

**Modelos de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos Aplicados a Proyectos de
Ingeniería**



Heidy Laudid Duran Sánchez y Gina Lorena Vargas Jerez

Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Universidad de Pamplona

Ingeniería Civil

2021

**Modelos de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos Aplicados a Proyectos de
Ingeniería**



Ing. Juan Carlos Rojas Vargas

Tutor trabajo de grado

Heidy Laudid Duran Sánchez y Gina Lorena Vargas Jerez

Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Universidad de Pamplona

Ingeniería Civil

2021

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

Resumen

En el siguiente trabajo se realizó una investigación exhaustiva tras revisar diferentes fuentes bibliográficas, acerca de los tipos de modelos de dispersión atmosférica más representativos en el mercado, analizando el funcionamiento de cada uno de ellos y la aplicación que han tenido en diferentes proyectos a nivel mundial como método de mitigación a la contaminación del aire y ambiental. Como resultado de la revisión, se constató: la legislación existente a nivel nacional acerca de la medida y cuidado de la contaminación atmosférica, conceptos y bases teóricas de mayor influencia en la investigación, el funcionamiento del EIA e importancia de los inventarios de emisiones atmosféricas en cuanto a los modelos, a su vez se definen modelos de tipo gaussiano, eulerianos y lagrangianos; además de identificar los contaminantes criterio más influyentes en la contaminación atmosférica y su nivel máximo permisible en Colombia; así mismo, y como ya se mencionó anteriormente la presentación de algunos casos en los que se han aplicado los modelos de dispersión definidos dentro del contenido del trabajo y estudio de sus resultados.

Palabras claves: Contaminación atmosférica, contaminantes criterio, fuentes de emisión, modelos de dispersión atmosférica.

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

Abstract

In the following work, an exhaustive investigation was carried out after reviewing different bibliographic sources, about the most representative types of atmospheric dispersion models on the market, analyzing the operation of each one of them and the application they have had in different projects worldwide. as a method of mitigating air and environmental pollution. As a result of the review, it was found: the existing legislation at the national level about the control and prevention of air pollution, concepts and theoretical bases of greater influence on the investigation, the operation of the EIA and the importance of atmospheric emissions inventories in terms of to the models, Gaussian, Eulerian and Lagrangian type models are defined; in addition to identifying the most influential criteria pollutants in air pollution and its maximum permissible level in Colombia; Likewise, and as previously mentioned, the presentation of some cases in which the dispersion models defined in the content of the work have been applied and the analysis of their results.

Keywords: Air pollution, criteria pollutants, emission sources, atmospheric dispersion models.

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

Índice General**Contenido**

| | |
|--|----|
| Resumen..... | 3 |
| Abstract..... | 4 |
| Introducción | 10 |
| Objetivos..... | 12 |
| Objetivo general:..... | 12 |
| Objetivos específicos: | 12 |
| Justificación | 13 |
| Marco Referencial..... | 14 |
| Marco Legal | 24 |
| Marco Teórico..... | 29 |
| Medio ambiente | 29 |
| Impacto ambiental..... | 29 |
| Evaluación Ambiental..... | 29 |
| Evaluación de impacto ambiental (EIA)..... | 29 |
| Contaminación atmosférica | 30 |
| Contaminantes criterio..... | 30 |
| Fuentes de contaminación atmosférica | 30 |
| Modelación atmosférica..... | 32 |
| Modelos de dispersión atmosférica..... | 32 |

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

| | |
|---|----|
| Capítulo 1. Evaluación de impacto ambiental (EIA) | 32 |
| Capítulo 2: Inventarios de Emisiones Atmosféricas | 36 |
| Tipos de Inventarios de Emisiones Atmosféricas | 37 |
| Proceso de Elaboración de un Inventario de Emisiones Atmosféricas | 39 |
| Capítulo 3: Contaminantes Criterio | 42 |
| PM ₁₀ y PM _{2,5} | 43 |
| SO ₂ | 44 |
| NO ₂ | 44 |
| O ₃ | 45 |
| CO | 45 |
| Efectos a la salud | 45 |
| Capítulo 4: Modelos de Dispersión de Contaminantes | 47 |
| Parámetros de Dispersión | 48 |
| Modelo de Dispersión Gaussiano | 49 |
| Modelo SCREEN3 | 55 |
| Modelo AERMOD | 57 |
| Modelo de pluma gaussiana quebrada | 59 |
| Modelo tipo puff | 60 |
| Modelo PUFF-PLUME | 62 |
| Modelos Eulerianos | 63 |

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

| | |
|--|--------------------------------------|
| Modelo CMAQ | 65 |
| Modelo CAMx | 65 |
| Modelo WRF-CHEM..... | 66 |
| Modelo de Caja..... | 67 |
| Modelos lagrangianos | 69 |
| FLEXPART (Flexible Particle Dispersion Model)..... | 72 |
| NAME..... | 73 |
| CALLPUFF..... | 74 |
| HYSPLIT | 75 |
| RIMPUFF | 76 |
| LILLPELLO | 76 |
| STILT..... | 77 |
| Aplicación de los Modelos de Dispersion Atmosférica..... | 77 |
| Conclusiones..... | 82 |
| Referencias..... | ¡Error! Marcador no definido. |

