanos.

---

---

## 6. CONCLUSIONES

---

---

- ✓ La revisión bibliográfica de los modelos, permitió conocer la variedad de escenarios que se pueden modelar a la hora de evaluar dispersión de contaminantes atmosféricos.
- ✓ El modelo seleccionado al ser recomendado por la EPA ha tenido un amplio trayecto en la modelación de contaminantes. AERMOD BREEZE con su interfaz de usuario más amigable hace que el manejo sea más rápido y cómodo, con su versatilidad permite modelar diversos tipos de fuentes.
- ✓ Bajo las condiciones de modelación establecidas se demostró que AERMOD es un software aplicable a una gran variedad de condiciones, y que los resultados obtenidos permitieron establecer la incidencia de las fuentes fijas sobre la calidad del aire de Cali.
- ✓ De la simulación realizada, se puede deducir que existe una zona predominante hacia donde se dirigen los contaminantes emitidos por las fuentes de la Comuna Cuatro, esta zona es hacia el Sur – Oriente de la Comuna Dos.
- ✓ Las concentraciones obtenidas en las simulaciones no superan la norma colombiana establecida, sin embargo es pertinente aclarar que solo fuentes fijas de un sector en particular son incluidas.
- ✓ Al realizar la prueba de sensibilidad al modelo para el día 1 de marzo de 2006, se comprobó que existe una relación inversa entre la velocidad del viento y la concentración estimada, se obtuvo una mayor variación al aumentar la velocidad que al disminuirla con porcentajes de 13.45% y 0.32% respectivamente.
- ✓ La reubicación de las estaciones de monitoreo cercanas a la zona de estudio requiere de un análisis más detallado de la zona como un conjunto, teniendo en cuenta una calidad de información confiable, que hasta el momento es casi nula.

---

## 7. RECOMENDACIONES

---

- ☞ Dada la predominancia de la dispersión de los contaminantes hacia la comuna 2 es necesario realizar investigaciones en la zona ya que los habitantes se deben ver afectados por la contaminación, además es recomendable ubicar una estación de monitoreo que ayude a regular las emisiones producidas en este sector.
  
- ☞ Realizar un inventario de emisiones actual tanto para fuentes fijas como móviles, ya que estas también generan un alto nivel de contaminación. Con la información actualizada se puede predecir mejor la dispersión de los contaminantes.
  
- ☞ Simular diferentes escenarios para conocer más a fondo el comportamiento de los contaminantes, para ayudar en la toma de decisiones acerca de la calidad del aire en la ciudad de Santiago de Cali.
  
- ☞ Es importante apoyar las propuestas del Ministerio del Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, quienes desean establecer un protocolo unificado de inventario de emisiones para las empresas, ya que tradicionalmente, se han usado los factores de emisión recomendados por la US-EPA para este propósito y existen controversias sobre los factores específicos de emisión que deben ser utilizados para cada actividad y la aplicabilidad de dichos factores.
  
- ☞ Con esta modelación se pudo comprobar la importancia de contar con información meteorológica confiable, puesto que dicha información es la base de la simulación ya que de ella dependen muchos de los parámetros necesarios para calcular las concentraciones de un determinado contaminante.

---

---

## BIBLIOGRAFÍA

---

---

- ☞ APONTE CORONADO, Carlos Hernán. Inventario de emisiones de contaminantes primarios y simulación de la dispersión atmosférica de partículas suspendidas totales emitidas por fuentes fijas puntuales en la comuna 4 de Santiago de Cali. Tesis de Maestría. Santiago de Cali: Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, 2009. 130p.
  
- ☞ ARREGOCÉS CASTRO, Julio César, CORREAL PORRAS, Diana Pilar. Implementación del protocolo de vigilancia y calidad de aire del IDEAM, como herramienta metodológica para la evaluación del impacto ambiental generado sobre el recurso aire en la sociedad portuaria de santa marta (spsm). Proyecto de grado por el título ingeniero ambiental y sanitario. Bogota: Universidad de la Salle, Facultad de ingeniería ambiental y sanitaria, 2008. 156p.
  
- ☞ BENAVIDES, Henry. Simulación de la dispersión de material particulado por chimeneas industriales en Bogotá. IDEAM. , 2003.
  
- ☞ Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental. Disponible en Internet <[www. Bvsde.ops-oms.org](http://www.Bvsde.ops-oms.org)>
  
- ☞ BLASER , Martín. Dispersión de la contaminación atmosférica causada por el tráfico vehicular. Guatemala, 2000.
  
- ☞ BUSTOS SALAS, Cristian. Aplicación de modelos de dispersión atmosférica en la evaluación de impacto ambiental, Chile, 2004, 86p.
  
- ☞ Departamento Administrativo de Planeación. CALI EN CIFRAS 2009. Disponible en: [http://planeacion.cali.gov.co/Publicaciones/Cali en Cifras/Caliencifras2009.pdf](http://planeacion.cali.gov.co/Publicaciones/Cali%20en%20Cifras/Caliencifras2009.pdf)
  
- ☞ CAMBRIDGE ENVIRONMENTAL RESEARCH CONSULTANTS. Comparison of regulatory design concentrations: ADMS versus AERMOD and ISCST3. 2000. Disponible en: <<http://www.cerc.co.uk/>>

- ☞ Caputo M., *et al.* Análisis comparativo de modelos de dispersión de contaminantes en la atmósfera. Estados Unidos, 2005
  
- ☞ CARBONEL TURTÓS, Leonor et al. Comparación preliminar del sistema de modelos AERMOD e ISCST3. La Habana, Cuba, 2003.
  
- ☞ CENTRO DE GESTIÓN DE RESIDUOS DE GIPUZKOA. Estudio de impacto por contaminación ambiental por olores. Gipuzkoa.2009. Disponible en: <<http://www.ingurumena.ejgv.euskadi.net>>
  
- ☞ CIEMAT. Modelización de la contaminación atmosférica. España, 2010. Disponible en: <<http://www.ciemat.es/MCAportal/portal.do>>
  
- ☞ COSTA POSADA, Carlos. ATLAS CLIMATOLÓGICO NACIONAL. Colombia. .2005. Disponible en:< [www.ideam.gov.co](http://www.ideam.gov.co)>
  
- ☞ DAGMA (Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente). Panorama ambiental: Comuna 4, 1997. Disponible en: <http://www.cali.gov.co/publico2/gobierno/dagmaweb/comuna4.htm>
  
- ☞ DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE GESTIÓN DE CALIDAD DEL AIRE (DAGMA), Programa Integral para el Mejoramiento de la Calidad del Aire, 2003, 46p.
  
- ☞ DEREK, Elsom. La Contaminación Atmosférica. Brasil: Ediciones Cátedra S.A, 1997, 373p.
  
- ☞ DISPERSIÓN DE MATERIALES RADIATIVOS EN LA ATMÓSFERA [Anónimo]. Disponible en: < <http://www.ib.cnea.gov.ar>>
  
- ☞ ESCOBAR, Marcela. Lo verde paga. En: Revista Dinero. Septiembre, 2007. no. 286, p.186.
  
- ☞ ESPERT ALEMANY, Vicent y LOPEZ JIMENEZ, Amparo. Dispersión de Contaminantes en la Atmósfera. México: Alfaomega, 2004, 218p

- ☞ HENRY, Glynn J y HEINKE, Gray W. Ingeniería Ambiental. México: Prentice Hall, 199, 778p
- ☞ IDEAM, Documento técnico sobre criterios a tener en cuenta para el desarrollo de un inventario de emisiones, Colombia, 2005, 51p.
- ☞ INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA. Norma oficial Mexicana para el tratamiento por incineración de residuos peligrosos. México, 2003
- ☞ JARAMILLO, Mauricio, NUÑES, Maria, et al. Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos por fuentes puntuales en la zona Cali- yumbo (Colombia). Colombia, 2005.
- ☞ KORC, Marcelo E, SAENZ Rodolfo. Monitoreo de la calidad del aire en América Latina. Perú, 1999.
- ☞ MENESES RUIZ, Elieza, et al. Dispersión local de contaminantes atmosféricos producto de la generación eléctrica. Caso de Estudio: Central Termoeléctrica Carlos Manuel de Céspedes de Cienfuegos. Ciudad Habana, Cuba, 2004
- ☞ MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL (MAVDT). CONPES 3344. Lineamientos para la formulación de la política de prevención y control de la contaminación del aire. Bogotá, Colombia. Marzo de 2005, 30p.
- DECRETOS 948 DE 1995. Colombia, 1995. Disponible en: <http://www.presidencia.gov.co>
- ☞ MORENO GOMEZ, Rosa Maria. Modelación de la calidad del aire en el Valle del Cauca, Colombia, Mayo de 2001.
- ☞ ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. Guías para la calidad del aire. Lima, Perú, 2004

- ☞ PAZ ORTEGA, Ernesto, et al. Modelación de la dispersión de contaminantes atmosféricos emitidos por el tráfico vehicular en una vía de Ciudad de La Habana. Cuba, 2000.
- ☞ PLANEACIÓN MUNICIPAL DE CALI. Disponible en: < <http://planeacion.cali.gov.co>>
- ☞ PIERNAGORDA AGUILERA, Eloy, MARTÍN, Fernando et al. V Seminario de calidad del aire en España. 1 ed. Santander, octubre. 2006.
- ☞ Red de monitoreo de la calidad del aire. Disponible en: <[www.cali.gov.co](http://www.cali.gov.co)>
- ☞ RUIZ MURCIA, José Franklin. Simulación de la contaminación atmosférica generada por fuentes móviles en Bogotá, Colombia, Agosto de 2002.
- ☞ SEINFFELD, John. Contaminación Atmosférica: Fundamentos físicos y químicos. Madrid, España. Instituto de Administración Local, 1978, 558p.
- ☞ SOFTWARE AMBIENTAL. Modelos de Dispersión en el Aire (ADM) 2009. Lakes Environmental. Disponible en: <<http://www.ingenieria-ambiental.es/secciones/control-emisiones>>
- ☞ TORRES Enríquez, Ramón. Comparación de modelos de dispersión de emisiones provenientes de fuentes fijas. México, 2004. 72p.
- ☞ US EPA. Preferred/Recommended Models. Disponible en: <[http://www.epa.gov/ttn/scram/dispersion\\_prefrec.htm#rec](http://www.epa.gov/ttn/scram/dispersion_prefrec.htm#rec)>
- ☞ VENKATRAM, Akula , YUAN Jing, Dispersion within a model urban area. USA, 2005
- ☞ VENKATRAM, Akula, et al. Evaluating the use of outputs from comprehensive meteorological models in air quality modeling applications. USA, 2006
- ☞ WARK, Kenneth y WARNER, Cecil F. Contaminación del Aire: Origen y Control. México: Limusa, 1999, 650p.

---

---

## ANEXOS

---

---

### ANEXO 1. DESCRIPCIÓN DE MODELOS CONSULTADOS

#### ➤ MODELOS RECOMENDADOS POR LA EPA

- AERMOD
- CALPUFF
- BLP
- CALINE3
- CAL3QHC/CAL3QHCR
- CTDMPLUS
- OCD

#### CALPUFF

• <b>Origen:</b>	Sigma Research Corporation (Earth Tech, Inc.) US EPA
• <b>Tipo de modelo:</b>	Modelo de dispersión Gaussiana
• <b>Tipo de contaminante:</b>	Contaminantes inertes, primarios, sustancias peligrosas, amoníaco y PM <sub>10</sub>
• <b>Tipos de fuentes:</b>	Fuentes puntuales, de área, de volumen y móviles. Además de fuentes de emisión variable o constante.
• <b>Topografía:</b>	Terreno simple o complejo.
• <b>Área:</b>	Urbana y rural
• <b>Meteorología:</b>	Velocidades del viento bajas
• <b>Escala temporal:</b>	Desde una hora hasta un año
• <b>Escala espacial:</b>	Desde decenas de metros hasta cientos de kilómetros. Mas de 50Km a partir de la fuente a 200 Km.
• <b>Código fuente disponible:</b>	Si
• <b>Software libre:</b>	Público
• <b>Ambiente informático:</b>	MS-DOS

Tabla 4. Características modelo CALPUFF

El Sistema de Modelado CALPUFF incluye tres componentes principales: CALMET, CALPUFF y CALPOST, además de una serie de programas de preprocesamiento diseñados como interfaz entre el modelo y los conjuntos de datos meteorológicos y geofísicos utilizados habitualmente.



**1. CALMET:** Modelo de diagnóstico micro meteorológico que permite generar campos 3D de viento en zonas de topografía y usos de suelos complejo, y campos 2D de estabilidad y altura de la capa de mezcla. Dependiendo de la complejidad del área de estudio el modelo puede trabajar con resoluciones de tamaño de celda de 50 o 100 metros.

Además genera campos bidimensionales de otras variables asociadas, como la altura de mezcla, características de la superficie y propiedades de dispersión están también incluidas en el archivo de salida del módulo CALMET y que se utiliza como entrada al modelo CALPUFF.

**2. CALPUFF:** Es un modelo dinámico tipo “puff” Lagrangiano Gaussiano no estacionario que presenta dos sistemas de coordenadas para el cálculo del desplazamiento de los contaminantes: uno absoluto, referido a las coordenadas del foco emisor, en el que se calcula la traslación media de los elementos de contaminante considerados y otro relativo, referido a un punto representativo de la traslación media del penacho, para tener en cuenta la dispersión del penacho debido a la turbulencia. CALPUFF es capaz de modelar, simular, el transporte la dispersión y el impacto de contaminantes inertes y reactivos emitidos por las fuentes modeladas, en áreas de topografía compleja a largas distancias, alturas no homogéneas, meteorología de superficie y sobre un campo de vientos construido con CALMET.

Los modelos tipo “puff” representan una pluma de contaminantes continuo como un número discreto de paquetes de material contaminante. El modelo evalúa la contribución de un “puff” en la concentración atmosférica de un receptor en un instante determinado, para luego permitir que el puff se mueva, evoluciones en tamaño, fuerza, etc., hasta la próxima iteración. Luego, la concentración total en un receptor resultará de la sumatoria de las contribuciones de todos los “puff”. Las salidas primarias de CALPUFF contienen concentraciones horarias o flujos de deposición horarios evaluados en puntos receptores seleccionados.

**3. CALPOST:** es utilizado para el post procesamiento de la información generada por CALPUFF durante el modelamiento, crea tablas que resumen los resultados de la simulación identificando, por ejemplo, las máximas concentraciones medias en un receptor a nivel horario, 3-horas, 24-horas o anual, necesarias para la evaluación de los resultados según los estadísticos establecidos en las normas de calidad del aire.

La Agencia de Protección Ambiental de EU (EPA) presenta el modelo CALPUFF como parte de los paquetes computacionales recomendados para la dispersión de contaminantes, para ser empleado en el transporte de contaminantes a gran escala (de 50 a 200 km de la fuente) y también para la aplicación en escalas locales donde existan variaciones de las condiciones meteorológicas, velocidades de viento bajas, efecto de fumigación, recirculaciones ó estancamientos y efectos debido al tipo de terreno ó costa, se recomienda para análisis basados en visibilidad. También tiene en cuenta el efecto marítimo y la brisa marina.

Un inconveniente de los modelos de Puff ha sido la necesidad de considerar varias Puff para representar adecuadamente el efecto de las plumas dentro de las cercanías de la fuente. Si no se considera la sobre posición de los Puff, la concentración estimada en el receptor entre dos Puff en un instante podría resultar subestimada. (TORRES, 2004)

Aplicaciones:

- Depositación de contaminantes tóxicos.
- Reacciones químicas (Contaminantes primarios y secundarios).
- Múltiples sustancias químicas.
- Impacto a corta distancia de fuentes puntuales, de área o de línea.
- Incendios forestales, provocados o naturales.
- Evaluación de la visibilidad.
- Estudios de transporte de contaminantes de largo o de corto alcance.

**BLP**  
**(Bouyant Line and Point Source Model)**

• <b>Origen:</b>	US EPA
• <b>Tipo de modelo:</b>	Modelo de dispersión Gaussiana
• <b>Tipo de contaminante:</b>	Contaminantes primarios. No maneja deposición y asentamiento de contaminantes
• <b>Tipos de fuentes:</b>	Fuentes puntuales y lineales con empuje térmico en sus emisiones en Plantas de reducción de aluminio y otras fuentes industriales.
• <b>Topografía:</b>	Terreno simple
• <b>Área:</b>	Rural
• <b>Meteorología:</b>	Horaria
• <b>Escala temporal:</b>	Corto plazo de 1 a 24 horas y largo plazo mensual, estacional y anual
• <b>Escala espacial:</b>	Menos de 50Km a partir de la fuente.
• <b>Código fuente disponible:</b>	Si
• <b>Software libre:</b>	Público
• <b>Ambiente informático:</b>	MS-DOS

Tabla 5. Características modelo BLP

El modelo **BLP** es un modelo de dispersión gaussiano y se emplea básicamente para modelar fuentes puntuales y lineales con empuje térmico en sus emisiones. Se emplea básicamente para tratar problemas de dispersión en actividades industriales específicas (plantas de reducción del aluminio). En éste modelo no se consideran las fuentes emisoras volumétricas ni de área, solo chimeneas donde la sobre elevación de penacho y el downwash son importantes, contiene una opción que determina analíticamente la elevación del penacho, que resulta cuando los efectos de la velocidad vertical del viento son considerados, si la velocidad del viento se acerca a cero, la relación de elevación del penacho se reduce a la conocida formulación de Briggs. El modelo BLP consta de dos componentes adicionales: un postprocesador POSTBLP, y un programa de unión llamado BLPSUM, que fusiona dos archivos de salida BLP en un archivo de entrada para el POSTBLP.

Los datos meteorológicos se pueden introducir en BLP ya sea como un archivo independiente de entrada preprocesado (PMD), o como datos meteorológicos por hora en formato de texto al final de la secuencia de ejecución de entrada (hasta 24 horas), estos fueron reemplazados para que pudieran ser leídos por el tipo de datos meteorológicos utilizados en el modelo ISCST (Industrial Source Complex Model), cuyo formato es en ASCII.

La conversión de los datos meteorológicos a un formato binario ya no es necesario y ya no es soportado por el modelo. El BLP y programas asociados se han compilado y ejecutado en computadores IBM, utilizando el compilador Fortran 9.0,

Entre los datos de las fuentes requeridos para el modelo están, fuentes puntuales: altura de la chimenea, diámetro interno velocidad y temperatura de salida, tipo de emisión de contaminantes, fuentes de línea: coordenadas de los puntos terminales de la línea, altura de emisión, ancho promedio de la fuente lineal, espacio entre edificaciones, entre otros. Entre los datos meteorológicos se encuentran: datos climatológicos superficiales por hora, dirección y velocidad del viento, temperatura y altura de mezclado. Para los datos de receptores se requieren la localización y la elevación o el tamaño de la grilla. (INE, 2003)

Se obtiene como resultados la concentración total u opcionalmente fuente de contribución de análisis, frecuencia mensual y anual de distribución de concentración promedio para cada receptor cada 1, 3 y 24 horas, las cinco concentraciones promedio mas altas y las cincuenta concentraciones mas altas sobre cada receptor.

**CALINE 3**  
**California Line Source Model – Version 3**

• <b>Origen:</b>	US EPA
• <b>Tipo de modelo:</b>	Modelo de dispersión Gaussiana
• <b>Tipo de contaminante:</b>	Contaminantes no reactivos (inertes CO) y partículas
• <b>Tipos de fuentes:</b>	Fuentes móviles
• <b>Topografía:</b>	Terreno poco complejo
• <b>Área:</b>	Rural. No es adecuado para zonas urbanas con terreno complejo (túneles, edificios de mas de tres pisos)
• <b>Meteorología:</b>	Velocidad del viento mayor a 1 m/s
• <b>Escala temporal:</b>	De 1 a 24 horas promediando tiempos
• <b>Escala espacial:</b>	Distancias mayores de 10 Km y menores de 50 Km
• <b>Código fuente disponible:</b>	Si
• <b>Software libre:</b>	Público
• <b>Ambiente informático:</b>	MS-DOS

Tabla 6. Características modelo CALINE3

CALINE3 es un modelo de dispersión o penacho gaussiano para estado estable, aprobado por la US EPA, se emplea con la finalidad de modelar el grado de polución, la dispersión de los contaminantes no reactivos y la calidad de aire en torno a vías de transporte, calles principales, cruces, puentes, etc. Es también utilizado con frecuencia en el planeamiento de vías rápidas (highways) en terreno complejo.

No es adecuado para las zonas urbanas con terrenos complejos, situaciones de túneles urbanos, (edificios de más de tres pisos), velocidad del viento inferiores a 1 m/s, o distancias de más de 10 kilómetros.

Este modelo de estado estacionario puede aplicarse para determinar las concentraciones de contaminantes de aire a localidades receptoras asentadas en declives, terraplenes, puentes y secciones cortadas de carreteras localizadas en terrenos relativamente no complicados.

El modelo es aplicable para cualquier tipo de dirección y orientación de carretera y localidades receptoras. El modelo ha sido ajustado promediando tiempos y superficies rugosas y puede manejar por encima de 20 sectores y 20 receptores. Este también contiene un algoritmo para depositación y velocidad de asentamiento o sedimentación tal que las concentraciones de partículas, pueden ser pronosticadas.

Es necesario clasificar las fuentes como declives, terraplenes, puentes o depresiones, determinar sus coordenadas de sectores en puntos terminales, la densidad del tráfico, el factor de emisión, altura y zonas anchas de mezclado. Para la meteorología se requiere de la dirección y velocidad del viento, clases de estabilidad, altura de mezcla y la concentración ambiental de contaminantes (lejanías a la carretera), y para cada receptor solo se debe determinar las coordenadas y la altura por encima del suelo.

Como resultados se obtienen las concentraciones de cada receptor para cada una de las condiciones meteorológicas especificadas. (INE, 2003)

*CALINE4*. Este modelo actualiza el CALINE3 pero no ha sido aprobado por la US EPA. Permite estimar las tasas de emisión excesiva debido a embotellamientos, demoras y modos de circulación.

### CAL3QHC/CAL3QHCR

• <b>Origen:</b>	US EPA y entre otras empresas de software
• <b>Tipo de modelo:</b>	Modelo de dispersión Gaussiana
• <b>Tipo de contaminante:</b>	Monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ), partículas (PM), y otras concentraciones de contaminantes inertes
• <b>Tipos de fuentes:</b>	Móviles
• <b>Área:</b>	Vías
• <b>Meteorología:</b>	Velocidad del viento
• <b>Escala temporal:</b>	Anual – 24 horas
• <b>Escala espacial:</b>	Por defecto 10 Km
• <b>Código fuente disponible:</b>	Si
• <b>Software libre:</b>	Público / Privado
• <b>Ambiente informático:</b>	MS-DOS / Windows

Tabla 7. Características modelo CAL3QHC/CAL3QHCR

El modelo CAL3QHCR es una versión mejorada de CAL3QHC, esta versión puede procesar hasta un año de datos meteorológicos por hora, las emisiones de vehículos, y el volumen de tráfico y de señalización en una carrera de modelo. Además, 1-hora y en funcionamiento 8-hora promedio de CO o de 24 horas y un promedio anual del bloque de PM pueden ser calculados.

El CAL3QHCR es un modelo de carretera de dispersión gaussiana, que predice las concentraciones de contaminantes del aire cerca de las carreteras y calles arteriales debido a las emisiones de los vehículos de motor que opere en condiciones de libre circulación y los vehículos de ralentí.

Este modelo divide la vía en segmentos, que son considerados como elementos de la vía, cada uno de los cuales produce concentraciones incrementales que se van sumando para formar la concentración total estimada del contaminante dado en un receptor en particular. La distancia del elemento al receptor se mide sobre una recta perpendicular, trazada desde el receptor hasta el eje central de la vía. El primer elemento se conforma como un cuadrado con lados iguales al ancho de la vía y su posición es determinada por el ángulo entre la vía y la dirección del viento

El modelo CAL3QHCR, contiene nuevos algoritmos de cálculo que lo hacen superior a otros programas, incorpora factores que no habían sido suficientemente considerados y que influyen en la dispersión de los contaminantes.

Este software es capaz de procesar de manera conjunta los datos meteorológicos horarios de un período largo (normalmente un año), las emisiones de la flota de vehículos y el volumen de tráfico para cada hora de todos los días de la semana, al permitir definir hasta siete perfiles (uno para cada día de la semana), con datos para las 24 horas. Adicionalmente, tiene en cuenta las señalizaciones del tránsito (semáforos) y las colas de autos en los mismos, permitiendo modelar intercepciones.

El CAL3QHCR presenta gran flexibilidad y permite realizar las evaluaciones de dos condiciones del tráfico: la primera, cuando existe flujo libre tiene en cuenta factores de emisión y el flujo vehicular (cantidad de vehículos por unidad de tiempo); y la segunda, cuando existe una intercepción regulada por semáforo, donde se utilizan además de los datos anteriormente mencionados el ciclo de las señalizaciones y las condiciones del tráfico vehicular. En esta segunda condición, los factores de emisión se expresan en g/hora.

El modelo puede evaluar perfiles de emisiones horarias diferentes para cada día de la semana, pero asume que todas las semanas del año son similares. CAL3QHCR reporta como salida para cada receptor, las concentraciones promedios anuales y las concentraciones máximas para 1, 8 y 24 horas dentro del período de datos meteorológicos evaluados, teniendo en cuenta o no el valor de la contaminación de fondo. Presenta los primeros cinco valores máximos horarios del año, independientemente que existan otros días con esos mismos valores. También incluye una tabla con la duración de las calmas con sus respectivas frecuencias.

CAL3QHCR tiene por defecto capacidad para modelar hasta 120 tramos y 60 receptores en el plano X,Y,Z, aunque estos límites pueden ser modificados en el programa de ser necesario. La ubicación del tramo es especificada mediante sus coordenadas iniciales y finales. El programa permite modelar múltiples fuentes y receptores, así como curvas y segmentos con variación en los factores de emisión. (Paz, 2000)

**CTDMPLUS**  
**(Complex Terrain Dispersion Model Plus Algorithms for Unstable Situations)**

• <b>Origen:</b>	US EPA
• <b>Tipo de modelo:</b>	Modelo de dispersión Gaussiana
• <b>Tipo de contaminante:</b>	Contaminantes primarios no reactivos (SO <sub>2</sub> ) y material particulado
• <b>Tipos de fuentes:</b>	Fuentes puntuales
• <b>Topografía:</b>	Terreno complejo
• <b>Área:</b>	Urbana y rural
• <b>Meteorología:</b>	Velocidad del viento >1m/s
• <b>Escala temporal:</b>	Corto plazo, de 1 a 24 horas y largo plazo, mensual, estacional y anual
• <b>Escala espacial:</b>	Distancias menores de 50 Km
• <b>Código fuente disponible:</b>	Si
• <b>Software libre:</b>	Público
• <b>Ambiente informático:</b>	MS-DOS

Tabla 8. Características modelo CTDMPLUS

Modelo de dispersión Gaussiana para condiciones estables en terrenos complejos y para fuentes puntuales, aplicable a todo tipo de condiciones de estabilidad atmosférica.

Inicialmente el modelo CTDMPLUS solo servía para condiciones estables y neutras pero con las actualizaciones realizadas al código se cuenta con la capacidad de modelar condiciones inestables en el día.

El modelo calcula en una hora (o en un determinado periodo promedio constante) básicamente la trayectoria de la pluma (en condiciones estables o neutras su forma) y como es deformada por la rugosidad del terreno, y en condiciones inestables (convectivas) se basa en una función de densidad de probabilidad de las velocidades verticales para estimar la concentración de contaminantes, además se tiene en cuenta la rugosidad del terreno y la altura de mezcla durante el día.

La concentración calculada en cada receptor depende de la posición de este sobre el terreno, y de la forma y posición de la pluma resultante. (US EPA)



**OCD**  
**(Offshore and Coastal Dispersion Model)**

• <b>Origen:</b>	US EPA
• <b>Tipo de modelo:</b>	Modelo de dispersión Gaussiana
• <b>Tipo de contaminante:</b>	Contaminantes primarios. No maneja depositación ni deposición de contaminantes
• <b>Tipos de fuentes:</b>	Fuentes puntuales, lineales y de área ubicadas costa afuera
• <b>Topografía:</b>	Terreno complejo
• <b>Escala temporal:</b>	Horario
• <b>Escala espacial:</b>	Distancias menores de 50 Km
• <b>Código fuente disponible:</b>	Si
• <b>Software libre:</b>	Público
• <b>Ambiente informático:</b>	MS-DOS

**Tabla 9.** Características modelo OCD

Modelo de dispersión Gaussiana rectilíneo desarrollado para determinar el impacto de emisiones producidas por fuentes (puntuales, lineales o de área), ubicadas costa afuera y mar adentro. Incorpora los efectos que sufre el penacho al cruzar la línea de costa. Necesita datos meteorológicos horarios tanto en mar adentro como en la costa. El modelo OCD fue modificado para que permitiera diferenciar entre la meteorología en la costa y la del mar para evaluar la dispersión parcial de la pluma cuando una inversión térmica esta presente y para calcular episodios de fumigación. Asume distancias cortas e intervalos de tiempo cortos

Las mediciones sobre el agua incluyen la dirección y velocidad del viento, altura de mezcla, temperatura del aire sobre el agua y la humedad relativa, y del mar, temperatura de la superficie. La turbulencia es utilizada por el modelo, pero no es obligatoria. El modelo permite hasta 250 fuentes puntuales, cinco fuentes de área, o una fuente de línea y pueden ser utilizados 180 receptores.

➤ **MODELOS ALTERNATIVOS**

- |           |             |
|-----------|-------------|
| ➤ ADAM    | ➤ ISC3      |
| ➤ ADMS-3  | ➤ PLUVUE II |
| ➤ AFTOX   | ➤ SCIPUFF   |
| ➤ ASPEN   | ➤ SDM       |
| ➤ DEGADIS | ➤ SLAB      |

**ADAM**  
**Air Force dispersion Assessment Model**

• <b>Origen:</b>	US EPA
• <b>Tipo de modelo:</b>	Modelo de dispersión Gaussiana (Modelo Determinístico – Euleriano)
• <b>Tipo de contaminante:</b>	Cloro, flúor, tritóxido de nitrógeno, sulfuro de hidrogeno, fluoruro de hidrogeno, dióxido de azufre, fosgeno y amoniaco
• <b>Tipos de fuentes:</b>	Fuentes puntuales y de área
• <b>Topografía:</b>	No disponible
• <b>Área:</b>	No disponible
• <b>Meteorología:</b>	Dirección y velocidad del viento para determinar la estabilidad atmosférica, temperatura.
• <b>Escala temporal:</b>	No disponible
• <b>Escala espacial:</b>	No disponible
• <b>Código fuente disponible:</b>	No
• <b>Software libre:</b>	Público
• <b>Ambiente informático:</b>	MS-DOS (Fortran)

Tabla 10. Características modelo ADAM

Creado por la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU (US EPA) y la Oficina de Planificación y Estándares de la Calidad del Aire (OAQPS). Es un modelo de caja Gaussiano que incorpora termodinámica, química, transferencia de calor, aerosoles y efectos de gases densos. Puede tratar escenarios de emisiones continuas e instantáneas, fuentes de área o puntuales, emisiones desde depósitos presurizados o no, tratamiento de contaminantes en fase vapor y líquida. Este modelo resulta útil para su uso en caso de escapes accidentales en industrias químicas.

ADAM trata un amplio espectro de condiciones de emisión de origen (por ejemplo, rupturas de tanques a presión, derrames de líquido, líquido/vapor) y también sirve para tratar una variedad de condiciones de dispersión (por ejemplo, fuentes a nivel del suelo de la zona, todos los tipos de densidades relativas a la nubes, reacciones químicas y cambios de fase, de gases densos). Una de las limitaciones del modelo es que el código se restringe a ocho productos químicos, para utilizar más químicos se debe modificar su código fuente.

**ADMS-3**  
**Atmospheric Dispersion Modeling System**

• <b>Origen:</b>	CERC (Cabridge Enviromen tal Research Consultants)
• <b>Tipo de modelo:</b>	Modelo de dispersión avanzado Gaussiano
• <b>Tipo de contaminante:</b>	SO <sub>2</sub> , CO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, PM <sub>10</sub>
• <b>Tipos de fuentes:</b>	Fuentes puntuales, de línea, de área
• <b>Topografía:</b>	Terreno complejo, húmedo y seco
• <b>Área:</b>	Urbana y rural
• <b>Meteorología:</b>	Utiliza un preprocesador AERMET. Velocidad del viento, temperatura del aire, nubosidad
• <b>Escala temporal:</b>	Desde minutos a un año
• <b>Escala espacial:</b>	Distancias menores de 50 Km
• <b>Código fuente disponible:</b>	No
• <b>Software libre:</b>	Público / Privado
• <b>Ambiente informático:</b>	MS-DOS / Windows

Tabla 11. Características modelo ADMS-3

Este es un modelo británico de la compañía CERC que ha conseguido ser incluido en la lista de modelos alternativos. Salvo en ciertas circunstancias, no es un modelo de uso gratuito. Se trata de un modelo de dispersión avanzado para calcular concentraciones de contaminantes emitidos de forma continua desde focos puntuales, fuentes de línea (carreteras) y fuentes de área o tridimensionales.

También puede usarse para emisiones discretas desde un foco puntual. Incluye algoritmos para tratar los principales efectos debidos a obstáculos presentes en el lugar (edificios), los efectos producidos por la superficie (tierra/mar, naturaleza del suelo, relieve o terrenos complejos), depósito húmedo y seco, sedimentación gravitacional, fluctuaciones rápidas de concentración, reacciones químicas, decaimiento radiactivo y dosis gamma, sobre elevación del penacho, emisiones en chorro, diversos rangos de promediado en tiempo para los resultados (desde minutos a un año), procesador meteorológico, etc, calcula la rosa de los vientos en 3D.

Como datos de entrada de las fuentes son necesarios, la ubicación, tipo de emisión, altura de la fuente, velocidad de emisión del gas, diámetro interior de la fuente o chimenea, y la temperatura del gas. Entre los datos meteorológicos se tiene: observaciones horarias de superficie para la entrada al preprocesador meteorológico y / o los parámetros de la capa límite (altura de la capa límite, la longitud de Monin-Obukhov, flujo de calor superficial, etc.)

Los datos de salida que se obtienen son, la concentración promedio y los percentiles en un periodo de tiempo especificado para una grilla de receptores definida. Promedios a corto plazo y largo plazo de deposición húmeda y seca y la actividad total radiactiva. Posee una avanzada reproducción gráfica con líneas de trazado de las variables central y un paquete de contornos (isopletras).

La primera versión de ADMS fue lanzada en 1993. La versión actual 3 fue lanzada en febrero de 1999 y sólo se ejecuta en entorno de Microsoft Windows, aunque todavía tiene una base de código FORTRAN. La versión 4 tiene previsto su próximo lanzamiento con características añadidas.

**AFTOX**  
**Air Force Toxic Chemical Dispersion Model**

• <b>Origen:</b>	US EPA
• <b>Tipo de modelo:</b>	Modelo de dispersión Gaussiana
• <b>Tipo de contaminante:</b>	Tóxicos
• <b>Tipos de fuentes:</b>	Fuentes puntuales, de área
• <b>Código fuente disponible:</b>	No
• <b>Software libre:</b>	Público
• <b>Ambiente informático:</b>	MS-DOS

Tabla 12. Características modelo AFTOX

AFTOX es un modelo de dispersión Gaussiano para emisiones elevadas o a nivel del suelo, continuas o instantáneas de un líquido o un gas desde focos puntuales o de área. Proporciona mapas de concentración a nivel del suelo o un punto especificado o la máxima concentración a una altura e instante dados.

**ASPEN**  
**Assessment System for Population Exposure Nationwide**

• <b>Origen:</b>	US EPA
• <b>Tipo de modelo:</b>	Modelo de dispersión Gaussiana
• <b>Meteorología:</b>	Velocidad y dirección del viento
• <b>Escala temporal:</b>	Anual
• <b>Código fuente disponible:</b>	No
• <b>Software libre:</b>	Público
• <b>Ambiente informático:</b>	MS-DOS

Tabla 13. Características modelo ASPEN

El modelo ASPEN (Assessment System for Population Exposure Nationwide) consta de módulo de dispersión y otro de mapeo. El primero es un modelo Gaussiano basado en ISCST3 para estimar concentraciones promedio anuales en un conjunto receptores fijos en las proximidades de una fuente emisora. Los datos de entrada necesarios son datos de emisión, meteorológicos y datos del censo de población.

### DEGADIS

• <b>Origen:</b>	US EPA
• <b>Tipo de modelo:</b>	Modelo de dispersión Euleriana
• <b>Tipo de contaminante:</b>	Gases densos
• <b>Tipos de fuentes:</b>	Fuentes de área
• <b>Topografía:</b>	Terrenos planos
• <b>Escala temporal:</b>	Cortos periodos
• <b>Software libre:</b>	Público

Tabla 14. Características modelo DEGADIS

DEGADIS simula la dispersión atmosférica de un gas denso emitido a nivel del suelo desde una fuente de área. Trata emisiones con momento cero sobre terreno llano sin pendientes. Incorpora los efectos de corrientes de gravedad, entrada de aire en la nube de gas, etc.

### ISC3 (Industrial Source Complex Model)

• <b>Origen:</b>	US EPA
• <b>Tipo de modelo:</b>	Modelo de dispersión Gaussiana
• <b>Tipo de contaminante:</b>	Contaminantes primarios y emisiones continuas de contaminantes tóxicos o residuos peligrosos. Considera depositación y deposición seca. PM <sub>10</sub>
• <b>Tipos de fuentes:</b>	Fuentes puntuales, lineales, de área y de volumen
• <b>Topografía:</b>	Terreno simple o complejo
• <b>Área:</b>	Urbano o rural
• <b>Meteorología:</b>	Dirección y velocidad del viento
• <b>Escala temporal:</b>	De 1 hora a un año
• <b>Escala espacial:</b>	Distancias menores de 50 Km
• <b>Código fuente disponible:</b>	Si
• <b>Software libre:</b>	Público
• <b>Ambiente informático:</b>	MS-DOS

Tabla 15. Características modelo ISC3

El ISC es un modelo de pluma Gaussiana de estado estacionario el cual puede ser utilizado para valorar concentración de contaminantes para una amplia variedad de Fuentes asociadas con una fuente compleja industrial. Este modelo puede considerarse para lo siguiente: asentamiento y depositación seca de partículas, fuentes lineales, superficiales y volumétricas, y separación de fuentes puntuales.

Es necesario conocer de las fuentes la localización, el tipo de emisiones, la altura física de la chimenea, la velocidad de emisión, diámetro interno de la chimenea y la temperatura. Otros datos opcionales de entrada incluyen la elevación de la fuente, las dimensiones de la construcción, la distribución del tamaño de partículas con velocidades de sentamiento correspondiente, y los coeficientes de reflexión superficiales.

El ISC requiere de información climatológica superficial para el preprocesador RAMMET, el cual suministra las clases de estabilidad por hora, la dirección y velocidad del viento, temperatura y altura de mezcla. Para el ISC , la entrada incluye la estabilidad el viento alcanzada, el promedio de la altura de mezcla vespertina y matutina y el promedio de la temperatura del aire.

Para el receptor es necesario determinar las coordenadas, la elevación sobre el suelo puede ser opcional. Se obtienen como resultados la concentración promedio para n días o la depositación calculada par a cada receptor, para cualquier combinación deseada de fuentes y para cualquier día especificado o periodo de tiempo. Además se muestra en tablas los valores de concentración más altos y los segundos mas altos para cada receptor de cada periodo de tiempo y para cualquier combinación de fuentes. (INE, 2003).

La Agencia de Protección Ambiental de EU (EPA) presenta el modelo ISCST3 como parte de los paquetes computacionales recomendados para la dispersión de contaminantes, para estudios exploratorios de gabinete para simulara las emisiones ocasionadas por complejos industriales. Y recomendado para aplicaciones menores a 50 km de distancia de la fuente, en donde se ha visto un mejor desempeño del modelo, (EPA, 1995). (Torres,2004)

ISC-PRIME es una mejora del modelo ISCST, que incorpora el "building downwash".

**PLUVUE II**  
**Pluma Visibility Model**

• <b>Origen:</b>	US EPA
• <b>Tipo de modelo:</b>	Modelo de dispersión Gaussiana
• <b>Tipo de contaminante:</b>	Material particulado, NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , HNO <sub>3</sub>
• <b>Tipos de fuentes:</b>	Fuentes área
• <b>Meteorología:</b>	Clase de estabilidad, velocidad y dirección del viento, temperatura del aire, humedad relativa y altura de mezcla
• <b>Código fuente disponible:</b>	Si
• <b>Software libre:</b>	Público
• <b>Ambiente informático:</b>	MS-DOS

Tabla 16. Características modelo PLUVUE II

Modelo para estimar la reducción de visibilidad y decoloración atmosférica causada por penachos resultantes de emisiones de partículas, óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre emitidos desde una única fuente (puntual o de área). El modelo predice el transporte, difusión, reacciones químicas, efectos ópticos y depósito.

**SCIPUFF**  
**Second – order Closure Integrated PUFF Model**

• <b>Origen:</b>	US EPA
• <b>Tipo de modelo:</b>	Modelo de dispersión Lagrangiana
• <b>Tipos de fuentes:</b>	Fuentes puntuales
• <b>Código fuente disponible:</b>	No
• <b>Software libre:</b>	Público

Tabla 17. Características modelo SCIPUFF

Es un modelo Lagrangiano de nubes (puffs) gaussianas que simula la dispersión proporcionando la distribución tridimensional de contaminantes y su evolución. Proporciona una predicción de la varianza estadística en los campos de concentración resultantes debido a fluctuaciones aleatorias del campo de vientos.

**SDM**  
**Shoreline Dispersion Model**

• <b>Origen:</b>	US EPA
• <b>Tipo de modelo:</b>	Modelo de dispersión Gaussiana
• <b>Tipos de fuentes:</b>	Fuentes puntuales
• <b>Topografía:</b>	Terreno simple
• <b>Área:</b>	Rural y urbana
• <b>Escala temporal:</b>	Promedios entre una hora y un año
• <b>Escala espacial:</b>	Distancias menores de 50 Km
• <b>Código fuente disponible:</b>	No
• <b>Software libre:</b>	Público
• <b>Ambiente informático:</b>	MS-DOS

Tabla 18. Características modelo SDM

Es un modelo de dispersión de múltiples fuentes utilizado para determinar las concentraciones a nivel del suelo debidas a emisiones elevadas puntuales (chimeneas) y estacionarias situadas cerca de la costa.