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

Índice de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Tipos de inventarios de emisiones atmosféricas según su propietario | 38 |
| Tabla 2 componentes mínimos de un plan de trabajo | 40 |
| Tabla 3 Niveles máximos permisibles de contaminación criterio en el aire..... | 43 |
| Tabla 4 Categoría de turbulencia atmosférica de Pasquill y condiciones meteorológicas que las definen | 48 |
| Tabla 5 Formulas recomendadas por Briggs (1973) para $\sigma_y(x)$ y $\sigma_z(x)$ ($10^2 < x < 10^4$ m). | 49 |
| Tabla 6 Factor de corrección..... | 55 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 Pirámide de Kelsen..... | 28 |
| Figura 2 Estructura conceptual del proceso de evaluación de impacto ambiental. | 35 |
| Figura 3 Esquema de generación de un modelo de dispersión | 47 |
| Figura 4 Penacho originado desde una fuente que emite continuamente | 50 |
| Figura 5 Comportamiento de la pluma y concentración con el tiempo. | 53 |
| Figura 6 Diagrama de bloques del modelo AERMOD y preprocesadores..... | 59 |
| Figura 7 Simulación de transporte realizada con el modelo PUFF-PLUME. | 62 |
| Figura 8 Diagrama de “celdas” de un modelo Euleriano..... | 64 |
| Figura 9 Aplicación del modelo de caja. | 69 |
| Figura 10 Diagrama de partículas de un modelo de dispersión lagrangiano en 3D. | 70 |
| Figura 11 Sistema de referencia lagrangiano..... | 71 |

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

Introducción

Con el paso de los años ha sido muy evidente y cada vez más representativos los problemas ambientales como consecuencia de las actividades humanas, afectando esto a todo el planeta de manera preocupante. Así mismo, ha sido imposible ignorar el problema arraigado a la contaminación atmosférica, ya que ha tenido un aumento muy rápido debido a la ampliación en el sector industrial, lo que implica el ascenso en la emisión de sustancias químicas a la atmósfera.

Entre los contaminantes criterios frecuentemente generados se encuentran, el ozono (O_3), dióxido de azufre (SO_2), dióxido de carbono (CO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2), monóxido de carbono (CO), aerosoles y las partículas en suspensión (PM10, PM2,5) que son liberados directamente a la atmósfera y reciben este nombre debido al límite máximo permitido de concentración en el aire, con el fin de mantener un control de estos y proteger la salud humana.

Para mitigar y controlar estos efectos producidos al ambiente y a la salud, en Colombia la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) evalúa el impacto ambiental generado por los proyectos, obras o actividades, mediante distintos métodos utilizados para la valoración de los mismos. En cuanto a la contaminación atmosférica existen unos modelos físicos y matemáticos de dispersión que mediante un análisis detallado permiten cuantificar, predecir y controlar la concentración de estos contaminantes criterio liberados a la atmosfera por una fuente emisora. Al realizar el modelado de un proyecto se pueden aplicar 3 tipos generales de modelos de dispersión que son: los modelos de dispersión gaussianos, modelos eulerianos y modelos lagrangianos, para los cuales se establecen una serie de fases a tener en cuenta en la aplicación de cada modelo con la finalidad de

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS
obtener resultados verídicos y así determinar el grado de eficacia del modelo
seleccionado.

Este trabajo tiene como propósito investigar la manera de solventar la
contaminación atmosférica generada por los distintos proyectos de ingeniería y
actividades antropogénicas, enfatizando en los modelos de dispersión existentes y
analizando la aplicación de cada uno de ellos como método de mitigación al impacto
ambiental y afectación a la salud de los seres vivos.

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

Objetivos

Objetivo general:

Investigar en diferentes fuentes bibliográficas sobre los modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos, definición, impacto, finalmente aplicación a nivel mundial, como método de mitigación a la contaminación del aire.

Objetivos específicos:

- Recopilar información sobre conceptos y bases teóricas de mayor relevancia en el proyecto.
- Identificar en la legislación existente de Colombia, leyes, decretos y resoluciones en relación a la medida y cuidado de la contaminación atmosférica.
- Definir los tipos de modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos más representativos en el mercado, funcionalidad y principios matemáticos.
- Analizar la aplicación que han tenido los modelos de dispersión en proyectos desarrollados en diferentes partes del mundo.