**SLAB**

• <b>Origen:</b>	US EPA
• <b>Tipo de modelo:</b>	
• <b>Tipo de contaminante:</b>	Fuga de gases a baja temperatura mas pesados que el aire
• <b>Tipos de fuentes:</b>	Fuentes de volumen
• <b>Meteorología:</b>	Distingue la entrada vertical en la superficie y la entrada transversal y longitudinal al viento por los bordes de la nube
• <b>Código fuente disponible:</b>	Si
• <b>Software libre:</b>	Público
• <b>Ambiente informático:</b>	MS-DOS

Tabla 19. Características modelo SLAB

SLAB es otro modelo para gases más densos que el aire adecuado para accidentes industriales. Resuelve las ecuaciones unidimensionales de momento, conservación de masa, especies y energía, y la ecuación de estado. Puede tratar casos de chorros de gas a nivel del suelo y en altura, charcos líquidos evaporando gas denso y emisiones instantáneas. La mejor herramienta para predecir zonas afectadas e impactos potenciales en escenarios de fugas accidentales.



Tiene integrado el Risk Management Plan (RMP) de la Agencia Americana de Protección al Medio Ambiente (US EPA) y está también capacitado para analizar las emisiones de fugas accidentales de gases tóxicos.

SLAB 3D es una potente herramienta de visualización en 3D para el modelo SLAB. Esta solución mejora de forma extraordinaria la visualización de predicciones en situaciones de escape tóxico accidental.

SLAB 3D proporciona control total al usuario, con el que puede hacer zoom y rotar el modelo en 3 dimensiones facilitando la visión el modelo desde cualquier perspectiva. Importa sin dificultad cualquier proyecto o datos SLAB View produciendo al instante la visualización en 3D. Tiene la capacidad de guardar cualquier vista que el usuario quiera visitar y da acceso a cualquiera de las vistas salvadas de una lista. Crea y ofrece animaciones tridimensionales mostrando la evolución con el tiempo del penacho de nube tóxica (Plume). Soporta gran variedad de formatos de Mapas de terreno sobre los que se modela el visionado 3D. Archivos AutoCAD DXF y USGS DLG son sólo dos de ellos.

**CDM**  
**Climatological Dispersión Model**

• <b>Origen:</b>	
• <b>Tipo de modelo:</b>	Modelo de dispersión Gaussiana
• <b>Tipo de contaminante:</b>	Contaminantes primarios. El asentamiento y la deposición no son tratados.
• <b>Tipos de fuentes:</b>	Fuentes puntuales y superficiales
• <b>Topografía:</b>	Terrenos planos
• <b>Área:</b>	Urbana
• <b>Meteorología:</b>	Velocidad y estabilidad del viento
• <b>Escala temporal:</b>	Largos periodos (estacionales, mensuales o anuales)
• <b>Escala espacial:</b>	Distancias de transporte de menos de 50 Km.
• <b>Código fuente disponible:</b>	Si
• <b>Software libre:</b>	Público
• <b>Ambiente informático:</b>	MS-DOS

Tabla 20. Características modelo CDM

El CDM es un modelo climatológico de estado estacionario de pluma gaussiana para determinar promedios aritméticos de largos periodos de concentraciones de contaminantes a cualquier nivel receptor del suelo en un área urbana.

Es necesario determinar la localización de la fuente, la relación de promedio de emisiones y alturas de las fuentes de emisiones tanto puntuales como superficiales, además de la temperatura del gas en la chimenea y su velocidad de emisión, y el diámetro interno de la chimenea para cálculos de elevación de pluma. La meteorología se basa en la velocidad y estabilidad del viento, la altura de mezcla y la temperatura promedio del aire. Se requiere de las coordenadas cartesianas de cada receptor. Como resultados se obtienen las concentraciones promedio para el periodo de estabilidad del viento alcanzado para cada receptor (solo aritmético).

**ANEXO 2.**

**Tabla. 2.1.** Características modelos recomendados por la EPA

#	MODELO	ORIGEN	TIPO DE MODELO	TIPO DE CONTAMINANTE	TIPOS DE FUENTES	TOPOGRAFÍA / AREA	METEOROLOGIA	ESCALA TEMPORAL	ESCALA ESPACIAL	CÓDIGO FUENTE DISPONIBLE	SOFTWARE LIBRE	AMBIENTE INFORMÁTICO
1	AERMOD American Meteorology Society EPA Regulatory Model	US EPA	Dispersión Gaussiana		Fuentes de área, de volumen y puntuales (chimeneas)	Terrenos simples y complejos (albedo, ratio Bowen altura de rugosidad superficial) / área rural o urbana	Velocidad, dirección del viento, nubosidad y temperatura del aire	Requiere datos climáticos hora por hora al menos un año		Si	Público / Privado	MS-DOS / Windows
2	CALPUFF	Sigma Research Corporation (Earth Tech, Inc.) US EPA	Dispersión Gaussiana / modelo de dispersión	Contaminantes inertes, primarios, sustancias peligrosas, amoníaco y PM <sub>10</sub>	Fuentes puntuales, de área, de volumen y móviles	Terreno simple o complejo / área urbana y rural	Velocidades del viento bajas	Desde una hora hasta un año	desde decenas de metros hasta cientos de kilómetros Mas de 50Km a partir de la fuente a 200 Km.	Si	Público	MS-DOS
3	BLP Bouyant Line and Point Source Dispersion Model	US EPA	Dispersión Gaussiana	Contaminantes primarios. No maneja deposición de contaminantes	Fuentes puntuales y lineales con empuje térmico en sus emisiones, fuentes industriales	Terreno simple / area rural	Horaria	Corto plazo de 1 a 24 horas y largo plazo mensual, estacional y anual	menos de 50Km	Si	Público	MS-DOS
4	CALINE3	US EPA	Dispersión Gaussiana	Contaminantes no reactivos (inertes CO) y partículas	Fuentes móviles	Terreno poco complejo / no adecuado para zonas urbanas con terreno complejo (túneles, edificios de mas de 3 pisos)	Velocidad del viento mayor a 1 m/seg.	De 1 a 24 horas	Distancias mayores de 10 Km y menores de 50 Km.	Si	Público	MS-DOS

#	MODELO	ORIGEN	TIPO DE MODELO	TIPO DE CONTAMINANTE	TIPOS DE FUENTES	TOPOGRAFÍA / AREA	METEOROLOGIA	ESCALA TEMPORAL	ESCALA ESPACIAL	CÓDIGO FUENTE DISPONIBLE	SOFTWARE LIBRE	AMBIENTE INFORMÁTICO
5	CAL3QHC/CAL3QHCR	US EPA / otras empresas de software	Dispersión Gaussiana	CO, NO2, PM, y contaminantes inertes	Fuentes móviles							
6	CTDMPLUS Complex Terrain Dispersion Model Plus Algorithm for Unstable Situations	US EPA	Dispersión Gaussiana	Contaminantes primarios no reactivos SO <sub>2</sub> y PM	Fuentes puntuales	Terreno complejo / área urbana y rural		Corto plazo de 1 a 24 horas y largo plazo mensual, estacional y anual.	menos de 50 Km	Si	Público	MS-DOS
7	OCD Offshore and Coastal Dispersion Model	US EPA	Dispersión Gaussiana	Contaminantes primarios. No maneja deposición ni deposición de contaminantes	Fuentes puntuales, lineales y de área ubicados costa afuera	Vías	Velocidad del viento	Anual / 24 horas	Por defecto 10 Km.	Si	Público / privado	MS-DOS

**Tabla 2.2.** Características modelos alternativos por la EPA

#	MODELO	ORIGEN	TIPO DE MODELO	TIPO DE CONTAMINANTE	TIPOS DE FUENTES	TOPOGRAFÍA / AREA	METEOROLOGIA	ESCALA TEMPORA	ESCALA ESPACIAL	CÓDIGO FUENTE DISPONIBLE	SOFTWARE LIBRE	AMBIENTE INFORMÁTICO
1	ADAM Air Force Dispersion Assessment Model	US EPA	Dispersión Gaussiana (Modelo Determinis- tico- Euleriano)	Cloro, flúor, trióxido de nitrógeno, sulfuro de hidrogeno, fluoruro de hidrogeno, SO2 y amoniaco.	Fuentes puntuales y de área	No Disponible	Dirección y velocidad del viento para determinar la estabilidad atmosférica, temperatura,	No Disponible	No Disponible	No	Público	MS-DOS (FORTRAN)
2	ADMS-3 Atmospheric Dispersion Modeling System	CERC (Cabridge Enviromen- tal Research Consultants )	Modelo de dispersión avanzado	SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, PM <sub>10</sub> .	Fuentes puntuales, de línea, de área	Terreno complejo, húmedo y seco	Utiliza un pre procesador AERMET Velocidad y dirección del viento, temperatura del aire, nubosidad	Desde minutos a un año		No	Público / Privado	Windows
3	AFTOX Air Force Toxic Chemical Dispersion Model	US EPA	Dispersión Gaussiana		Fuentes puntuales, de área					No	Público	MS-DOS
4	ASPEN Assesment System for Population Exposure Nationwide	US EPA	Dispersión Gaussiana				velocidades y direcciones del viento	Anual		No	Público	MS-DOS
5	DEGADIS		Euleriana	Gases densos	Fuente de área			Cortos periodos			Público	

#	MODELO	ORIGEN	TIPO DE MODELO	TIPO DE CONTAMINANTE	TIPOS DE FUENTES	TOPOGRAFÍA / AREA	METEOROLOGÍA	ESCALA TEMPORA	ESCALA ESPACIAL	CÓDIGO FUENTE DISPONIBLE	SOFTWARE LIBRE	AMBIENTE INFORMÁTICO
6	ISC3 Industrial Source Complex Model	US EPA	Dispersión Gaussiana	Contaminantes primarios, tóxicos o residuos peligrosos emisiones continuas. Considera depositación y deposición seca. PM <sub>10</sub>	Fuentes puntuales, lineales, de área y volumen	Terreno simple o complejo / área urbana o rural	Dirección y velocidad del viento	De una hora a un año (Anual)	menos de 50 Km	Si	Público	MS-DOS
7	PLUVUE II Pluma Visibility Model	US EPA	Dispersión Gaussiana	Partículas, NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , HNO <sub>3</sub> ,	Fuente de área		Estabilidad, velocidad y dirección del viento, temperatura del aire, humedad relativa, altura de mezcla			Si	Público	MS-DOS
8	SCIPUFF Second-order Closure Integrated PUFF Model	US EPA	Lagrangiana		Fuente puntual					No	Público	
9	SDM Shoreline Dispersion Model	US EPA	Dispersión Gaussiana		Fuente puntual	Terreno simple / área urbana y rural		Promedios entre una hora y un año	Distancias menores a 50 Km.	No	Público	
10	SLAB	US EPA		Fuga de gases a baja temperatura mas pesados que el aire	Fuentes de volumen		Distingue la entrada vertical en la superficie y la transv y long al viento por los bordes de la nube.			Si	Público	MS-DOS
11	CDM Climatological Dispersion Model		Dispersión Gaussiana	Contaminantes primarios. El asentamiento y la deposición no son tratados	Fuentes puntuales y superficiales	Terrenos planos / urbana	Velocidad y estabilidad del viento	Largos periodos (estacionales, mensuales o anuales)	Distancias menores a 50 Km.	Si	Público	MS-DOS

**Tabla 2.3.** Matriz de selección del modelo para la zona de estudio

#	MODELO	CONTAMINANTE	FUENTES	TOPOGRAFÍA / ÁREA	METEORO LOGIA	DISPONIBILIDAD	AMBIENTE INFORMÁTICO
1	AERMOD American Meteorology Society EPA Regulatory Model	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2	CALPUFF	✓	✓	✓	✓	✓	X
3	BLP Bouyant Line and Point Source Dispersion Model	X	✓	X	✓	✓	X
4	CALINE3	✓	X	X	✓	✓	X
5	CAL3QHC/CAL3QHCR	✓	X	X	X	✓	X
6	CTDMPLUS Complex Terrain Dispersion Model Plus Algorithm for Unstable Situations	✓	✓	✓	✓	✓	X
7	OCD Offshore and Coastal Dispersion Model	X	✓	X	X	✓	X
8	ADAM Air Force Dispersion Assessment Model	X	✓	X	✓	✓	X
9	ADMS-3 Atmospheric Dispersion Modeling System	✓	✓	✓	✓	X	X
10	AFTOX Air Force Toxic Chemical Dispersion Model	X	✓	X	✓	✓	X
11	ASPEN Assessment System for Population Exposure Nationwide	-	X	X	✓	✓	X
12	DEGADIS	X	X	X	X	✓	X
13	ISC3 Industrial Source Complex Model	✓	✓	✓ (Limitada)	✓	✓	X
14	PLUVUE II Pluma Visibility Model	✓	X	X	✓	✓	X
15	SCIPIUFF Second-order Closure Integrated PUFF Model	X	✓	X	X	✓	X
16	SDM Shoreline Dispersion Model	X	✓	X	X	✓	X
17	SLAB	X	X	X	X	✓	X
18	CDM Climatological Dispersion Model	X	✓	X	✓	✓	X

### ANEXO 3. MODELO SELECCIONADO

#### AERMOD American Meteorology Society EPA Regulatory Model

• <b>Origen:</b>	US EPA / K2
• <b>Tipo de modelo:</b>	Modelo de dispersión Gaussiana
• <b>Tipo de contaminante:</b>	Contaminantes primarios y emisiones continuas de contaminantes tóxicos y peligrosos. Las transformaciones químicas son tratadas mediante un decaimiento exponencial simple.
• <b>Tipos de fuentes:</b>	Fuentes puntuales (chimeneas), de área y de volumen
• <b>Topografía:</b>	Terreno simple y complejo
• <b>Área:</b>	Urbana y rural
• <b>Meteorología:</b>	Velocidad, dirección del viento, nubosidad y temperatura del aire, (albedo, relación de Bowen, rugosidad superficial). Requiere datos climáticos hora por hora
• <b>Escala temporal:</b>	Corto plazo de 1 a 24 horas y largo plazo mensual, estacional y anual
• <b>Escala espacial:</b>	Menos de 50Km a partir de la fuente.
• <b>Código fuente disponible:</b>	Si
• <b>Software libre:</b>	Público / Privado
• <b>Ambiente informático:</b>	MS-DOS / Windows

Tabla 21. Características modelo AERMOD

En 1991 la Sociedad Americana de Meteorología (AMS) y la Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos (US EPA) comenzaron a trabajar de forma conjunta con el objetivo de introducir los conceptos relacionados con la capa límite planetaria (PBL, *Planetary Boundary Layer*) en los modelos de dispersión de contaminantes en la atmósfera. Con este propósito se creó un grupo de trabajo compuesto por científicos pertenecientes a la AMS y US EPA denominado *AMS/EPA Regulatory Model Improvement Committee*, AERMIC.

La finalidad del grupo de trabajo AERMIC fue desarrollar un modelo de dispersión que incluyese los últimos descubrimientos científicos pero, no sólo para mejorar la parametrización de la PBL, sino también para mejorar otros problemas abiertamente reconocidos en los modelos existentes en la época como la interacción del penacho con el terreno, la influencia de los edificios y la dispersión en zonas urbanas. El nuevo modelo desarrollado por AERMIC, se denominó: AERMOD.



A partir del año 2005 la US EPA reemplazó el modelo ISC3 por el modelo AERMOD, el cual pasó a ser el modelo preferido para fines de evaluación de impactos ambientales, es el modelo regulatorio actualmente utilizado por la US EPA.

AERMOD es un Modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos de Pluma Estacionario, diseñado para la dispersión de contaminantes de corto alcance (hasta 50 Km.). En la capa límite estable de la atmósfera (SBL, *Stable Boundary Layer*) , el modelo asume que la distribución de concentraciones es Gaussiana, tanto para el eje x como para el eje y, mientras que en la capa límite convectiva (CBL, *Convective Boundary Layer*), la distribución de concentración horizontal también es asumida Gaussiana, pero la distribución vertical es descrita mediante una Función de Densidad de Probabilidad Bi-Gaussiana.

AERMOD es un sistema de modelación de emisiones que simula procesos atmosféricos físicos esenciales y provee estimaciones refinadas de concentración sobre un amplio rango de condiciones meteorológicas y escenarios de modelación. Es aplicable tanto a áreas rurales como urbanas, a terrenos planos y complejos. Las fuentes de emisión pueden ser de tipo puntual, de área y de volumen.

El modelo incorpora, mediante un acercamiento simple, conceptos básicos y actuales acerca de flujo y dispersión de contaminantes en terrenos complejos, donde la pluma es modelada tanto donde impacta como siguiendo el terreno. Esta aproximación ha sido diseñada para ser físicamente realista y fácil de implementar, eliminando así la necesidad de clasificar a priori entre terrenos simples, intermedios y complejos, como es requerido para el resto de los modelos regulatorios. AERMOD elimina la necesidad de definir regimenes de terrenos complejos, todo el terreno es manejado de manera consistente y continua.

Además, la formulación del modelo ha sido diseñada para evitar cualquier tipo de discontinuidad, de modo que, pequeñas variaciones en los parámetros de entrada no puedan provocar grandes cambios en las concentraciones de salida calculadas con el modelo.

AERMOD incluye un programa central (AERMOD) y dos pre-procesadores de datos, AERMET y AERMAP.

- **AERMET:** preprocesador meteorológico que proporciona a AERMOD los datos necesarios para caracterizar el estado de la atmósfera y la estructura vertical de la capa límite planetaria (PBL), entre otros parámetros, acepta datos de fuentes ubicadas tanto en el sitio como fuera de este. AERMET crea dos archivos: un archivo de datos de superficie (.SFC) y un archivo de datos de viento (.PFL).

Los datos de entrada consisten en datos horarios de cobertura de nubes, meteorología superficial y radiosondeos cada 24 horas. Los resultados del procesamiento consisten en parámetros de turbulencia superficial así como variables meteorológicas (velocidad y dirección del viento, temperatura) con sus valores en la superficie del dominio y también sus perfiles verticales, los que se requieren para poder representar apropiadamente los procesos de transporte y dispersión de emisiones en el dominio estudiado. En caso que no se cuente con radiosondeo en la zona de estudio, AERMET emplea correlaciones empíricas para estimar la altura de mezclado en condiciones extremas (valores máximo y mínimo para cada día modelado).

AERMET posee extensiones y una gran flexibilidad ya que acepta sectores angulares con diferentes propiedades de rugosidad, albedo y razón de Bowen, dependiendo de la dirección del viento predominante, además con la latitud, longitud y estacionalidad estima un balance de energía superficial y así estimar los flujos turbulentos de momentum y calor ( $u^*$  y  $H$ , respectivamente) que definen el estado local de la turbulencia, mediante la aplicación de ecuaciones de diagnóstico.

- **AERMAP:** es un pre-procesador de topografía cuyo propósito es proporcionar una relación física entre las características del terreno y el comportamiento de la pluma de dispersión. AERMAP utiliza los datos del terreno para calcular una altura de influencia representativa del terreno, también referida como escala de altura del terreno. Este pre-procesador es usado también para crear grillas de receptores.

Los datos de entrada incluyen las elevaciones de terreno y las ubicaciones de los receptores en el dominio modelado. La salida incluye, para cada receptor seleccionado, la ubicación y su altura relativa al terreno donde esta emplazado. También se estima una altura crítica para establecer si un penacho va a pasar por sobre una colina o solamente la va a rodear, es decir, empleando la metodología introducida en el modelo CTDMPLUS.

Una de las mejoras más importantes que AERMOD aporta a la modelación de la dispersión es su capacidad de caracterizar la capa límite planetaria (PBL) mediante una parametrización de la superficie y de la capa de mezcla. Esta caracterización la realiza construyendo perfiles verticales de las variables meteorológicas consideradas como representativas.

Cuando se dispone de un perfil vertical de datos meteorológicos (T, presión viento, etc), el modelo AERMOD incorpora una descripción mas actualizada de la dispersión de plumas de todo tipo de fuentes emisoras (puntuales, de área, lineales y de volumen). Por ejemplo, considera que en condiciones convectivas (fuerte insolación, periodo diurno) se produce un ascenso y descenso de masas de aire que puede inducir altos impactos de concentraciones cuando una pluma se dispersa sobre un receptor dado, aspecto que no es modelado en detalle por ISC3, y que es representado en forma probabilística por AERMOD.

Comparado con ISC, AERMOD tiene algoritmos nuevos o mejorados para:

- Dispersión en las capas límites convectiva y estable
- Cálculo de perfiles verticales de viento, turbulencia y temperatura
- Tratamiento de receptores en todo tipo de terrenos, de la superficie hasta por sobre la altura de la pluma
- Elevación y flotación de la pluma
- Tratamiento de la capa límite urbana
- Deposición de partículas y agotamiento de la pluma

## **AERMOD BREEZE**

AERMOD BREEZE es un sistema de modelado de calidad de aire de nueva generación, soporta reglamentaciones mundiales de modelación, regulatorias y no regulatorias. Esta aplicación es utilizada con ayuda de herramientas y funciones para evaluar el impacto de las emisiones a la atmósfera para una variedad de fuentes industriales, incluye las reglamentaciones de la US. EPA, y versiones mejoradas de AERMOD, es compatible con los archivos ejecutables de Fortran de la US EPA.

AERMOD predice la concentración de contaminantes a partir de: fuentes puntuales, de línea, superficie, y volumen, con emisiones variables en todos los tipos de terreno.

AERMOD BREEZE proporciona verificación de datos, análisis y documentación de forma rápida y sencilla. El tiempo necesario para preparar los datos y generar resultados en un proyecto de modelado típico puede ser reducido de horas a minutos. Con su sencilla interfaz de usuario AERMOD BREEZE ayuda al usuario a realizar un buen manejo del software y a dar un buen uso de las herramientas ofrecidas ayudando a reducir costos de desarrollo y mantenimiento de su base de datos

Entre las aplicaciones están, la creación automática de contornos que representan las concentraciones de contaminantes, define las curvas de nivel o los niveles específicos para cada contaminante. Determina el alcance radial de un impacto en escenarios definidos por el usuario grupos de fuentes y períodos promedio. Muestran gráficamente los resultados en Google Herat y Sufer, guarda la imagen o permite copiarla a otra aplicación. Con estos resultados se pueden crear películas de las concentraciones en el tiempo, en formato .AVI y películas flash, para hacer uso de ellas en presentaciones. Las animaciones pueden ser de 2D, 3D. AERMOD BREEZE se integra con 3DAnalyst para realizar el posterior análisis y visualización de los resultados luego de la ejecución del modelo.