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

Justificación

La incompatibilidad que existe entre la relación hombre-naturaleza ha sido el causante de la problemática ambiental por la que se está atravesando, cuidar el medio ambiente es un tema que nos compete a todos y que no se puede pasar por alto, peor ahora, cuando la naturaleza se encuentra en una situación tan crítica producto de las acciones del ser humano, por eso, salvaguardar los recursos naturales es el paso a tomar para alcanzar un desarrollo sostenible, como por ejemplo, la calidad del recurso aire y como mitigar los efectos de dispersión de contaminantes presentes en él, lo cual es un aspecto sumamente importante y no solo afecta al medio ambiente sino también la salud humana. Este proyecto se desarrolló con el fin de incrementar en el área ambiental los conocimientos respecto a los modelos de dispersión atmosférica, como su función y el rol tan importante que cumplen estos frente a la contaminación del aire, métodos que nos permiten analizar el comportamiento e impacto de los contaminantes más nocivos que afectan la atmosfera y crear estrategias que ayuden al control de esas emisiones contaminantes para no sobrepasar los niveles permitidos.

Por esta razón, surge la necesidad de aportar una recopilación de información concerniente al tema, que permita evidenciar la importancia de cuidar el aire que respiramos y las metodologías con que se cuenta para lograrlo.

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

Marco Referencial

| | |
|---------------------------|---|
| PROYECTO N°1 | NIVEL NACIONAL: Yumbo / Valle del Cauca. |
| TITULO DEL TRABAJO | Implementación de un modelo de análisis de dispersión atmosférica de material particulado (PM10) a través de la herramienta AERMOD VIEW en el municipio de Yumbo (Valle del Cauca). |
| AUTOR: | Marleni Marín Ocampo, Aymer Mauricio Otalvora Martínez |
| AÑO: | 2020 |
| FUENTE: | https://repository.unad.edu.co |
| INTRODUCCIÓN: | <p>Colombia, un país en desarrollo económico, tiene siete zonas industriales, una de las cuales está ubicada al suroeste de la zona industrial del país en Yumbo, con más de 400 empresas, información de registro en la cámara de comercio de la ciudad. En esta región, la calidad del aire supera los estándares regulatorios para parámetros de partículas por debajo de 10 micrones (PM10), según un informe agregado 2018 presentado por la Asociación de la Región Autónoma del Valle del Cauca-HVAC. El resultado es la Estación de Calidad del Aire (ECA) en la región Akopi-Yumbo, pero la información que obtiene el modelo distribuido de PM10 es de fuentes estáticas y regionales en la región, aumentando los niveles de PM10. Refleja que hay otros factores que lo hacen</p> |

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

| | |
|---|--|
| | suceder. |
| <p>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:</p> | <p>La contaminación del aire en Colombia es uno de los mayores problemas ambientales, ya que tiene un impacto negativo en la salud humana y el medio ambiente. Además, el Ministerio de Desarrollo Sostenible Ambiental señala que los combustibles fósiles son una de las principales causas de migración o emisiones fijas, que es el tercer factor que determina los costos sociales. (Minambiente, 2019).</p> |
| <p>OBJETIVOS:</p> | <p>Objetivo General:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Implementar un modelo de análisis de dispersión atmosférica de material particulado menor de 10 micras (PM10) en el sector Industrial del municipio de Yumbo (Valle del Cauca). <p>Objetivos específicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Actualizar el inventario de emisiones atmosféricas relacionado con el contaminante Material Particulado menor de 10 micras (PM10) en la zona Industrial del municipio de Yumbo. • Aplicar el software de modelación AERMOD VIEW para estimar la dispersión atmosférica del contaminante Material Particulado menor de 10 micras (PM10) |

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

| | |
|---|---|
| | <p>incluyendo las características meteorológicas y topográficas.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Generar una propuesta de estrategias que complemente la información del software para las entidades encargadas de la gestión de la calidad del aire en la zona. |
| <p>FUNDAMENTACION TEORICA:</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Contaminación Atmosférica • Inventario de Fuentes Fijas • Tipos de Contaminantes • Trazas Atmosféricas • Contaminantes Criterio • Dispersión de los Contaminantes. • Fuentes de Emisión • Monitoreo y Evaluación de la Calidad del Aire • Modelos de Dispersión • Tipos de Modelación • Estrategias de Prevención y Control de la Contaminación |

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

| | |
|-----------------------------|--|
| <p>METODOLOGIA:</p> | <p>FASE I:</p> <p>Actualización del inventario de fuentes fijas:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Descripción del área de estudio 2. Identificación de fuentes fijas y fuentes de área <p>FASE II:</p> <p>Selección del modelo de dispersión</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Recolección de información meteorológica 2. Información topográfica de la zona de estudio 3. Procesamiento de datos en el modelo <p>FASE III:</p> <p>Definición estrategias de implementación</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Estrategias de complementación para el modelo |
| <p>CONCLUSIONES:</p> | <p>Los resultados del modelo muestran acciones claras y coordinadas dentro de un enfoque sistematizado y colaborativo entre la Agencia de Medio Ambiente, la Secretaría Municipal de Salud, Transporte e Infraestructura para mejorar la calidad del aire en el área estudiada. Producción más limpia en términos de monitoreo y manejo, monitoreo epidemiológico, recubrimiento de asfalto en algunas vías y rutas industriales, renovación de flotas, mejoramiento de la calidad del Diesel, principalmente reemplazo</p> |