AERMOD BREZZE está disponible en tres ediciones: Estándar, Pro y Pro Plus. Cada edición tiene diversos niveles de funcionalidad.

**ANEXO 4. DATOS DE LAS FUENTES PUNTUALES SUMINISTRADOS AL MODELO**

ID	DESCRIPCIÓN	UTM		Elev (m)	TASA DE EMISIÓN (g/s)	ALTURA (m)	TEMP (K)	VEL SALIDA (m/s)	DIÁMETRO CHIMENEA (m)
		East (m)	North (m)						
01	MODATEX	113619	112119	0	1.77	16	470	4.43	0.5
02	TEXCINTAS S.A	113958	112584	0	1.063	25	448	5.6	0.65
03	LAVAMODAS LTDA	113162	112061	0	0.212	25	448	6.1	0.33
04	PROMODET	113007	111637	0	0.71	12	425	6.2	0.38
05	CADBURY ADAMS COLOMBIA	114966	113849	0	0.0438	19	460	6.6	0.66
06	CADBURY ADAMS COLMBIA	114966	113849	0	0.0302	16	451	4.54	0.66
07	PROQUIMES S.A	114232	113580	0	0.0015	7	415	5.9	0.35
08	LABORATORIOS BAXTER S.A	113427	111667	0	0.00083	16	390	4.83	0.78
09	LABORATORIOS BAXTER S.A	113427	111667	0	0.00055	17	371.5	3.7	0.61
010	C.I COBRES DE COLOMBIA LTDA	113394	111943	0	0.75	17	300	3.3	0.49
011	LABORATORIO FRANCO COLOMBIANO	114051	112867	0	0.013	15	337.5	4.82	0.24
012	COLOMBIANA DE ADHESIVOS	113454	112159	0	0.001	17	300	4.7	0.28
013	PEDRO DOMEQ COLOMBIA S.A	114248	112699	0	0.007	14	426.5	5.4	0.25
014	PEDRO DOMEQ COLOMBIA S.A	114248	112699	0	0.0055	17.2	374.5	6.3	0.28
015	HARINERA DEL VALLE	114165	112863	0	0.011	15.4	387.5	5.67	0.6
016	HARINERA DEL VALLE	114165	112863	0	0.0083	15.4	385.5	6.25	0.38
017	RECKITT BENCKISER COLOMBIA S.A	114436	111600	0	0.0088	15.3	417	6.72	0.44
018	ALBACORA LTDA	114681	113745	0	0.0047	8	420	4.8	0.54
019	COLGATE PALMOLIVE S.A	113623	112407	0	0.951	15.4	387.5	5.67	0.6

ID	DESCRIPCIÓN	UTM		Elev (m)	TASA DE EMISIÓN (g/s)	ALTURA (m)	TEMP (K)	VEL SALIDA (m/s)	DIÁMETRO CHIMENEA (m)
		East (m)	North (m)						
020	COLGATE PALMOLIVE S.A	113623	112407	0	0.0693	23	457	6.92	0.66
021	COLGATE PALMOLIVE S.A	113623	112407	0	0.25	42	323.3	7.48	1.7
022	COLGATE PALMOLIVE S.A	113623	112407	0	0.0167	15.4	322.8	5.18	0.44
023	COLGATE PALMOLIVE S.A	113623	112407	0	0.123	15	323.2	22.51	0.38
024	COLGATE PALMOLIVE S.A	113623	112407	0	0.222	38	317.2	14.74	0.66
025	COLGATE PALMOLIVE S.A	113623	112407	0	0.0611	37	317	13.73	0.49
026	FAVESTRELLA S.A	114597	113607	0	0.0016	7	415	4.6	0.5
027	BITRILANA BEN REY S.A	113458	112293	0	0.421	21	400	10.23	0.65
028	C.I PIETRI LTDA	114911	113732	0	0.0012	8	420	5.4	0.25
029	AFTROST HANSEN-PRODUCTOS DANCALI	113747	112658	0	8.E-05	12	425	6.3	0.3
030	PRICOL ALIMENTOS	114421	111542	0	0.012	19.3	525.3	5.78	0.6
031	MANJARES DEL VALLE	114387	113290	0	0.0013	15	363	4.9	0.25
032	CARTONES AMERICA S.A/DIVISION CORRUGADOS	114613	113546	0	0.0055	16.6	469.4	3.45	0.4
033	CARTONES AMERICA S.A/DIVISION CORRUGADOS	114613	113546	0	0.0083	16.6	422.5	3.13	0.4
034	ALIMENTOS LA CALI	113619	112028	0	0.0023	18	403.5	3.77	0.29
035	ALIMENTOS LA CALI S.A	113619	112028	0	0.0026	15	405.5	3.84	0.27
036	RESORTES HERCULES	114208	113734	0	0.00088	13	430	6.3	0.28
037	RESORTES HERCULES	114208	113734	0	0.00088	7.6	437	5.4	0.25
038	RESORTES HERCULES	114208	113734	0	0.0034	16.6	456	3.5	0.24
039	RESORTES HERCULES	114208	113734	0	0.0034	12.5	424.6	11.92	0.25
040	INDUSTRIAS CATO S.A	113164	112472	0	0.0015	20	420	6.5	0.3

**ANEXO 5. RESULTADOS OBTENIDOS PARA LOS CÁLCULOS METEOROLÓGICOS PARA EL DÍA 1 DE MARZO DE 2006**

AÑO	MES	DÍA	DÍA JULIANO	HORA	VELOC VIENTO	DIREC VIENTO	TEMP	TEMP ESCALA	NUBOSIDAD	CALOR SENSIBLE	CALOR EN SUELO	CALOR LATENTE	RELACIÓN BOWEN
2006	3	1	60	1	1.3	68	297	0.06720	0.25	-13.404	-30.803	-17.400	0.770
2006	3	1	60	2	0.4	113	295.2	0.06679	0.25	-4.124	-32.031	-27.907	0.148
2006	3	1	60	3	1.0	135	295.1	0.06677	0.25	-10.311	-32.096	-21.786	0.473
2006	3	1	60	4	1.8	180	295.2	0.06679	0.25	-18.559	-32.031	-13.472	1.378
2006	3	1	60	5	1.8	203	295.8	0.06693	0.25	-18.559	-31.633	-13.074	1.420
2006	3	1	60	6	1.4	135	296	0.06697	0.25	-14.435	-31.498	-17.063	0.846
2006	3	1	60	7	0.6	90	295.1	-0.26314	0.25	32.529	17.790	38.632	0.842
2006	3	1	60	8	0.7	113	295.2	-0.71688	0.25	103.420	55.625	119.080	0.868
2006	3	1	60	9	2.0	180	296.4	-0.40189	0.25	164.786	88.677	189.920	0.868
2006	3	1	60	10	1.6	158	298	-0.65106	0.25	212.446	114.554	245.769	0.864
2006	3	1	60	11	2.0	113	300	-0.60018	0.25	243.150	131.550	283.050	0.859
2006	3	1	60	12	1.5	68	300.6	-0.84013	0.25	254.808	137.964	297.048	0.858
2006	3	1	60	13	1.8	180	302	-0.68087	0.25	246.623	134.077	289.685	0.851
2006	3	1	60	14	1.5	68	303.3	-0.72910	0.25	219.155	119.896	260.429	0.842
2006	3	1	60	15	2.0	45	304.7	-0.43693	0.25	174.274	96.492	211.693	0.823
2006	3	1	60	16	3.6	315	304.7	-0.16025	0.25	115.040	64.900	144.561	0.796
2006	3	1	60	17	3.1	293	304.4	-0.07351	0.25	45.490	27.690	65.271	0.697
2006	3	1	60	18	2.7	315	304.2	0.06883	0.25	-27.839	-31.137	-3.299	8.440
2006	3	1	60	19	1.8	0	302.9	0.06853	0.25	-18.559	-26.034	-7.474	2.483
2006	3	1	60	20	2.9	23	301.2	0.06815	0.25	-29.901	-27.530	2.371	-12.611
2006	3	1	60	21	2.2	90	299.5	0.06776	0.25	-22.683	-28.926	-6.243	3.634
2006	3	1	60	22	2.4	135	298.5	0.06754	0.25	-24.745	-29.702	-4.956	4.993
2006	3	1	60	23	2.2	158	297	0.06720	0.25	-22.683	-30.803	-8.120	2.793
2006	3	1	60	24	1.0	113	296.3	0.06704	0.25	-10.311	-31.293	-20.982	0.491

HORA	RAD SOLAR NETA	RAD SOLAR GLOBAL	ANGULO ELEV SOL $\Psi$	DECLINAC SOLAR $\delta_s$	tutc COORD UNIV TIME	VELOCIDAD DE FRICCIÓN	VELOCIDAD CONVECTIVA DE ESCALA	LONGITUD DE MONIN -OBOKUB	h MEZCLA MECÁNICA	H CONVECTIVA	h MEZCLA TOTAL
1	-61.606	0.0000	-0.9677	-0.149581	6	0.1868	0.0000	38.38	248.44		248.44
2	-64.062	0.0000	-0.8746	-0.149581	7	0.0575	0.0000	3.63	76.44		76.44
3	-64.192	0.0000	-0.7224	-0.149581	8	0.1437	0.0000	22.71	191.10		191.10
4	-64.062	0.0000	-0.5216	-0.149581	9	0.2586	0.0000	73.58	343.99		343.99
5	-63.266	0.0000	-0.2859	-0.149581	10	0.2586	0.0000	73.58	343.99		343.99
6	-62.996	0.0000	-0.0312	-0.149581	11	0.2012	0.0000	44.51	267.55		267.55
7	88.951	191.4300	0.2249	-0.149581	12	0.1150	0.0000	24.56	152.98	0	152.98
8	278.125	427.7339	0.4652	-0.149581	13	0.1343	1.1919	91.20	178.59	372.9632	372.96
9	443.382	632.2882	0.6733	-0.149581	14	0.3832	3.2774	418.10	509.65	643.6485	643.65
10	572.768	791.1527	0.8348	-0.149581	15	0.3066	5.8915	435.94	407.78	897.4688	897.47
11	657.750	893.5012	0.9389	-0.149581	16	0.3832	8.5146	632.02	509.68	1133.2658	1133.27
12	689.819	932.3587	0.9784	-0.149581	17	0.2875	10.5800	498.83	382.33	1343.7445	1343.74
13	670.384	905.0772	0.9507	-0.149581	18	0.3449	11.6547	584.69	458.73	1529.3668	1529.37
14	599.479	813.5158	0.8576	-0.149581	19	0.2875	11.4092	436.75	382.31	1684.8023	1684.80
15	482.458	663.9143	0.7054	-0.149581	20	0.3832	9.7329	467.28	509.66	1807.4001	1807.40
16	324.501	466.4678	0.5046	-0.149581	21	0.6897	6.7179	555.18	917.31	1889.8377	1889.84
17	138.450	234.6320	0.2689	-0.149581	22	0.5939	2.7173	188.67	789.90	1933.1775	1933.18
18	-62.274	-15.7939	0.0142	-0.149581	23	0.3880	0.0000	165.56	515.98		515.98
19	-52.067	0.0000	-0.2419	-0.149581	24	0.2586	0.0000	73.58	343.99		343.99
20	-55.059	0.0000	-0.4822	-0.149581	25	0.4167	0.0000	191.00	554.20		554.20
21	-57.851	0.0000	-0.6903	-0.149581	26	0.3161	0.0000	109.92	420.43		420.43
22	-59.403	0.0000	-0.8518	-0.149581	27	0.3448	0.0000	130.81	458.65		458.65
23	-61.606	0.0000	-0.9559	-0.149581	28	0.3161	0.0000	109.92	420.43		420.43
24	-62.585	0.0000	-0.9954	-0.149581	29	0.1437	0.0000	22.71	191.10		191.10



## ANEXO 6. FORMATOS ARCHIVOS .SFC Y .PFL

Este es el tipo de datos meteorológicos que arroja el preprocesador AERMET, para que sean ingresados al modelo.

### ARCHIVO .SFC

50.8500N		3.9000W		UA_ID:		0	SF_ID:		05396	OS_ID:		05396	VERSION: 07026						
06	3	1	60	1	-13.4	0.187	-9.000	-9.000	0.	248.	38.4	0.800	0.77	0.20	1.30	68.	10.0	295.2	10.0
06	3	1	60	2	-4.1	0.057	-9.000	-9.000	0.	76.	3.6	0.800	0.15	0.20	0.40	113.	10.0	295.1	10.0
06	3	1	60	3	-10.3	0.144	-9.000	-9.000	0.	191.	22.7	0.800	0.47	0.20	1.00	135.	10.0	295.2	10.0
06	3	1	60	4	-18.6	0.259	-9.000	-9.000	0.	344.	73.6	0.800	1.38	0.20	1.80	180.	10.0	295.8	10.0
06	3	1	60	5	-18.6	0.259	-9.000	-9.000	0.	344.	73.6	0.800	1.42	0.20	1.80	203.	10.0	296.0	10.0
06	3	1	60	6	-14.4	0.201	-9.000	-9.000	0.	268.	44.5	0.800	0.85	0.20	1.40	135.	10.0	295.1	10.0
06	3	1	60	7	32.5	0.115	-9.000	-9.000	0.	153.	24.6	0.800	0.84	0.20	0.60	90.	10.0	295.2	10.0
06	3	1	60	8	103.4	0.134	-9.000	-9.000	373.	179.	91.2	0.800	0.87	0.20	0.70	113.	10.0	296.4	10.0
06	3	1	60	9	164.8	0.383	-9.000	-9.000	644.	510.	418.1	0.800	0.87	0.20	2.00	180.	10.0	298.0	10.0
06	3	1	60	10	212.4	0.307	-9.000	-9.000	897.	408.	435.9	0.800	0.86	0.20	1.60	158.	10.0	300.0	10.0
06	3	1	60	11	243.2	0.383	-9.000	-9.000	1133.	510.	632.0	0.800	0.86	0.20	2.00	113.	10.0	300.6	10.0
06	3	1	60	12	254.8	0.287	-9.000	-9.000	1344.	382.	498.8	0.800	0.86	0.20	1.50	68.	10.0	302.0	10.0
06	3	1	60	13	246.6	0.345	-9.000	-9.000	1529.	459.	584.7	0.800	0.85	0.20	1.80	180.	10.0	303.3	10.0
06	3	1	60	14	219.2	0.287	-9.000	-9.000	1685.	382.	436.3	0.800	0.84	0.20	1.50	68.	10.0	304.7	10.0
06	3	1	60	15	174.3	0.383	-9.000	-9.000	1807.	510.	467.3	0.800	0.82	0.20	2.00	45.	10.0	304.7	10.0
06	3	1	60	16	115.0	0.690	-9.000	-9.000	1890.	917.	555.2	0.800	0.80	0.20	3.60	315.	10.0	304.4	10.0
06	3	1	60	17	45.5	0.594	-9.000	-9.000	1933.	790.	188.7	0.800	0.70	0.20	3.10	293.	10.0	304.2	10.0
06	3	1	60	18	-27.8	0.388	-9.000	-9.000	0.	516.	165.6	0.800	8.44	0.20	2.70	315.	10.0	302.9	10.0
06	3	1	60	19	-18.6	0.259	-9.000	-9.000	0.	344.	73.6	0.800	2.48	0.20	1.80	0.	10.0	301.2	10.0
06	3	1	60	20	-29.9	0.417	-9.000	-9.000	0.	554.	191.0	0.800	-12.61	0.20	2.90	23.	10.0	299.5	10.0
06	3	1	60	21	-22.7	0.316	-9.000	-9.000	0.	420.	109.9	0.800	3.63	0.20	2.20	90.	10.0	298.5	10.0
06	3	1	60	22	-24.7	0.345	-9.000	-9.000	0.	459.	130.8	0.800	4.99	0.20	2.40	135.	10.0	297.0	10.0
06	3	1	60	23	-22.7	0.316	-9.000	-9.000	0.	420.	109.9	0.800	2.79	0.20	2.20	158.	10.0	296.3	10.0
06	3	1	60	24	-10.3	0.144	-9.000	-9.000	0.	191.	22.7	0.800	0.49	0.20	1.00	113.	10.0	295.3	10.0

## ARCHIVO . PFL

06	3	1	1	10.0	1	68.	1.30	22.2	99.0	99.00
06	3	1	2	10.0	1	113.	0.40	22.1	99.0	99.00
06	3	1	3	10.0	1	135.	1.00	22.2	99.0	99.00
06	3	1	4	10.0	1	180.	1.80	22.8	99.0	99.00
06	3	1	5	10.0	1	203.	1.80	23.0	99.0	99.00
06	3	1	6	10.0	1	135.	1.40	22.1	99.0	99.00
06	3	1	7	10.0	1	90.	0.60	22.2	99.0	99.00
06	3	1	8	10.0	1	113.	0.70	23.4	99.0	99.00
06	3	1	9	10.0	1	180.	2.00	25.0	99.0	99.00
06	3	1	10	10.0	1	158.	1.60	27.0	99.0	99.00
06	3	1	11	10.0	1	113.	2.00	27.6	99.0	99.00
06	3	1	12	10.0	1	68.	1.50	29.0	99.0	99.00
06	3	1	13	10.0	1	180.	1.80	30.3	99.0	99.00
06	3	1	14	10.0	1	68.	1.50	31.7	99.0	99.00
06	3	1	15	10.0	1	45.	2.00	31.7	99.0	99.00
06	3	1	16	10.0	1	315.	3.60	31.4	99.0	99.00
06	3	1	17	10.0	1	293.	3.10	31.2	99.0	99.00
06	3	1	18	10.0	1	315.	2.70	29.9	99.0	99.00
06	3	1	19	10.0	1	0.	1.80	28.2	99.0	99.00
06	3	1	20	10.0	1	23.	2.90	26.5	99.0	99.00
06	3	1	21	10.0	1	90.	2.20	25.5	99.0	99.00
06	3	1	22	10.0	1	135.	2.40	24.0	99.0	99.00
06	3	1	23	10.0	1	158.	2.20	23.3	99.0	99.00
06	3	1	24	10.0	1	113.	1.00	22.3	99.0	99.00

## ANEXO 7. BREVE DESCRIPCIÓN DEL MANEJO DEL MODELO AERMOD BREEZE

### FLUJO DE DATOS DE ENTRADA PARA AERMOD BREEZE

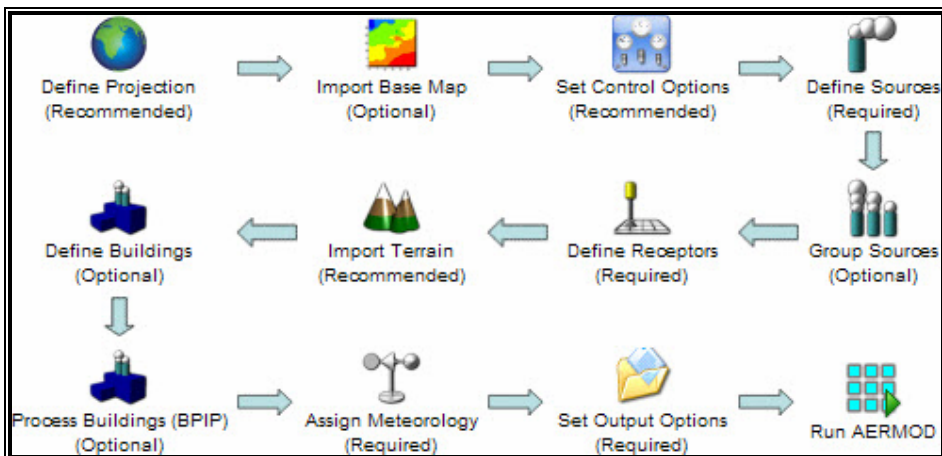


Figura 23. Flujo de datos de entrada para el modelo AERMOD BREEZE

### 1. DEFINIENDO LA PROYECCIÓN (Recomendado)

AERMOD BREEZE es el único modelo que tiene integrado un SIG. Una ventaja principal de establecer una proyección es que se está seguro de la ubicación de los objetos, la importación automatizada del mapa base, la exportación a ESRI o a formatos de archivo de Google, además la alineación del terreno va a ser correcta. Definir una proyección ayuda a evitar costosos errores, a aumentar la productividad del usuario, simplifica la importación de mapas base y archivos del terreno.

El modelo se presenta de la siguiente manera: sobre el menú principal, seleccionar la pestaña identificada "Project", donde se muestra la barra de herramientas en la cual se debe seleccionar el icono "Projection", que desplegará un cuadro con las opciones mencionadas.

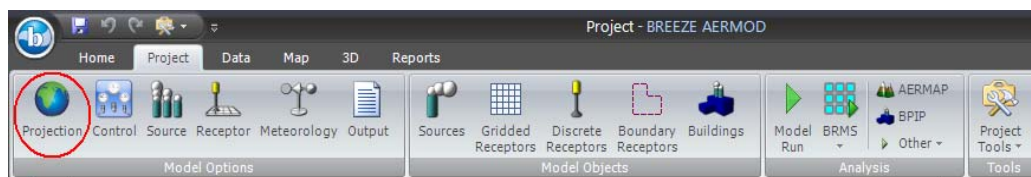


Figura 24. Barra de herramientas opción Project

Una ayuda para definir la proyección es que BREEZE muestra un mapa del mundo dividido en zonas UTM para identificar la zona primaria, seleccionando la zona es posible definir la proyección, el datum y la zona UTM.