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

| | |
|---------------------------|---|
| | <p>Alternativa a combustibles fósiles Manejo de problemas como gas natural, mejor tecnología disponible en sistemas de control, corporativa responsabilidad social, planificación territorial, gestión de proyectos compartidos.</p> |
| PROYECTO N°2 | INTERNACIONAL: Trujillo/ Perú |
| TITULO DEL TRABAJO | Modelado y simulación de la dispersión de contaminantes en la Pluma de una chimenea por el método de dispersión Gaussiano. |
| AUTOR: | Ing. José Manuel Perdiz Dávila |
| AÑO: | 2016 |
| FUENTE: | <p>https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/7974/Tesis%20Maestr%C3%ADaX%20-%20Jos%C3%A9%20Manuel%20Perd%C3%ADz%20D%C3%A1vila.pdf?sequence=1&isAllowed=y</p> |
| INTRODUCCIÓN: | <p>La contaminación del aire es un fenómeno principalmente relacionado con la existencia humana. Esta contaminación ha aumentado muy rápidamente desde la llamada era industrial hasta la actualidad.</p> <p>Hay muchas sustancias químicas que pueden contaminar el aire, pero las más comunes que deben controlarse son el monóxido de carbono, el dióxido de azufre, los compuestos orgánicos, las partículas, el óxido nitroso y los compuestos orgánicos volátiles ...</p> |

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

| | |
|---------------------------------------|---|
| | <p>Los primeros cuatro factores afectan directamente nuestra calidad de vida, mientras que los dos últimos son componentes del smog fotoquímico, cuyos efectos nocivos son la formación de ozono, otras sustancias tóxicas y otras moléculas oxidantes.</p> |
| <p>OBJETIVOS:</p> | <p>Objetivo General:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Elaborar un modelado y simulación de la dispersión de contaminantes en la pluma de una chimenea por el método de dispersión gaussiano. <p>Objetivo específico:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar una aplicación informática en lenguaje Visual Basic. NET con interacción a la aplicación Matlab y la hoja electrónica Excel que permita realizar los cálculos del método de dispersión Gaussiano. |
| <p>FUNDAMENTACION TEORICA:</p> | <p>El derecho a un medio ambiente sano y equilibrado es fruto de la dignidad humana y se considera el requisito mínimo para el desarrollo humano, independientemente del comportamiento individual. Nuestras semillas son valores que requieren recursos mínimos para ser impresos y nunca dejan de ser humanos.</p> <p>En 1987 la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas (Comisión Brundtland) emitió</p> |

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

| | |
|----------------------|---|
| | <p>su informe definiendo por primera vez el concepto de desarrollo sostenible como el “proceso en donde asegura la satisfacción de las necesidades humanas presentes sin que se ponga en peligro la capacidad de las generaciones futuras para atender sus propias necesidades y que, por ende, involucra la utilización de recursos”.</p> |
| METODOLOGIA: | <ol style="list-style-type: none"> 1. Revisión bibliográfica 2. Revisión de modelos existentes. 3. Validación resultados obtenidos 4. Selección del lenguaje para el desarrollo |
| CONCLUSIONES: | <p>Las simulaciones matemáticas de fenómenos complejos como la contaminación del aire dan resultados aproximados, pero estos resultados implican acciones correctivas para identificar las áreas con las tasas de contaminación del aire más altas y más bajas: esta es la forma más eficiente de 'aplicar'.</p> <p>La aplicación desarrollada puede calcular las posibles concentraciones de contaminantes en la chimenea en diversas situaciones.</p> |

| | |
|---------------------------|--|
| PROYECTO N°3 | INTERNACIONAL: Santiago/Chile |
| TITULO DEL TRABAJO | Aplicación de modelos de dispersión atmosférica en la evaluación de impacto ambiental: análisis del proceso |

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

| | |
|---|--|
| AUTOR: | Cristian Bustos Salas |
| AÑO: | 2004 |
| FUENTE: | Ing. Juan Carlos Rojas Vargas |
| <p>INTRODUCCIÓN:</p> <p>El Problema</p> | <p>Este estudio es un modelo simple de difusión de aire gaussiano para determinar los efectos de uno o más contaminantes del aire cerca de fuentes, como en una evaluación ambiental realizada en Chile entre 1997 y 2001. El objetivo es estudiar el uso descriptivo que reúna supuestos sólidos e identifique oportunidades para mejorar el uso y la evaluación de modelos.</p> <p>En este trabajo, las preguntas anteriores serán abordadas a través de una revisión sistemática de las evaluaciones de impacto ambiental, entrevistas con expertos relevantes y acciones sugeridas para resolverlas.</p> |
| OBJETIVOS: | <p>Objetivo General:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Evaluar el proceso de aplicación de modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos en proyectos sometidos al SEIA en Chile. <p>Objetivo específico:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Describir el uso de modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos en la evaluación ambiental de proyectos sometidos al SEIA en Chile entre los años 1997 y 2001. • Determinar si las aplicaciones de modelos de dispersión de |