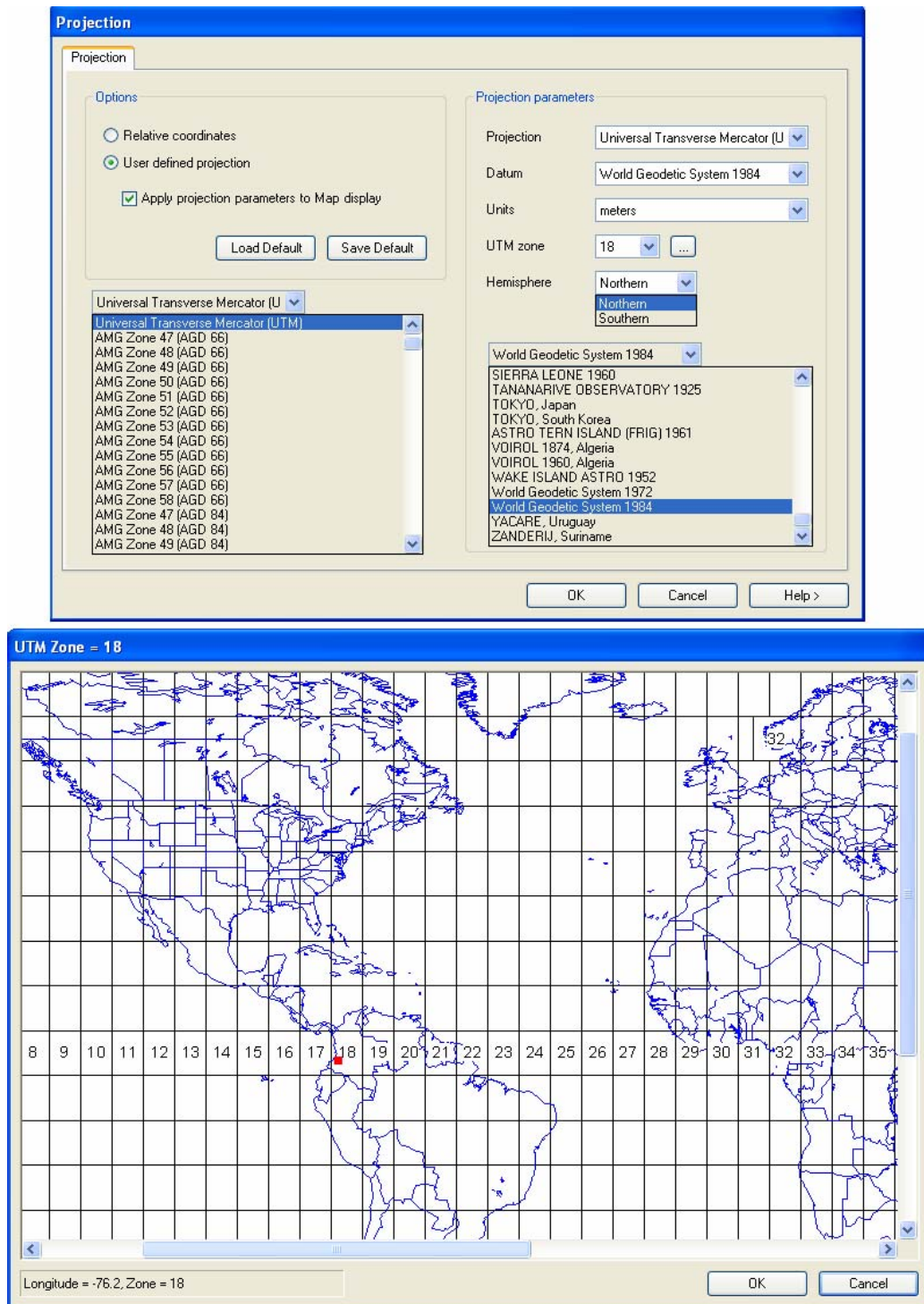


Figura 25. Ventana opción Projection

El usuario puede activar la opción “*Relative Coordinates*”, cuando no desea especificar la proyección de los objetos en el modelo o si no encuentra la proyección dentro de la lista suministrada.

Una vez definida la proyección se procede a importar el mapa base.

## 2. IMPORTANDO EL MAPA BASE (Opcional)

La importación del mapa base ayuda en la ubicación de los objetos a trabajar en el modelo (por ejemplo, fuentes, edificios, y los receptores), cuando la información de las coordenadas específicas se encuentra disponible. Además ayuda al modelador para comprender mejor las relaciones espaciales entre objetos del modelo y las características de los alrededores.

Entre las ayudas que presta AERMOD BREEZE se encuentra que proporciona una serie de herramientas y asistentes para importar mapas base (mapas de bits, imágenes raster, archivos de autocad, entre otros), incluyendo la capacidad de descargar automáticamente fotos aéreas a través de Internet, la creación de mapas de altura y de relieve.

En el menú principal del modelo seleccionar la pestaña “Map”, que mostrará la siguiente ventana:

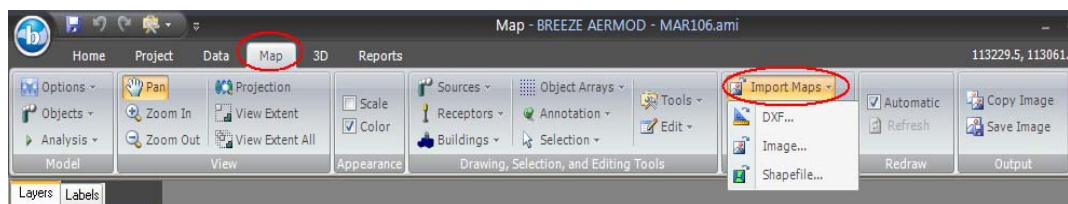


Figura 26. Barra de herramientas opción Map

En Import Maps se selecciona el tipo de mapa que se quiere importar, en el presente proyecto se escogió un archivo importado desde AutoCAD (DXF).

El siguiente paso es seleccionar la ubicación del mapa.

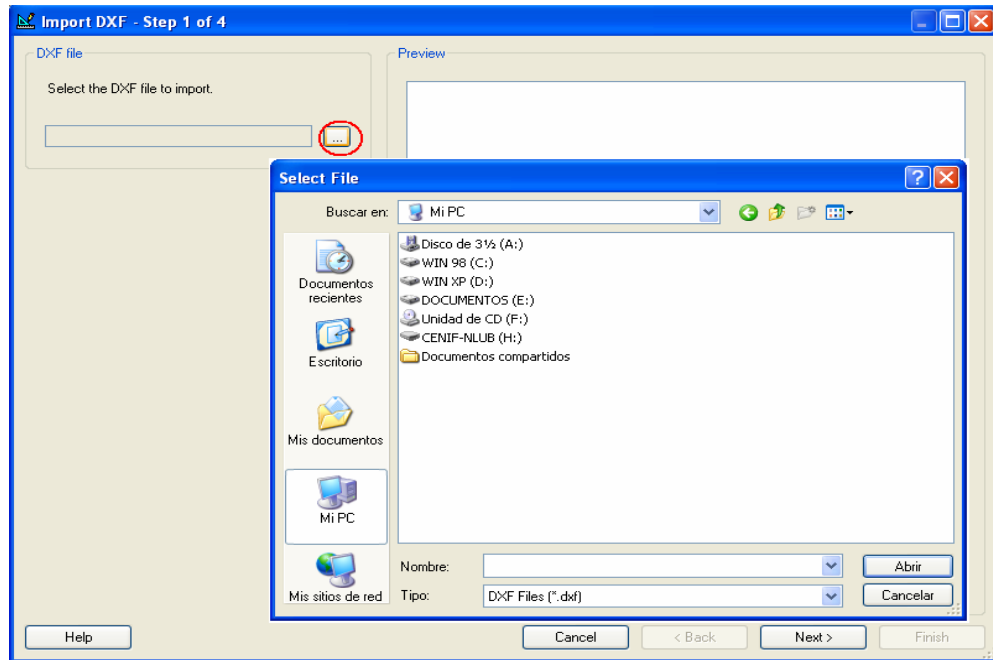


Figura 27. Selección ubicación del mapa a importar

Con el mapa seleccionado se procede a colocar los puntos de referencia, como las coordenadas X y Y, y como quiere el usuario que sea su Este y su Norte (puntos de referencia).

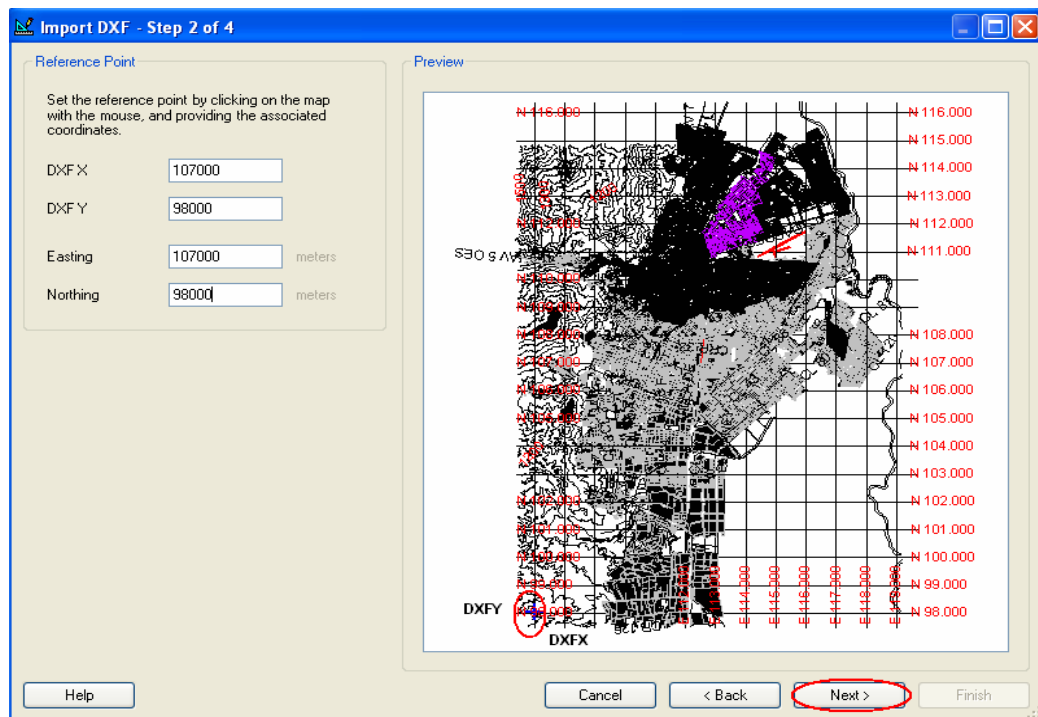


Figura 28. Ubicación puntos de referencia del mapa

En el siguiente paso, el usuario tiene la opción de rotar el mapa, si este no tiene la orientación deseada, además de especificar las unidades origen del mapa.

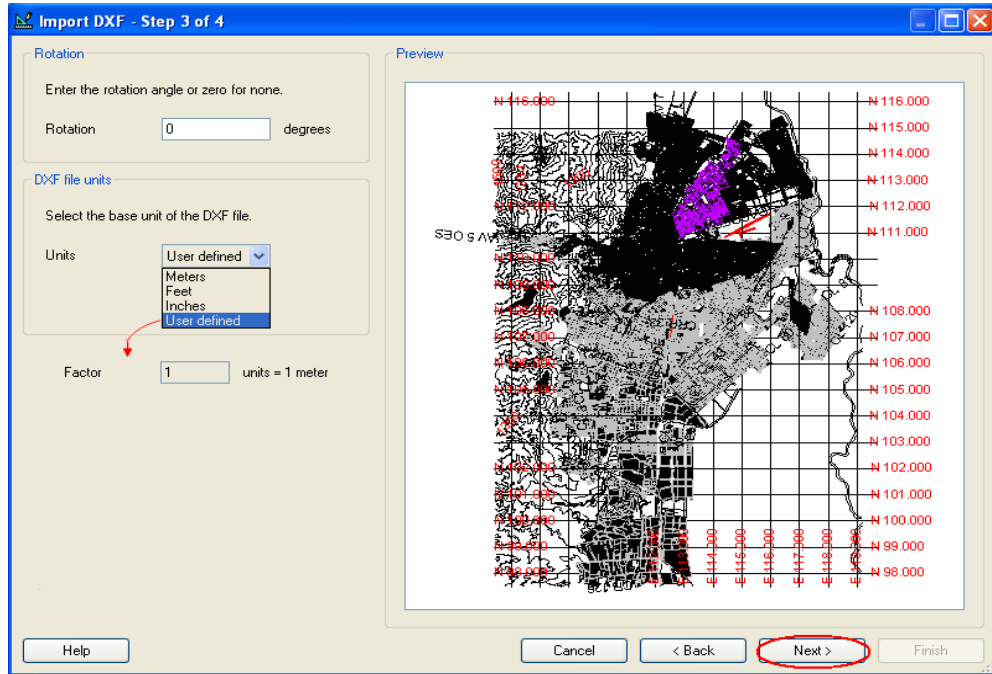


Figura 29. Unidades del mapa y rotación

En este paso se tiene la opción de verificar y/o modificar los datos suministrados en Projection, como la proyección, el datum, las unidades, el UTM zone y el hemisferio.

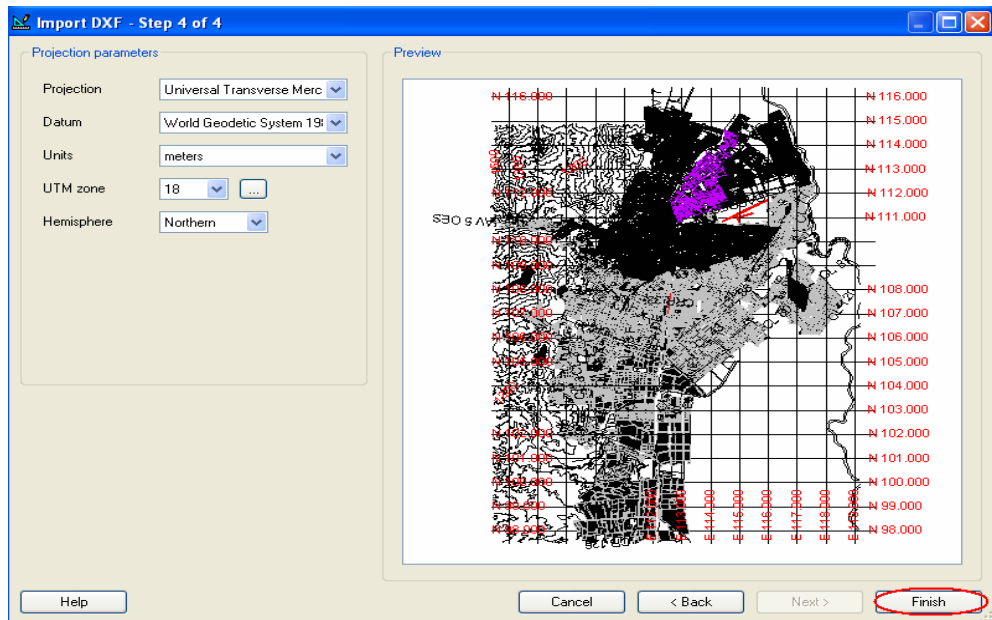


Figura 30. Proyección del mapa



Como resultado se tiene el mapa listo para que le sean ubicadas las fuentes, que en este caso fueron puntuales.

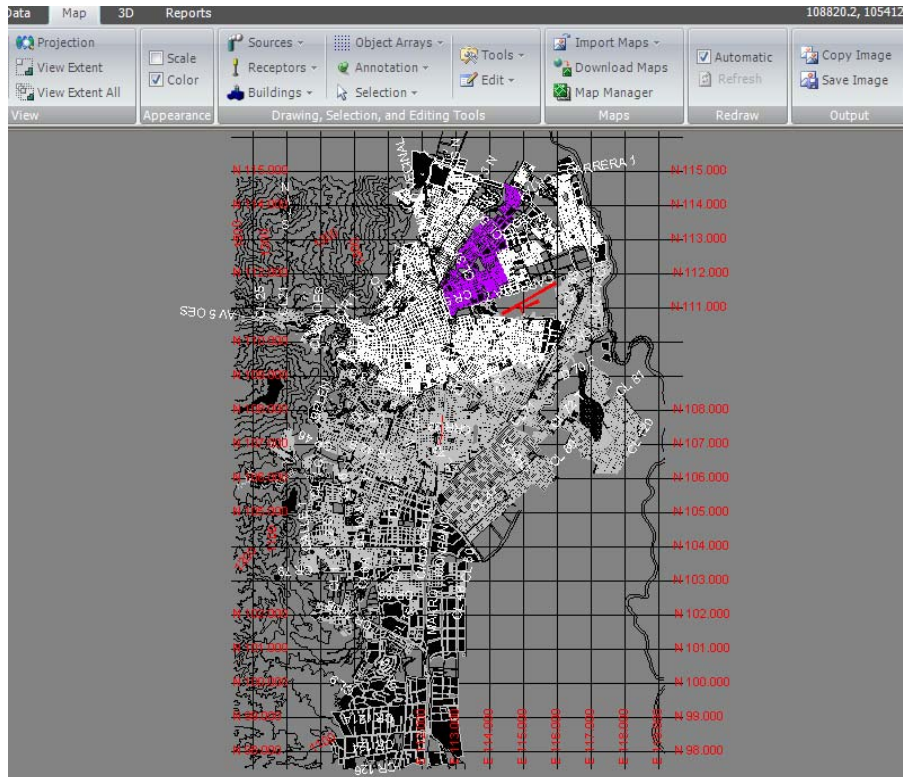


Figura 31. Mapa importado

Para realizar modificaciones al mapa en la barra de herramientas aparece una opción “Map Manager”, que permite realizar dichas modificaciones, como adicionar un nuevo mapa, modificar sus coordenadas de referencia y su proyección.

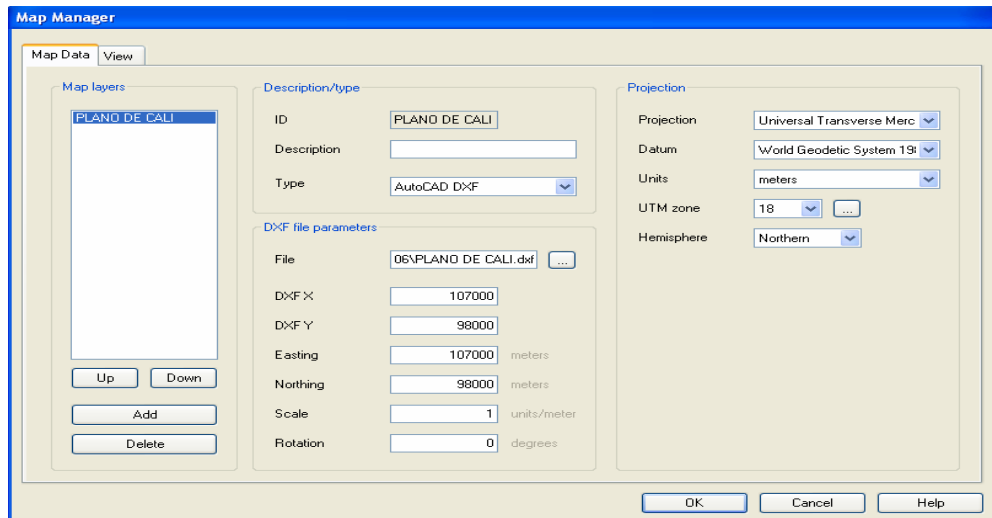


Figura 32. Propiedades del mapa

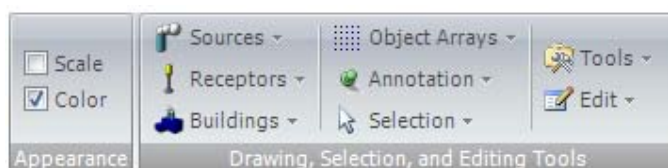


## Exploración de la barra de herramientas pestaña MAP



**Figura 33.** Barra de herramientas Map

- \* Pan: Permite mover todo el mapa en cualquier dirección
- \* Zoom In: Realiza un zoom de acercamiento sobre una determinada zona o sobre el mapa en general
- \* Zoom out: Realiza un zoom de alejamiento sobre una determinada zona o sobre el mapa en general
- \* Projection: Permite modificar el datum, la proyección, UTM zone, etc.
- \* View Extent: Muestra todos los objetos modelados dentro de la ventana del mapa
- \* View Extent All: Muestra el mapa completo



**Figura 34.** Barra de herramientas Map (continuacion)

- \* Scale: Muestra la escala del mapa
- \* Color: Si no se selecciona se muestra el mapa en blanco y negro.
- \* Sources: Se encuentran opciones para ubicar en el mapa fuentes puntuales, de área (rectangular y circular), de línea, de volumen o en cielo abierto.
- \* Receptor: Se define la grilla de receptores, cartesiana y polar, además de los receptores discretos
- \* Buildings: Permite dibujar edificios de forma rectangular, circular y en polígono
- \* Object Arrays: Realiza arreglos para múltiples objetos
- \* Anotation: Crea anotaciones dentro del mapa, ya sea punto, línea o poli línea.
- \* Selection: Muestra varias formas de selección de objetos, ya sea única o puntual, en rectángulo, un radio, por regiones o todo.  
Se tienen herramientas como information que arroja la información de un punto en específico (ID, coordenadas xy, elevación), ruler que mide distancias entre dos puntos y move que mueve el objeto seleccionado de un punto a otro.
- \* Tools:
- \* Edit: Las herramientas usuales, copiar, pegar y borrar



**Figura 35.** Barra de herramientas Map (continuación)

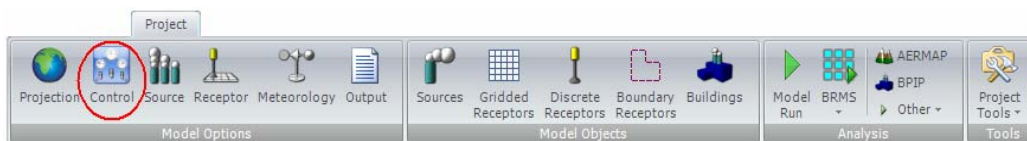
- \* Import Maps Es donde se importa el mapa base
- \* Download Maps Permite descargar de la web un mapa determinado
- \* Map Manager Muestra las propiedades del mapa
- \* Automatic / Refresh Si esta activado, las modificaciones que se vayan realizando en el mapa se visualizan automáticamente, de lo contrario habría necesidad de actualizar cada vez que se haga una modificación.
- \* Copy Image Permite copiar la imagen a cualquier destino
- \* Save Image Guarda la imagen en una ubicación especificada por el usuario.

### 3. CONFIGURACIÓN DE LAS OPCIONES DE CONTROL (Recomendado)

Muchas de las opciones que controlan el procesamiento de los datos de AERMOD, se encuentran en la opción “Control” en la pestaña “Project” del menú principal.

BREEZE proporciona agrupaciones lógicas de éstas opciones, y tiene plantillas exclusivas que automáticamente eliminan las opciones que se muestran al inicio y que no son seleccionadas, para no confundir al usuario. Hay una plantilla para mostrar todas las opciones de AERMOD. Estas plantillas permiten que no haya sobrecarga de datos y así agilizar la entrada al modelo.

Además tiene la opción de ejecutar la versión estándar de AERMOD de la EPA, otras versiones, o una versión mejorada que ofrece BREEZE, permitiendo una mayor funcionalidad y con características no disponibles en otros modelos, incluyendo una versión multi – escenarios que permite modelar emisiones de múltiples escenarios en una cantidad de tiempo que tomaría modelar un único contaminante. También se puede definir múltiples contaminantes y almacenar escenarios de emisiones en un solo archivo.



**Figura 36.** Barra de herramientas Project, opción Control

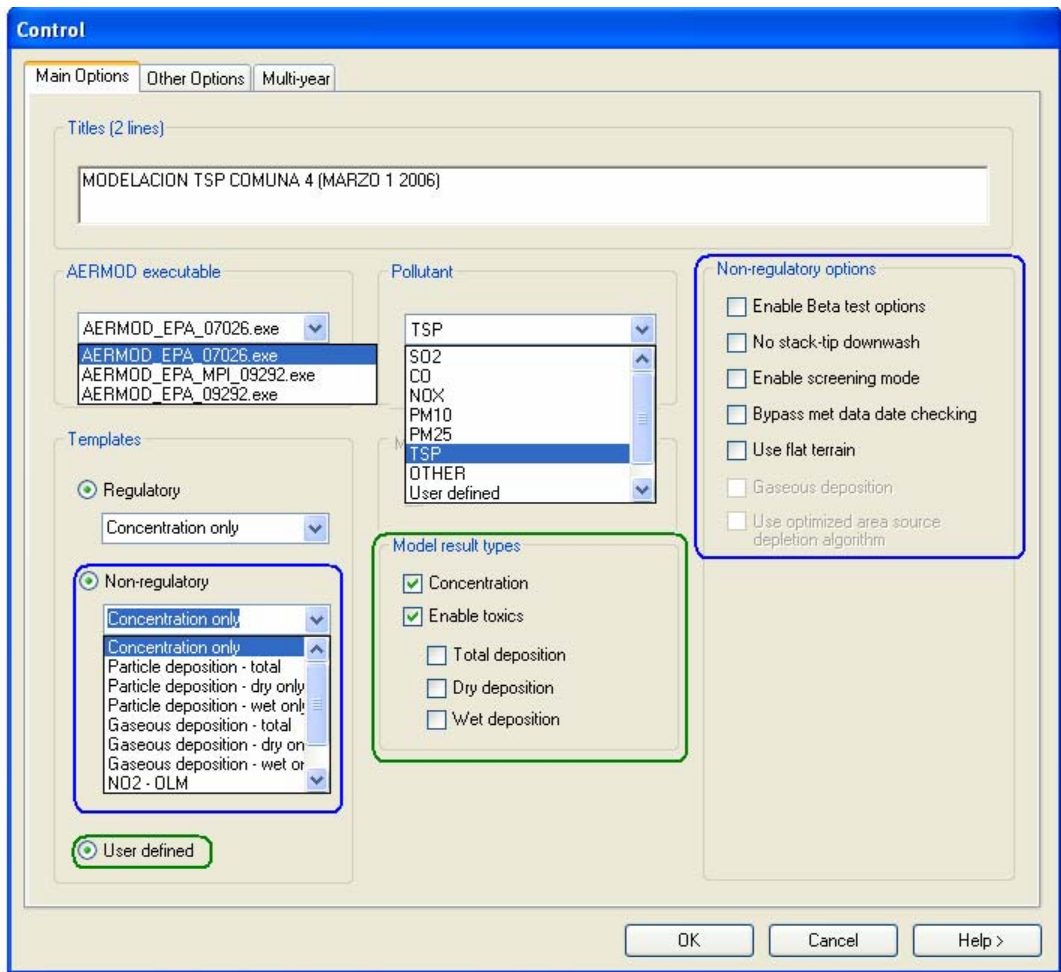


Figura 37. Ventana opción Control

En las opciones principales aparece una opción Titles donde se puede escribir el título de la simulación, además se puede determinar la versión de AERMOD que se quiere ejecutar, el tipo de contaminante a modelar, las plantillas que se quieran escoger de acuerdo a la necesidad, por ejemplo, al activar la plantilla user defined se habilitarán opciones como concentración, deposición total, seca o húmeda. Las otras pestañas no se describen ya que no se hizo uso de ellas.

Para el proyecto se utilizó la versión AERMOD EPA 07026.exe, y la plantilla regulatory para medir concentración solamente y como contaminante PST (Material Particulado).

#### 4. DEFINIENDO LAS FUENTES (Requerido)

AERMOD BREEZE permite modelar fuentes estándar de la EPA (por ejemplo, puntuales, de área, en cielo abierto), y las exclusivas de BREEZE, tal como fuentes de línea. La hoja electrónica o tabla de datos se puede ingresar con los comandos de cortar, copiar y pegar. AERMOD BREEZE posee entrada de datos CAD, que utiliza el modo de visualización del mapa para dibujar las fuentes exactamente donde deben estar. Importa cualquier archivo compilado del AERMOD de la US EPA. Y presenta múltiples niveles de emisión para cada fuente con tasas variables.



Figura 38. Barra de herramientas Project, opción Sources

Al entrar a definir las fuentes a modelar, aparece el siguiente cuadro donde se suministra toda la información de cada fuente.

Source Parameters	
ID	01
Description	MODATEX
X coordinate	113619 meters
Y coordinate	112119 meters
Elevation	0 meters

Parameters	
Source type	Point
Emission rate	1.77 g/s
Stack height	16 meters
Diameter	0.5 meters
Temperature	470 K
Exit velocity	4.43 m/s
Flow rate	

Figura 39. Ventana, opción Sources

* ID:	Es el numero característico que el usuario le quiera asignar
* Description:	Breve descripción de la fuente
X,Y coordiante:	Coordenadas de la fuente <sup>(*)</sup>
Elevation:	Elevación de la fuente [m,km, cm, millas, yardas, pies, pulgadas]
Source type:	Permite seleccionar el tipo de fuente, puntual, de area, línea, volumen, a cielo abierto <sup>(**)</sup>
Emisión rate:	Valor de la emisión del contaminante [g/s, ton/año, lb/hr, lb/s]
Stack height:	Altura de la chimenea [m,km, cm, millas, yardas, pies, pulgadas]
Diameter:	Diámetro interno de la chimenea [m,km, cm, millas, yardas, pies, pulgadas]
Temperature:	Temperatura de la chimenea [K,C,F]
Exit velocity:	Velocidad del emisión del contaminante [m/s,km/h,mph, ft/s]
Flor rate:	Se refiere al caudal del contaminante, Si no se tiene la velocidad de salida este se puede activar,

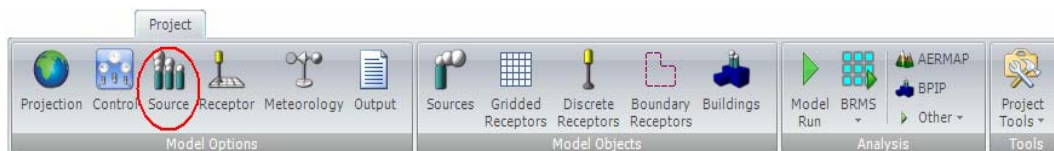
<sup>(\*)</sup> En el caso de no conocerlas en la pestaña Map, opción sources, eligiendo punto, línea, etc, se pueden ubicar directamente en el mapa, al ubicarlas se despliega la misma ventana proporcionando la información de las coordenadas.

<sup>(\*\*)</sup> Dependiendo del tipo de fuente se generaran datos diferentes que no se tratarán, ya que en el proyecto solo se trabajaron con fuentes puntuales.

De manera opcional se pueden combinar las fuentes en grupos para generar un informe de resultados sobre el efecto al combinar un grupo de fuentes para cada receptor.

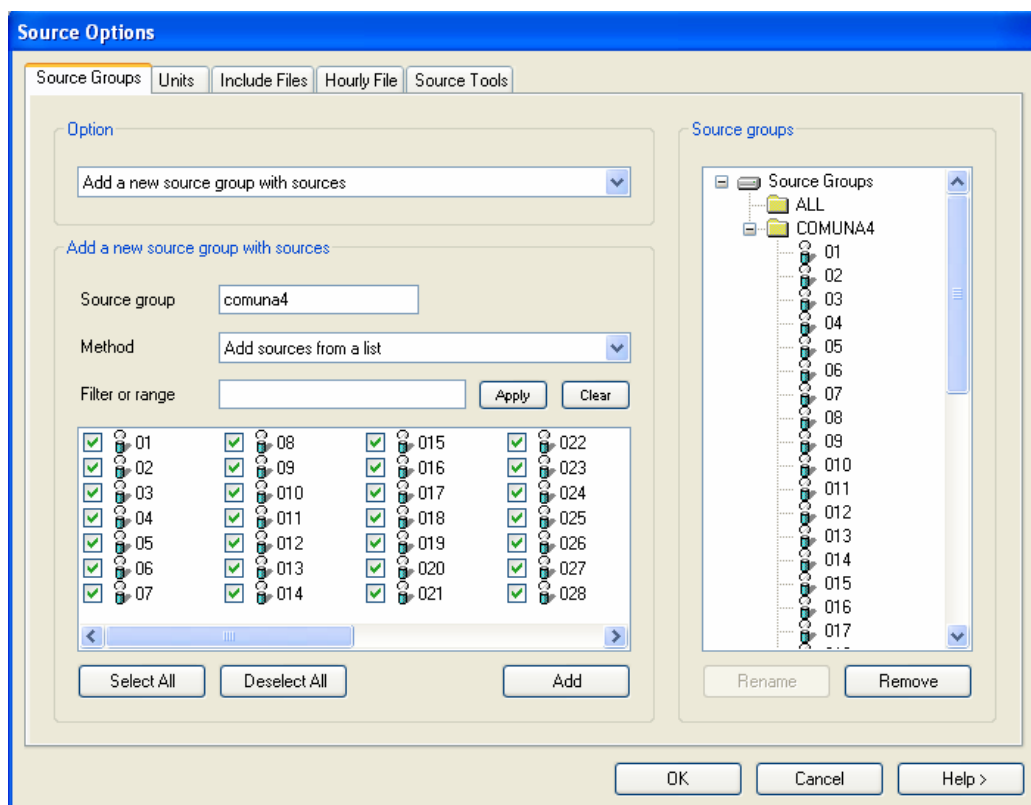
Las opciones de fuente de AERMOD BREEZE dan la oportunidad de asignar diferentes entradas y unidades de salida, identificando la fuente externa y los archivos de emisión, adicionando o eliminando factores de emisión para múltiples fuentes al mismo tiempo.

Entre los beneficios que se tienen con AERMOD BREEZE, están, numero ilimitado de grupos de fuentes, filtro de fuentes por nombre para simplificar la agrupación de fuentes deseadas, se pueden asignar fácilmente factores de emisión para múltiples fuentes, e identifica los archivos de emisiones por hora que deben aplicarse.



**Figura 40.** Barra de herramientas Project, opción Source

El cuadro que se presenta al seleccionar un grupo de fuentes es el siguiente:



**Figura 41.** Ventana, opción Source

En Source group, se define el nombre que tendrá dicho grupo de fuentes, se pueden seleccionar las que el usuario desee.

El mapa quedara de la siguiente forma, en este caso con las 40 chimeneas a modelar:

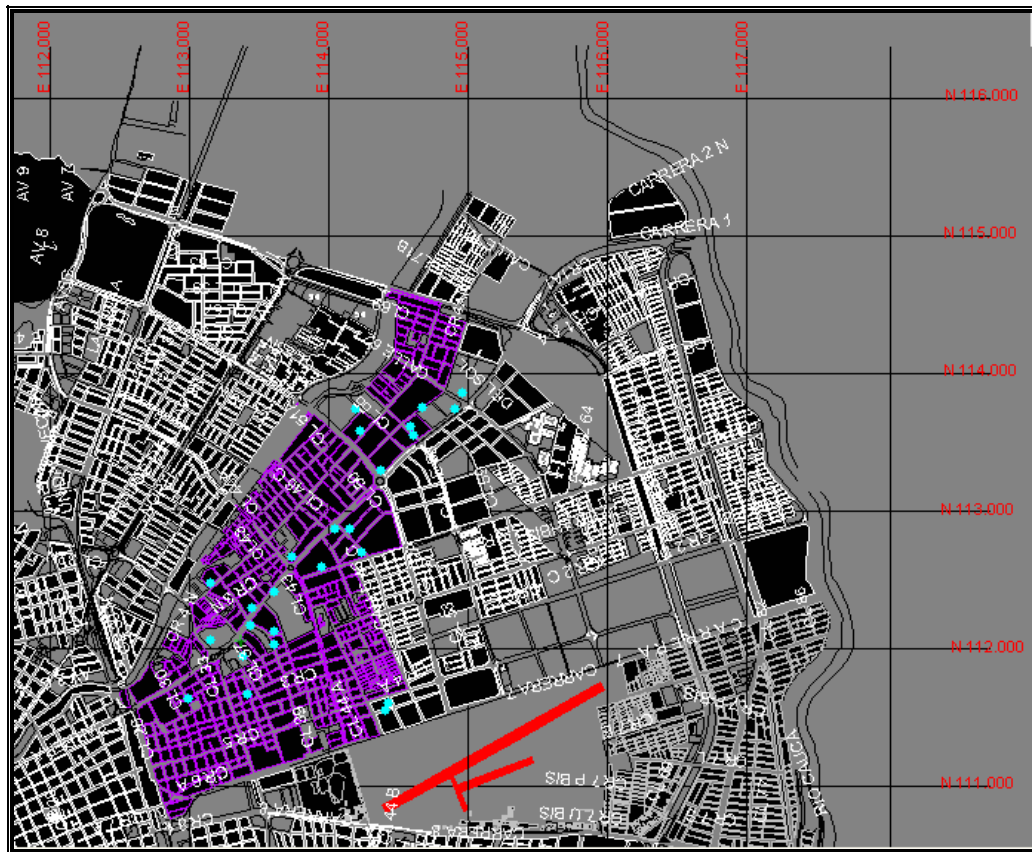


Figura 42. Ubicación de las fuentes en el mapa

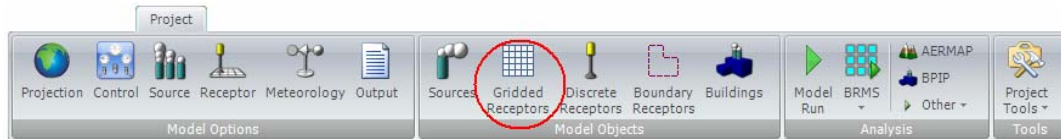
## 5. DEFINIENDO LOS RECEPTORES (Requerido)

Los receptores son lugares donde AERMOD BREEZE calculará un valor de concentración o deposición. Por lo menos un receptor debe ser definido.

Existen diferentes tipos de receptores, como discretos, grillas y arreglos en polígono, también tiene la capacidad exclusiva de generar variable de densidad y redes de grillas en 3D.

Se tienen diferentes beneficios como: pueden ser modelados prácticamente un número ilimitado de receptores, las elevaciones del terreno pueden ser asignadas automáticamente por medio del asistente para la importación del terreno, utiliza una función exclusiva para estimar las concentraciones entre receptores.

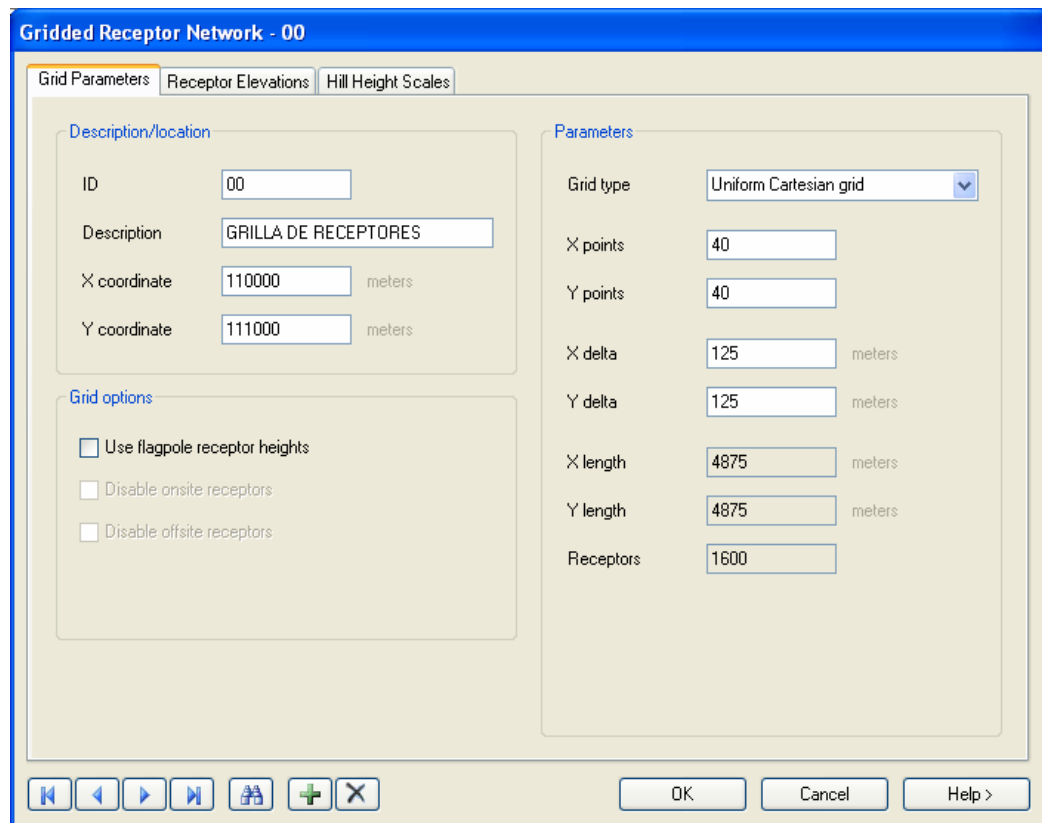




**Figura 43.** Barra de herramientas Project, opción Gridded Receptors

Se presentan las opciones para caracterizar la grilla escogida, en el caso del proyecto, para la comparación se trabajo con una grilla cartesiana de 40x40 receptores para el eje X y Y, y una distancia entre ellos de 125m.

Inicialmente se escogieron las coordenadas (110000,110000) como condenadas origen, pero al correr la simulación y visualizar los resultados hubo que hacer algunas modificaciones, cabe anotar que el desplazar la grilla no afecta la información, lo que si sucede al cambiar los parámetros de XY points o XY delta.



**Figura 44.** Ventana opción Source

En la primera parte se pide la descripción y la localización, como el Id al cual se le puede asignar el valor que el usuario desee, description, se describe la grilla, XY coordinate, son las coordenadas origen de la grilla siendo positivo al este y al norte.



Entre las opciones se tiene el tipo de grilla, cartesiana uniforme y no uniforme, polar uniforme y no uniforme y grilla cartesiana 3D.

En XY points, se coloca el numero de receptores, para el eje X: Este-Oeste y para el eje Y: Norte-Sur

El XY delta, es el espacio en metros entre cada receptor, para el eje X y para el eje Y.

XY legend, sale por defecto al introducir los datos anteriores y muestra la distancia total para el eje X y el eje Y.

Receptors, es el número total de receptores escogidos.