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

| | |
|---|--|
| | <p>contaminantes atmosféricos han considerado una aproximación metodológica apropiada para la naturaleza sistémica de este tipo de herramientas.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Proponer formas de mejorar el uso de modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos en Estudios de Impacto Ambiental. |
| <p>FUNDAMENTACION TEORICA:</p> | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Trazas atmosféricas y contaminantes criterio. ➤ La modelación ➤ Modelación atmosférica |
| <p>METODOLOGIA:</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Estudio y definición del problema • Selección o construcción del modelo • Valores de las variables y los parámetros utilizados • Ejecución de la modelación • Evaluación de los resultados • Validación de los resultados |
| <p>CONCLUSIONES:</p> | <p>Los resultados muestran que la aplicación del modelo de difusión de contaminantes atmosféricos en la predicción y evaluación del impacto ambiental de los proyectos presentados al SEIA de 1997 a 2001 no consideró un enfoque metodológico. Lógica adecuada para herramientas de análisis. Esto se debe a que no se encontró el proyecto de inversión probado, por lo que el</p> |

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

| | |
|--|--|
| | <p>objetivo para aplicar el modelo, la motivación para la selección del modelo, el análisis de los procesos relacionados, el aseguramiento de la calidad de la información utilizada, la precisión de los resultados y la verificación de los resultados del modelo.</p> |
|--|--|

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

Marco Legal

- **Constitución Política De Colombia 1991:** De la constitución política existen estos dos artículos a destacar en cuanto al medio ambiente:

Art 79. “Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines”.

Art 80. “El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados. Así mismo, cooperará con otras naciones en la protección de los ecosistemas situados en las zonas fronterizas”.

- **Ley 99 de 1993:**

“Descripción: Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones”.

TÍTULO II. Del Ministerio Del Medio Ambiente Y Del Sistema Nacional Ambiental

Artículo 4º.- “Sistema Nacional Ambiental, SINA. El Sistema Nacional Ambiental, SINA, es el conjunto de orientaciones, normas, actividades, recursos,

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

programas e instituciones que permiten la puesta en marcha de los principios generales ambientales contenidos en esta Ley”. Estará integrado por los siguientes componentes:

1. "Los principios y orientaciones generales contenidos en la Constitución Nacional, en esta Ley y en la normatividad ambiental que la desarrolle.
2. La normatividad específica actual que no se derogue por esta Ley y la que se desarrolle en virtud de la ley.
3. Las entidades del Estado responsables de la política y de la acción ambiental, señaladas en la ley.
4. Las organizaciones comunitarias y no gubernamentales relacionadas con la problemática ambiental.
5. Las fuentes y recursos económicos para el manejo y la recuperación del medio ambiente.
6. Las entidades públicas, privadas o mixtas que realizan actividades de producción de información, investigación científica y desarrollo tecnológico en el campo ambiental".

“El Gobierno Nacional reglamentará la organización y funcionamiento del Sistema Nacional Ambiental, SINA”

Artículo 5°.- “Donde se establecen las funciones del Ministerio del Medio Ambiente, abarcando un total de 45 puntos a tener en cuenta, en los cuales el punto 11 describe: Dictar regulaciones de carácter general tendientes a controlar y reducir las contaminaciones geosférica, hídrica, del paisaje, sonora y atmosférica, en todo el territorio nacional”

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

▪ **Decreto 948 de 1995**

Ministerio del Medio Ambiente. “Por el cual se reglamentan, parcialmente, la Ley 23 de 1973, los artículos 33, 73,74, 75 y 76 del Decreto - Ley 2811 de 1974; los artículos 41, 42, 43, 44, 45, 48 y 49 de la Ley 9 de 1979; y la Ley 99 de 1993, en relación con la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire”

▪ **Decreto 2107 de 1995**

Ministerio del Medio Ambiente. “Por medio del cual se modifica parcialmente el Decreto 948 de 1995 que contiene el Reglamento de Protección y Control de la Calidad del Aire”

Artículo 4o. “Modificase el literal h) del artículo 75 del Decreto 948 de 1995, de la siguiente manera:”

"Artículo 75: Solicitud de permiso.

h. Estudio técnico de evaluación de las emisiones de sus procesos de combustión o producción; se deberá anexar además información sobre consumo de materias primas, combustibles y otros materiales utilizados."

Artículo 5o. Modificase el numeral 5 del artículo 76 del Decreto 948 de 1995, de la siguiente manera:

“Artículo 76: Trámite del permiso de emisión atmosférica.