En la siguiente pestaña se presenta la opción de adicionar alturas para el receptor deseado:

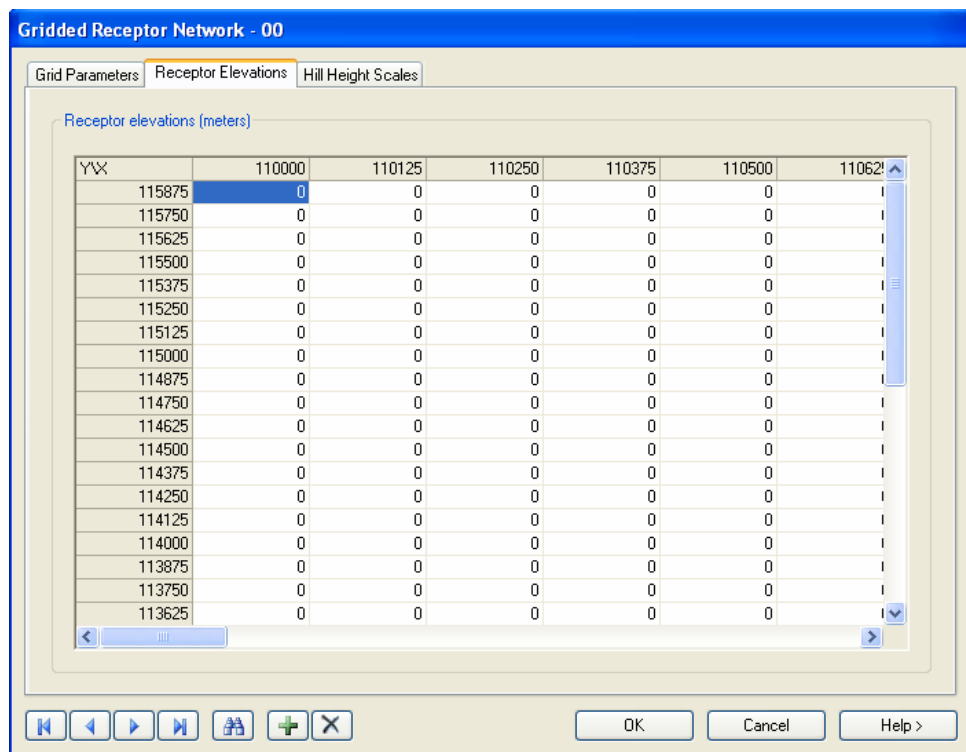


Figura 45. Ventana opción gridded Receptor pestaña 2

Luego de ingresar la grilla se obtiene el siguiente resultado en el mapa:

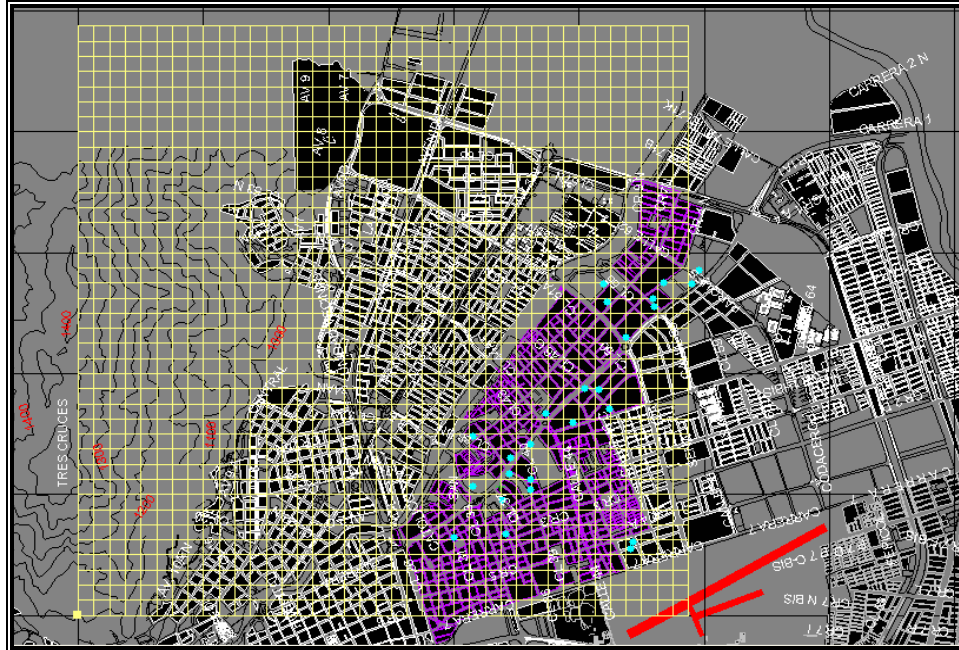


Figura 46. Ubicación de la grilla de receptores en el mapa

## 6. IMPORTACIÓN DEL TERRENO (Recomendado)

AERMOD BREEZE requiere de alturas de escala para montañas o colinas, además de elevaciones del terreno para cada receptor, estas alturas y elevaciones son ejecutadas por el preprocesador de terreno AERMAP. El procesamiento de los datos del terreno puede ser un ejercicio difícil, pero con el asistente de terrenos incluido en AERMOD BREEZE se puede realizar más fácilmente, además se crean automáticamente imágenes del terreno importado.

Se brindan guías para el usuario a través de los procesos de identificación del terreno, asignación de la zona UTM (esto se origina automáticamente si la opción Projection esta establecida), al elegir si se quiere o no sombras en los mapas de relieve para vistas en 2D y 3D, al correr el modelo y asignar elevaciones a todos los receptores, edificios y fuentes.

En el proyecto no se realizó, la importación de terreno ya que se considero como plano.

## 7. ADICIÓN EDIFICIOS (Opcional)

AERMOD puede tener en cuenta la obstrucción del flujo del viento debido a las estructuras, como edificios y fuentes puntuales (por ejemplo, chimeneas). Como en cualquier otro modelo los objetos en AERMOD BREEZE, como los edificios pueden ser copiados y pegados o dibujados en la pantalla en 2D.

El modelo cuenta con la posibilidad de crear edificios rectangulares, circulares, y en forma de polígono. Una forma sencilla de construcción y una característica exclusiva de AERMOD BREEZE es eliminar el error a los requerimientos asignados al nivel del piso para todas y cada estructura.

Entre las ventajas se tienen, que el modelo permite importar archivos desde ISC, AERMOD o BPIP, y no hay necesidad de especificar niveles para cada estructura de los edificios.

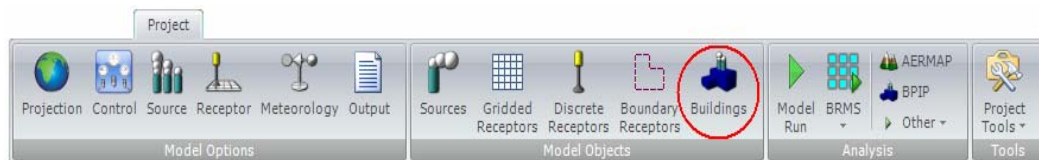


Figura 47. Barra de herramientas Project, opción Buildings

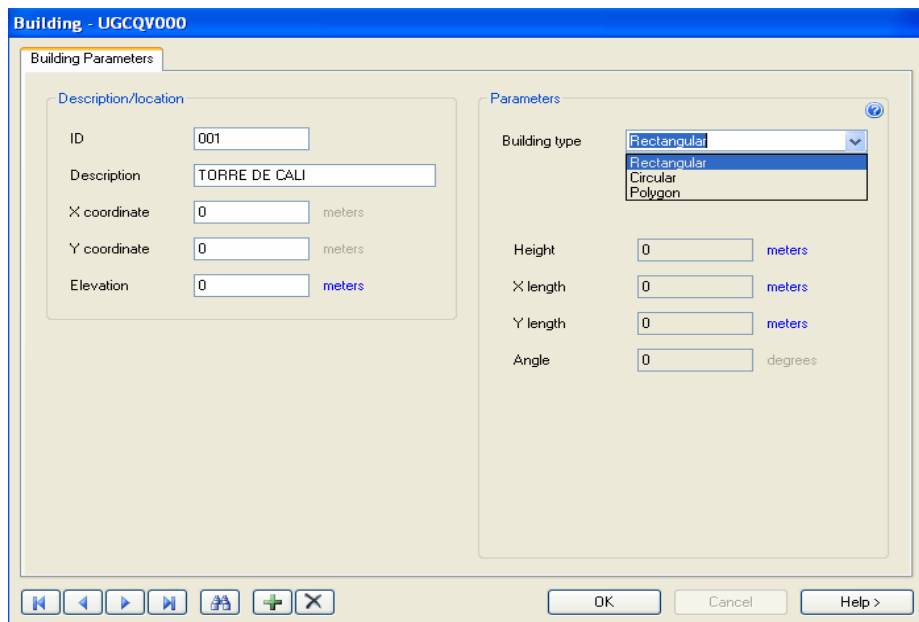


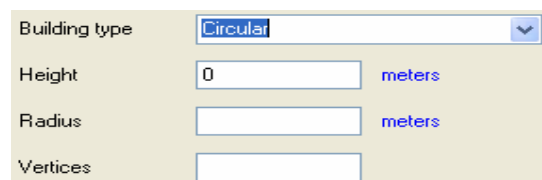
Figura 48. Ventana opción Building

Se deben definir parámetros como ID, descripción del edificio, las coordenadas XY y su elevación. Además el tipo de construcción que se quiere, rectangular, circular o polígono. Dependiendo de la opción elegida se procede a completar los datos:

\* Rectangular:

- Height: Altura del edificio por encima del suelo
- XY length: longitudes en el eje X y Y
- Angle: (opcional), orientación o rotación angular para el edificio, en grados medida desde el norte, positivo en sentido horario.

\* Circular:



Building type: Circular

Height: 0 meters

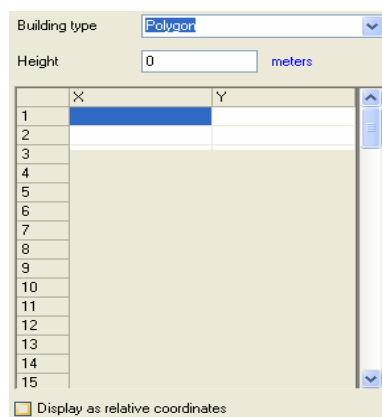
Radius: meters

Vertices:

**Figura 49.** Parámetros de una construcción circular

- Height: Altura del edificio por encima del suelo
- Radius: Radio circular del edificio, este campo se llena automáticamente cuando el edificio circular se dibuja primero sobre el mapa. Al cambiar el número de este campo cambia automáticamente el tamaño del edificio circular.
- Vértices: Numero de vértices que conforman las fuentes circulares.

\* Polygon



Building type: Polygon

Height: 0 meters

	X	Y
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		

Display as relative coordinates

**Figura 50.** Parámetros de una construcción en polígono

- Height: Altura del edificio por encima del suelo
- Introducir las coordenadas para cada vértice del polígono construido.

## 8. PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE DATOS (Opcional)

AERMOD BREEZE cuenta con un programa totalmente integrado BPIP que procesa la información de los edificios y de las fuentes. Los pasos a seguir son:

1. Añadir edificios y fuentes
2. Clic sobre el botón BPIP para ejecutarlo
3. BREEZE creará el archivo BPIP, ejecutara BPIP, importará los resultados BPIP, y los asignara a las fuentes adecuadas.

Artículo I. Para visualizar los efectos downwash de la pluma de las fuentes se requiere de un paquete adicional al modelo (BREEZE Downwash Analyst)

## 9. ASIGNACIÓN DE METEOROLOGÍA (Requerido)

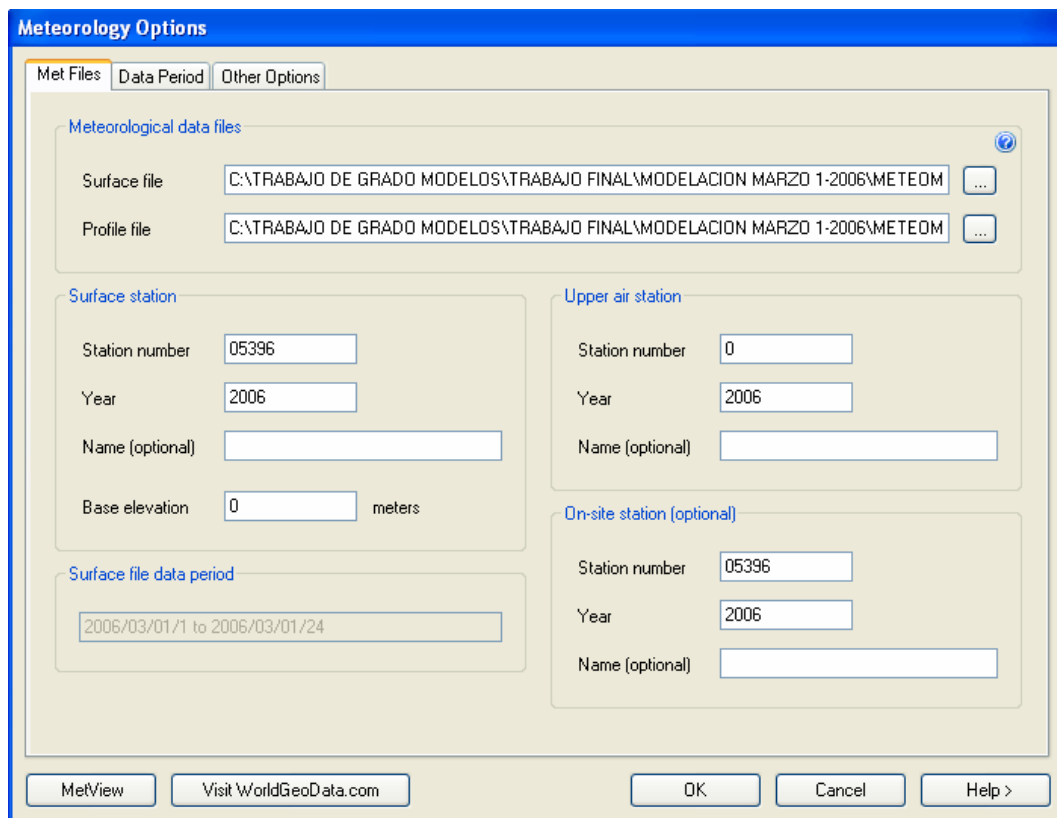
Asignar al modelo datos históricos meteorológicos en BREEZE AERMOD es fácil. Sólo se seleccionan los archivos a utilizar con un escenario en particular. BREEZE identificará las si características del período son validas y mostrara el Id de la estación para que no se presenten errores en la creación del archivo de entrada.

Una serie de herramientas están disponibles en BREEZE para filtrar el período de los datos meteorológicos procesados. Hay incluso un visor que muestra los datos en tablas y en formato de gráfico. Además, se pueden crear rosas de los vientos para períodos definidos por el usuario.



**Figura 51.** Barra de herramientas Project, opción Meteorology

En esta ventana se debe especificar la ubicación de los archivos meteorológicos entregados por el preprocesador AERMET, o los creados mediante la metodología descrita en el presente trabajo.



**Figura 52.** Ventana opción Meteorology

Se requiere de dos tipos de archivo .SFC (archivo de superficie), y el archivo .PFL (archivo de perfil)

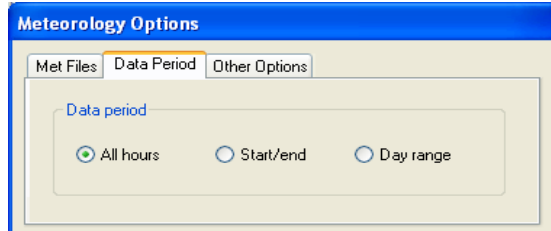
El archivo de superficie se compone de un registro de encabezamiento que contiene información sobre la ubicación de las estaciones meteorológicas, y un registro por cada hora de los datos. Estos datos están delimitados por lo menos un espacio entre cada elemento, es decir, los datos pueden ser leídos como formato libre.

El archivo de datos meteorológicos de perfil consta de uno o más registros por cada hora de los datos. Al igual que el archivo de datos de superficie, los datos están delimitados por lo menos un espacio entre cada elemento y se puede leer como formato libre Fortran.

La descripción del contenido de los archivos se presentó anteriormente en los datos requeridos por el modelo.

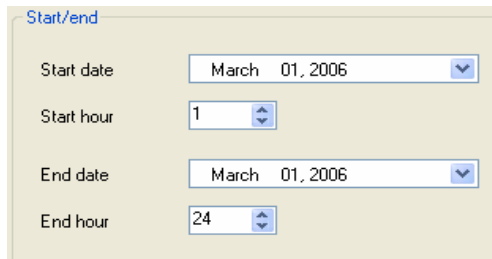
Luego de seleccionar la ubicación de los archivos, el modelo automáticamente llena el campo del número de la estación y el año para el cual se está realizando la simulación, que debe coincidir con el año de los archivos meteorológicos.

En la segunda pestaña se puede determinar el periodo que se quiera modelar.



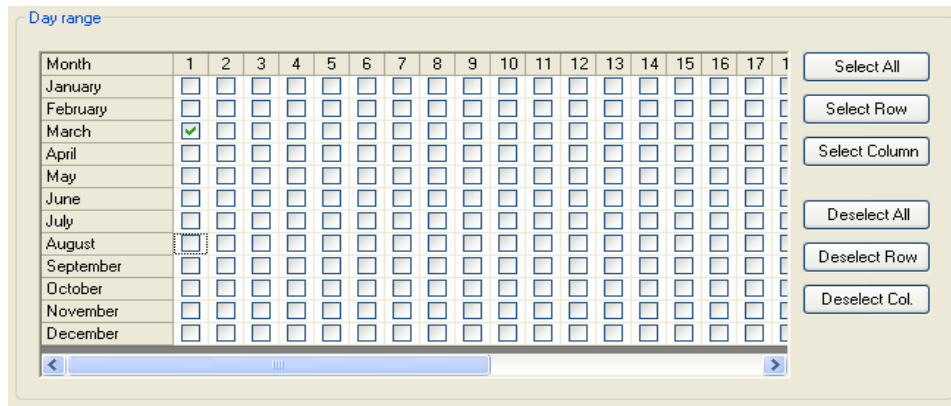
**Figura 53.** Ventana opción Meteorology, pestaña 2

- All hours: procesa todos los datos por hora del archivo de superficie
- Start/end: se especifica un inicio y un fin, de un mes, día, año, hora, si no se desea utilizar todos los datos meteorológicos del archivo de superficie. Todos los registros del archivo de datos que se producen antes y después de la fecha de inicio y de finalización son omitidos. Cuando Start/end es activado se muestra lo siguiente:



**Figura 54.** Ventana opción Meteorology, pestaña 3

- Day range: permite seleccionar días o rangos de días, en la siguiente ventana:



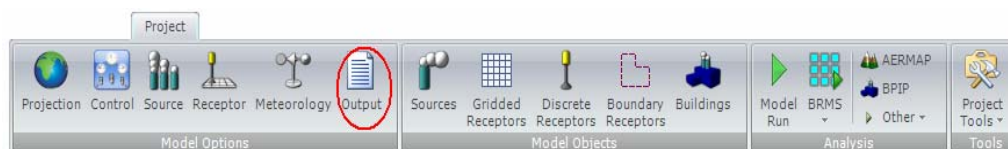
**Figura 55.** Ventana opción Meteorology, pestaña 4

## 10. CONFIGURACIÓN DE LAS OPCIONES DE SALIDA (Requerido)

Una vez que los grupos de fuentes han sido definidos, AERMOD requiere la configuración de algunas opciones de salida para determinar que tipo de salida desea el usuario. Por ejemplo, en qué periodo promedio se quieren los resultados obtenidos, o si se desea un resumen o una lista de detalles de los resultados para cada valor de concentración calculada.

AERMOD BREEZE contiene opciones exclusivas que permiten crear un archivo downwash que puede ser visto y analizado con el programa adicional BREEZE Downwash Analyst. Se pueden crear archivos de salida para generar curvas de nivel, animaciones, gráficos de contribución de las fuentes y gráficos de análisis de la distribución.

Una ventaja del modelo es que todos los archivos de salida están incluidos en un solo archivo, para que no se tenga la necesidad de volver a escribir todos los datos. Los archivos de salida se pueden visualizar en la pantalla de reportes de AERMOD BREEZE.



**Figura 56.** Barra de herramientas Project, opción Output

Las opciones de salida se utilizan para especificar el tipo de salida generada por el modelo de acuerdo a los requerimientos del usuario.

De acuerdo a la opción que se escoja se irán activando las pestañas que permitirán seleccionar las opciones deseadas por el usuario.



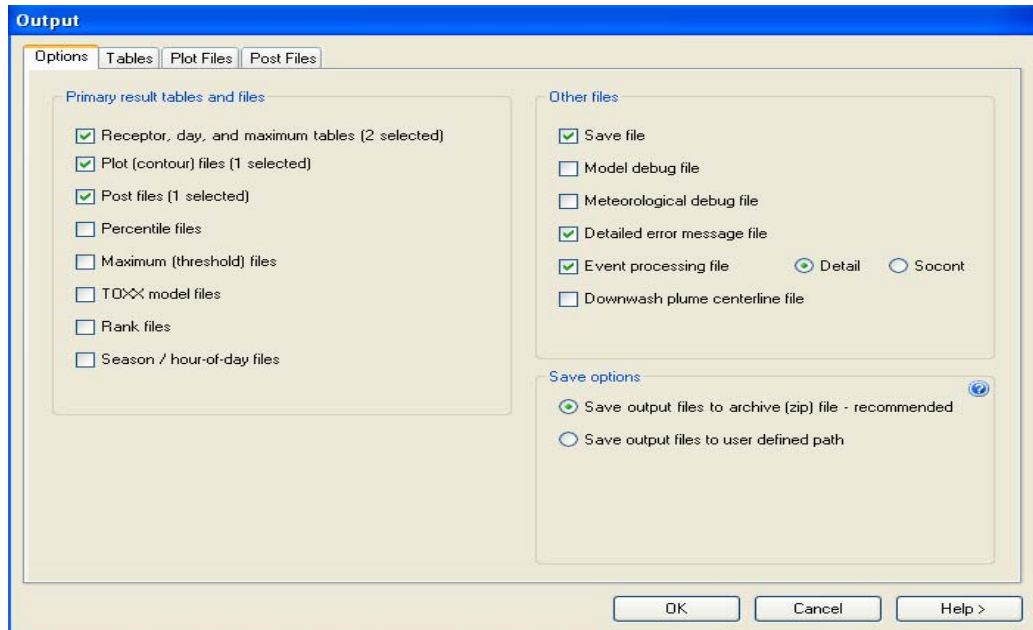


Figura 57. Ventana opción Output

Receptor, day, and maximum tables: especifica el valor más alto por receptor de las opciones de salida de la tabla.