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

5. La Resolución por la cual se otorga o se niega el permiso deberá ser motivada y contra ella proceden los recursos de ley”

- **Decreto 1076 de 2015**

“Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible”

- **Resolución 601 de 2006**

“Por la cual se establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia”

Artículo 3. De la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión: “La presente resolución establece la norma de calidad del aire o nivel de inmisión para todo el territorio nacional en condiciones de referencia, en la cual se desarrollan los niveles máximos permisibles de contaminantes en la atmósfera; los procedimientos para la medición de la calidad del aire, los programas de reducción de la contaminación del aire y los niveles de prevención, alerta y emergencia y las medidas generales para su mitigación, norma aplicable a todo el territorio nacional”

- **Resolución 909 de 2008**

“Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones”

Artículo 3. Ámbito de aplicación. “Las disposiciones de la presente resolución, se establecen para todas las actividades industriales, los equipos de combustión externa, instalaciones de incineración y hornos crematorios”

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

En lo relacionado con el control de emisiones molestas, aplica además a todos los establecimientos de comercio y de servicio.

- **Resolución 910 de 2008**

“Por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres, se reglamenta el artículo 91 del Decreto 948 de 1995 y se adoptan otras disposiciones”

- **Resolución 2254 de 2017**

Por la cual se adopta de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones.

Artículo 1. Objeto y ámbito de aplicación. “La presente resolución establece la norma de calidad del aire o nivel de inmisión y adopta disposiciones para la gestión del recurso aire en el territorio nacional, con el objeto de garantizar un ambiente sano y minimizar el riesgo sobre la salud humana que pueda ser causado por la exposición a los contaminantes en la atmósfera”

Figura 1

Pirámide de Kelsen



Nota. Elaboración propia.

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

Marco Teórico

Medio ambiente

“Es todo lo que rodea al ser humano e incluye los elementos naturales de los factores físicos y biológicos, artificiales y sociales y sus interacciones. El medio ambiente incluye la existencia de la naturaleza, la sociedad y la cultura en lugares y tiempos específicos y sus interacciones” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Impacto ambiental

“Cualquier alteración sobre el medio ambiente (medios abiótico, biótico y socioeconómico), que sea adverso o beneficioso, total o parcial, que pueda ser atribuido al desarrollo de un proyecto, obra o actividad” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020).

Evaluación Ambiental

“Los procedimientos administrativos para aprobar o adoptar planes y programas, así como las tareas administrativas para la gestión del proyecto, deben declararse responsablemente o contactarse con anticipación, según corresponda, para la aprobación del proyecto. Se analiza el entorno de planes, programas y proyectos. La evaluación ambiental incluye tanto la evaluación ambiental estratégica como la evaluación del impacto ambiental” (Ley 21/2013 como se cito en Petracca, 2017).

Evaluación de impacto ambiental (EIA)

La evaluación de impacto ambiental (EIA) es una de las tecnologías de protección ambiental más relevantes en todos los países desarrollados, y es el medio ambiente antes de que sea realizado por una acción pública o privada para tomar medidas de precaución. Incluye análisis o evaluación de impactos ambientales nocivos. Medidas de mejora del comportamiento

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

para el desarrollo sostenible. Es una herramienta para proteger los recursos naturales y el medio ambiente en los países industrializados. Su único propósito es proporcionar a las autoridades competentes información completa para que estén plenamente conscientes del potencial de impactos significativos en el entorno escolar y puedan tomar decisiones sobre proyectos específicos (Petracca, 2017)

Contaminación atmosférica

“La contaminación del aire se define como un estado del aire en el que determinadas sustancias alcanzan concentraciones superiores a lo normal para el medio ambiente y afectan negativamente a las personas, los animales, la vegetación o las sustancias. Conocimiento de los elementos o compuestos químicos, naturales o artificiales que puedan existir o ser transportados en el aire por sustancias. Estas sustancias pueden existir en la atmósfera como gases, gotitas o partículas sólidas” (Cantalapiedra, 2001).

Contaminantes criterio

Son aquellas sustancias que influyen directamente de forma peligrosa en la salud de la población, debido a que se emiten al ambiente en grandes volúmenes por fuentes antropogénicas, son medidos de forma periódica por redes de monitoreo y supervisados por diferentes normas de calidad del aire. Las emisiones atmosféricas producidas por fuentes móviles y fuentes fijas son transformadas por factores ambientales que afectan su composición, como lo son, humedad relativa, precipitación, temperatura, dirección y velocidad del viento (Sarmiento & Paez, 2019)

Fuentes de contaminación atmosférica

Se pueden catalogar de la siguiente manera (Perdiz Dávila, 2016)

- Fuentes móviles:

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

Principalmente por transporte con motores de combustión interna.

- Fuentes fijas:

Clasificado como:

- ✓ Fuente puntual: Todo derivado de la generación de energía y actividades industriales tales como química, textil, alimentos, madera, metalurgia, metalurgia, fabricación, ingeniería de fábrica, etc. Trabajadores ganaderos, etc.
- ✓ Fuentes de área: principalmente relacionadas con diligencias y técnicas como gasto de solventes, lavado de superficies industriales y de edificios, tintorería, artes gráficas, panaderías, distribución y almacenamiento de gas LP, etc. Incluye producción de programas. También incluye emisiones de operaciones como tratamiento de aguas residuales, plantas de compostaje y rellenos sanitarios.
- ✓ Fuentes naturales: hace referencia a la producción de emisiones provenientes de suspensiones volcánicas, marinas, vegetales y de suelo, y descomponedores anaeróbicos y aeróbicos naturales. En particular, el biogás, que se libera del suelo y la vegetación marina y la actividad microbiana, desempeña un papel importante en la química troposférica al participar directamente en la formación de ozono. Las emisiones biológicas incluyen óxidos de nitrógeno, volátiles distintos del metano, metano, dióxido de carbono y monóxido de carbono, y compuestos de nitrógeno y azufre.