Esta tabla muestra una matriz de casillas de verificación que permiten seleccionar los períodos promedio y los valores más altos que se desean mostrar en las tablas de resumen de los archivos de salida. Una tabla se crea para cada grupo de fuentes modeladas en el archivo de salida.

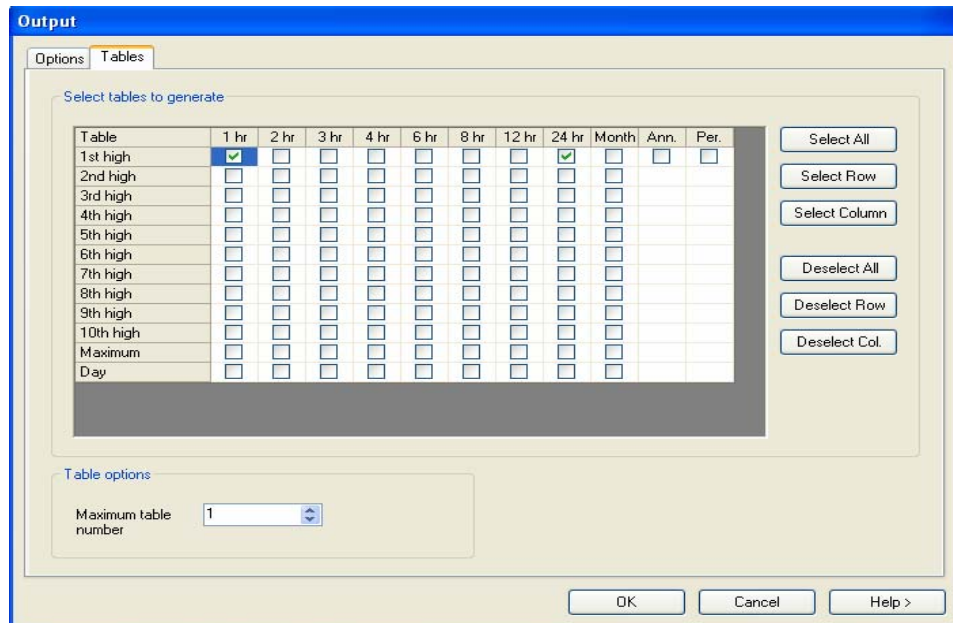


Figura 58. Ventana opción Output, pestaña 2

La siguiente pestaña muestra una matriz de casillas de verificación que permiten seleccionar los períodos promedio, los valores mas altos, y los grupos de fuentes para crear los archivos que contienen el resumen de los resultados y que puede ser fácilmente importados en paquetes gráficos diversos como por ejemplo 3D Analyst.

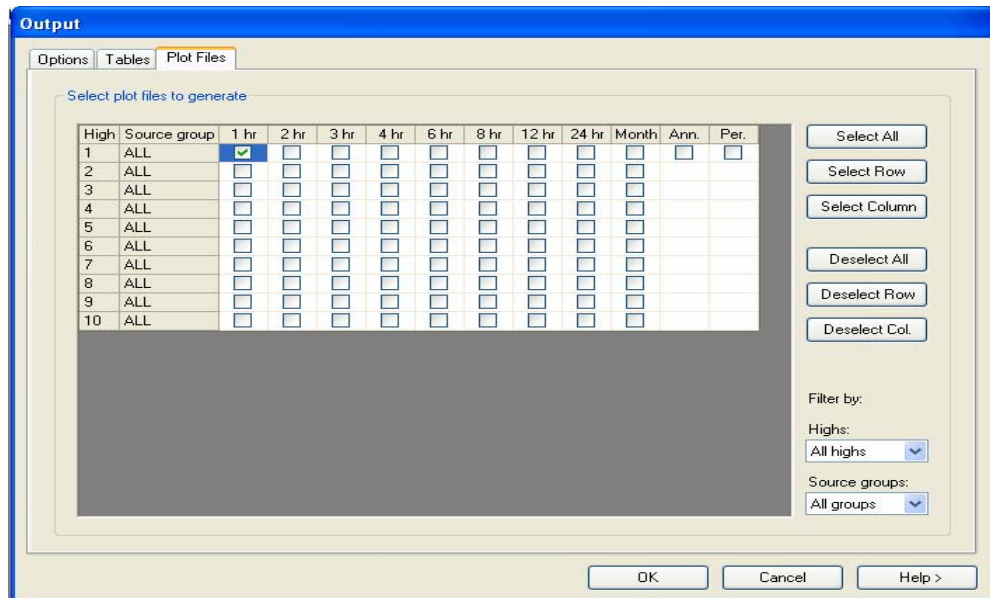


Figura 59. Ventana opción Output, pestaña 3

La siguiente pestaña Post file permite generar un archivo de salida que puede ser utilizado por 3D Analyst para generar las graficas en función del tiempo.

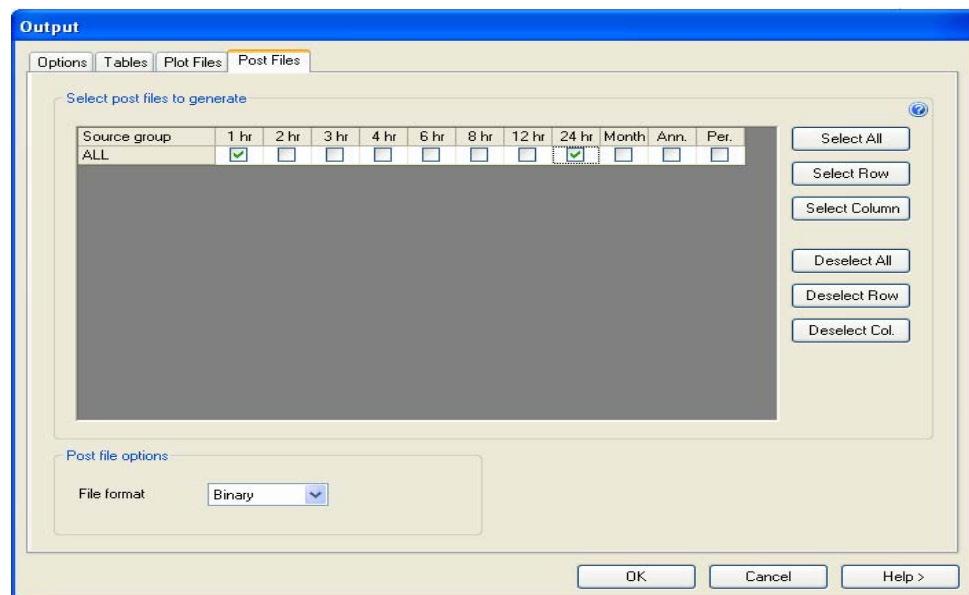


Figura 60. Ventana opción Output

- Source group: esta columna representa el grupo de fuentes para el periodo promedio.
- 1 hr - 24 hr; Month: estas columnas representan el periodo promedio para el respectivo grupo de Fuentes.
- Ann.; esta columna se selecciona para generar un archivo de resultados de un periodo promedio anual. Se deberá contar con un año completo de datos meteorológicos.
- Per.: esta columna se selecciona para generar un archivo de resultados de un periodo promedio, este periodo promedio es un promedio de todos los periodos meteorológicos procesados.

Las otras opciones de archivos que se pueden generar son:

\* Generate save file: al marcar esta opción, se guardan los resultados en un archivo sin formato para que se pueda reiniciar una ejecución del modelo en caso de una interrupción. El archivo de datos se creara con el mismo nombre que el archivo de entrada y una extensión .ams. Para reiniciar la ejecución del modelo por medio del archivo guardado, se debe utilizar la opción Reiniciar en la barra de herramientas Options.

\* Generate model debug file: se genera un archivo de depuración. Este archivo incluye cálculos relacionados con los resultados del modelo para cada fuente y receptor, por ejemplo parámetros de dispersión, altura de la pluma, etc.

Estos archivos se deben utilizar con mucho cuidado porque pueden llegar a ser muy grandes. A menudo se utilizan para la fuente específica y combinaciones de los receptores durante un período meteorológico determinado (por ejemplo, por hora). Si el archivo es demasiado grande, no será posible ver el archivo en la vista de los informes. Tendrá que ser extraído con extensión .amz y verse con un editor de texto como el Bloc de notas.

\* Generate meteorological debug file: genera un archivo de depuración meteorológico, que incluye los perfiles de las variables meteorológicas para cada hora.

\* Generate detailed error message file: al seleccionar esta opción se crea un archivo con una lista de detalles de todos los mensajes generados por el modelo, incluye

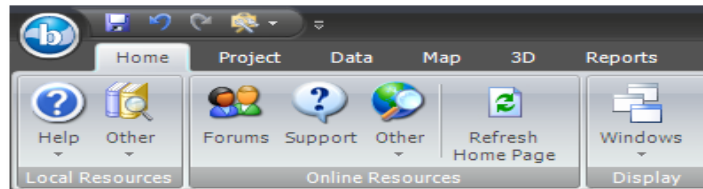
mensajes de error y de advertencias que provienen del archivo principal, además incluye un reporte de las horas de cala del viento.

\* Generate event processing file: genera un archivo de procesamiento de eventos, que permite realizar un análisis de contribución de fuentes para eventos promedio de corto plazo. El nombre de este archivo se establece por defecto como “archivo de sucesos de entrada”, contendrá información de los resúmenes detallados de la contribución de cada fuente.

\* Summary file: disponible solamente cuando la versión de AERMOD 09292 es seleccionada. Esta opción se utiliza para generar un archivo de salida con un formato separado que contiene el resumen de los altos valores clasificados incluidos al final del archivo “aermod.out “

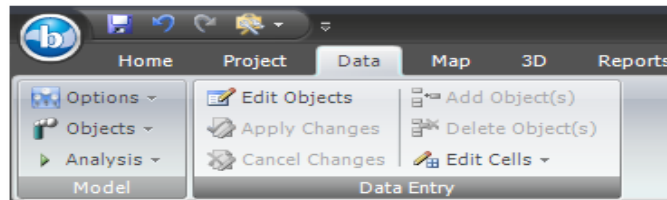
En la barra de herramientas se muestran otras pestañas, entre ellas

Home: en la opción other se pueden obtener manuales en pdf.



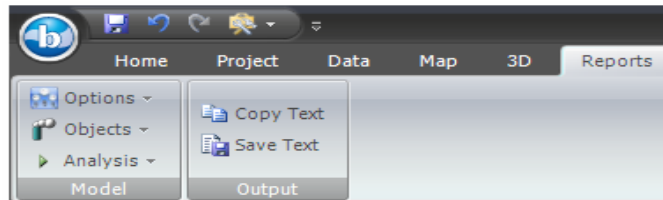
**Figura 61.** Barra de herramientas Home

Data: muestra todos los datos ingresados, fuentes, receptores, meteorológicos, etc.



**Figura 62.** Barra de herramientas Data

Reports: es la otra opción para visualizar los datos con los que se alimenta el modelo y los resultados obtenidos



**Figura 63.** Barra de herramientas Reports

## 11. EJECUCIÓN DEL MODELO

AERMOD BREEZE muestra información, advertencias y mensajes de error antes de ejecutar el modelo. Al hacer clic en el botón Ejecutar, BREEZE muestra una pantalla donde se da la última oportunidad al usuario de revisar los errores potenciales. Cuando se este seguro de que la información es la correcta se procede a la ejecución del modelo, de lo contrario se puede modificar. BREEZE da la opción de mostrar el día para el cual el modelo se está ejecutando, además de la hora y las tres concentraciones más altas para el periodo promedio seleccionado.



Figura 64. Barra de herramientas Project, opción Run

Luego de tener la información completa, el modelo puede ser ejecutado, es importante revisar los avisos de advertencia para determinar posibles errores antes de la ejecución. Al ejecutar RUN se muestra:

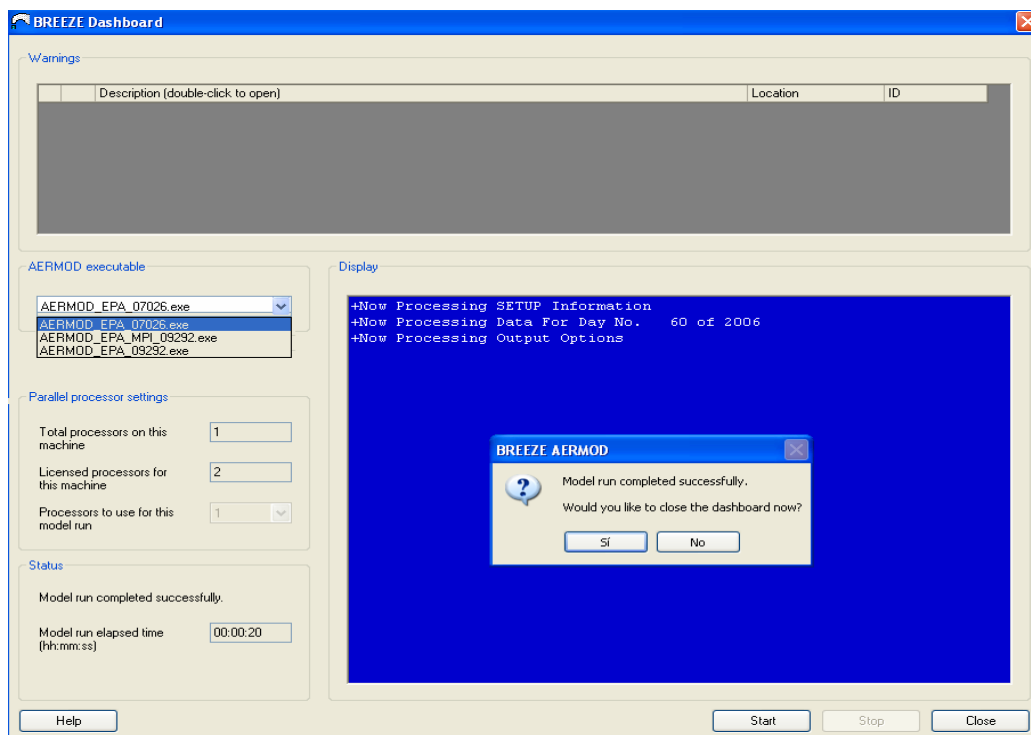
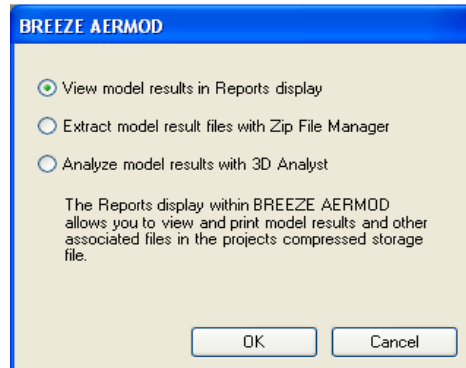


Figura 65. Ventana opción Run

La primera parte está designada para mostrar los warning que el programa reconozca, haciendo doble clic se puede tener un registro de la ubicación del error.

En la opción AERMOD executable se puede seleccionar la versión de AERMOD con la cual se desea realizar la simulación. Cuando la simulación termina muestra tres opciones para visualizar los resultados.



**Figura 66.** Ventana de confirmación datos de salida

La primera muestra una serie de reportes en tablas, donde se muestra desde los datos que alimentaron el modelo hasta los resultados obtenidos. Esta opción también se puede consultar desde la pestaña Reports de la barra de herramientas.

La segunda permite guardar un archivo comprimido de los datos y resultados para ser exportado hacia otro programa que permita visualizar los resultados obtenidos, este archivo se guarda con la extensión .amz.

Y la tercera exporta los resultados a la herramienta 3D Analyst, donde se generaran mapas de concentraciones, permitiendo analizar con mayor facilidad los resultados obtenidos,

## **PROGRAMA ADICIONAL PARA LA VISUALIZACIÓN DE LOS RESULTADOS**

### ***AERMOD BREEZE 3D Analyst***

AERMOD BREEZE se integra con 3DAnalyst para llevar a cabo el análisis de la ejecución del modelo y visualización de los resultados. Crea automáticamente contornos que representan las concentraciones de contaminantes, se pueden definir los niveles para los contornos o definir niveles específicos para cada contaminante, y definir diferentes niveles de transparencia.





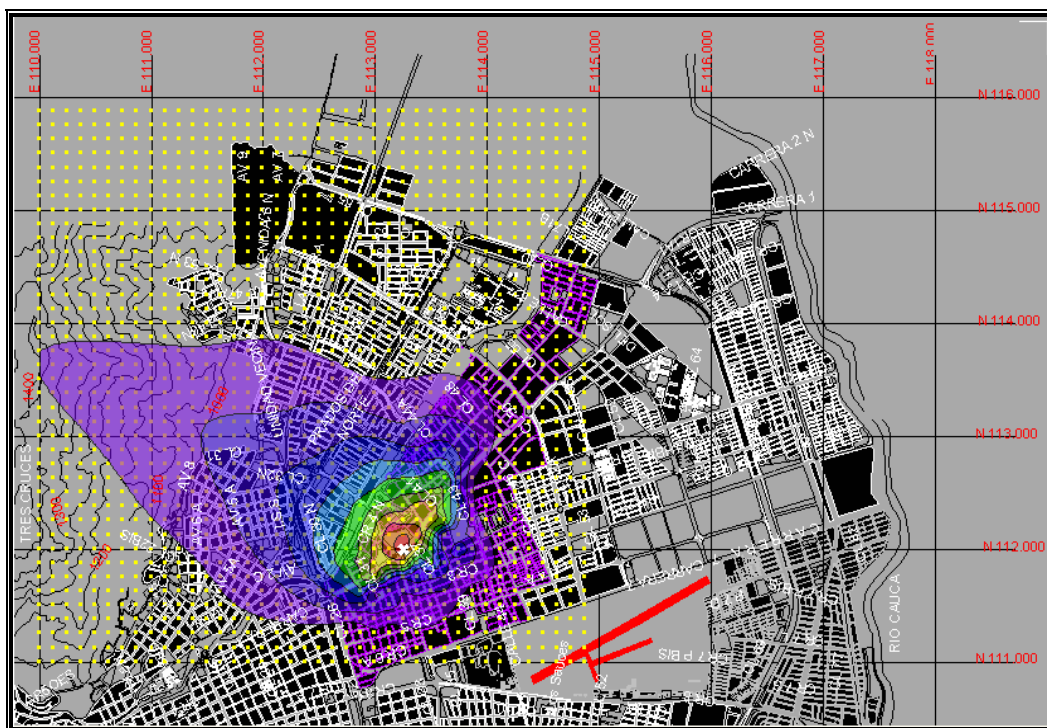


Figura 69. Mapa de concentraciones y la grilla de receptores

Las herramientas son similares a las utilizadas en el modelo BREEZE AERMOD para las aplicaciones del mapa. 3D Analyst, permite personalizar el mapa desde una barra de herramientas lateral:

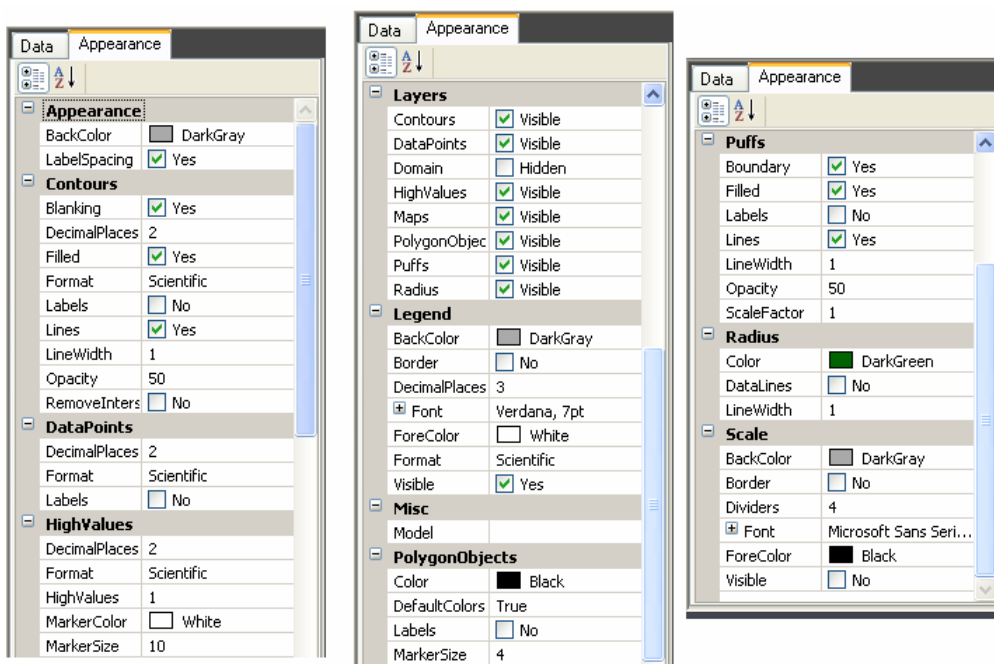


Figura 70. Barra de herramientas para personalizar el mapa