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

Modelación atmosférica

Desde el punto de vista de la dispersión de contaminantes, el modelo se utiliza, entre otras cosas, para ver cómo varía con el tiempo la concentración o proporción de mezcla de sustancias o trazas comúnmente identificadas como contaminantes de referencia. Apoyar las decisiones políticas y la gestión sistemática a través de la planificación, programas, proyectos, estándares de emisión o el desarrollo de la calidad del aire, gracias a los objetos de análisis y predicción de la calidad del aire. Esta variación puede explicarse mediante una ecuación continua (modelo conceptual) que describe el equilibrio entre las fluctuaciones en las concentraciones de trazas y los efectos de la corriente de transporte, fuente y sumidero (Bustos Salas, 2004)

Modelos de dispersión atmosférica

“Los modelos de dispersión se basan en algoritmos matemáticos y se utilizan en todo el mundo para predecir concentraciones de contaminantes y prevenir posibles daños ambientales. Los modelos matemáticos de la calidad del aire son sistemas que utilizan leyes físicas y químicas y modelos de simulación matemática para relacionar las emisiones atmosféricas con las concentraciones de contaminantes a nivel del suelo” (Mendoza Huertas, 2012).

“

“El modelado de la dispersión atmosférica consiste en un conjunto de fórmulas matemáticas que se utilizan para interpretar y predecir las concentraciones de contaminantes causadas por la dispersión y los efectos de las plumas” (Mendoza Huertas, 2012).

Capítulo 1. Evaluación de impacto ambiental (EIA)

La EIA – Evaluación de Impacto Ambiental, es una técnica cuyo principal objetivo es la preservación y protección de los recursos naturales por medio de la evaluación a las consecuencias ambientales significativas generadas por proyectos, obras y/o actividades humanas tanto en el ámbito público como privado, esta estrategia ya no consiste solo en resarcir los daños generados al ambiente por las acciones del hombre sino en predecirlos y prevenirlos, todo en busca de un desarrollo sostenible, por ello se implementan procesos administrativos que permitan aprobar y acoger planes de contingencia y reparación. Como su nombre lo dice, se fundamenta en evaluar los impactos positivos y negativos que se generan al medio ambiente como consecuencia de las actividades del ser humano y a partir de esto, mitigar, compensar y prevenir los efectos negativos de dichas acciones.

La toma de decisiones que se realice frente a un proyecto cualesquiera para determinar si este es o no admisible desde el enfoque ambiental, deben estar valoradas correctamente, es por ello que la EIA se encarga de realizar un análisis integral, extenso y formal que contribuya satisfactoriamente a la selección de la opción que genere el menor impacto negativo posible al medio ambiente, cumpliendo a cabalidad con las políticas ambientales expuestas.

Como parte del proceso de una evaluación de impacto ambiental que busca determinar si las acciones contribuyen a un desarrollo sustentable y evitan el deterioro de los recursos naturales, se debe ejecutar con anterioridad un análisis de impacto ambiental, siendo esta, una

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

actividad primordial para el desarrollo de la EIA que permite a todas las partes involucradas decidir de forma correcta e informada conforme a los resultados obtenidos por acciones humanas que estén afectando de forma significativa al medio ambiente, Sánchez (2011) afirma que “El estudio de impacto ambiental es la base para la toma de decisiones en cuanto a la viabilidad ambiental de la obra propuesta, a la necesidad de medidas mitigadoras o compensatorias y al tipo y alcance de éstas” (p. 50). Este estudio no es más que un documento donde se identifican los impactos y se hace un pronóstico de los efectos que pueden originar, además de presentar formas de reducir y eludir impactos negativos al medio ambiente y propuestas para la optimización de los impactos positivos, permite estudiar el estado ambiental actual y futuro después de las acciones realizadas por el ser humano. La verificación en la veracidad y calidad del análisis ambiental expuesto en dicho documento es realizada por parte de la autoridad competente. Para el proceso de la evaluación de impacto ambiental, no solo se requiere de un estudio técnico como el estudio de impacto ambiental sino también de una serie de aspectos muy importantes como la disposición de políticas, requerimientos legales y sistemas de inspección y seguimiento (Espinoza, 2001).

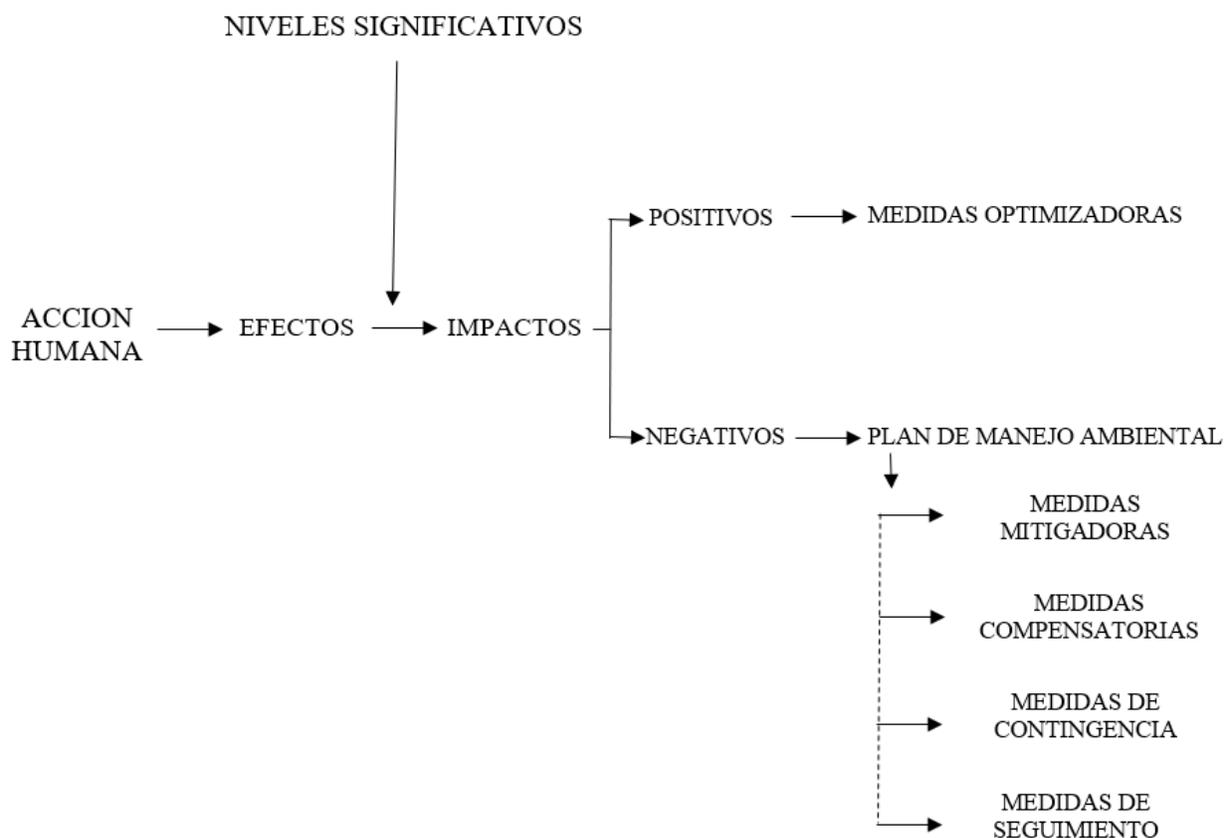
El proceso está compuesto por una serie de actividades o procedimientos cuya etapa inicial consiste en analizar si el proyecto, obra o actividad causaría un impacto ambiental que fuese significativo, si no es así solo se procedería a entregar una licencia ambiental que fuese aprobada y monitoreada, en caso opuesto, se llevaría a cabo un proceso completo de evaluación donde se implementaría un análisis técnico por medio de un estudio de impacto ambiental, que ayude a elegir la decisión más compatible con el medio ambiente. Si la decisión tomada fue la aprobación del proyecto este debe estar a disposición de medidas de mitigación, eliminación y/o recompensa de los efectos negativos generados al medio ambiente y a las del fortalecimiento de

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

aquellos impactos que son positivos, por consiguiente, el proyecto debe ser monitoreado para asegurar que se esté cumpliendo con lo pronosticado en el estudio de impacto ambiental.

Figura 2

Estructura conceptual del proceso de evaluación de impacto ambiental.



Nota. Tomado de *Fundamentos de Evaluación de Impacto Ambiental* (p. 29), por G. Espinoza, 2001, Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

Capítulo 2: Inventarios de Emisiones Atmosféricas

“Un inventario de emisiones atmosféricas es aquel que caracteriza e integra las emisiones totales de contaminantes en la atmósfera, por tipo de fuente y por tipo y cantidad de contaminantes emitidos, por áreas geográficas y en diferentes intervalos de tiempo específico en un conjunto de datos” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Y se puede expresar por la siguiente ecuación:

$$IEA = \sum_{i=1}^n E_{j,t}$$

Donde:

IEA: inventario de emisiones atmosféricas para la sustancia o mezcla de sustancias (j) en el periodo de tiempo (t).

$E_{j,t}$: emisión atmosférica de la sustancia o mezcla de sustancias (j), generada por la actividad (i) en el periodo de tiempo (t).

n: número total de actividades a inventariar.

En la mayoría de los casos, las estadísticas de control (por ejemplo, t) se utilizan para estimar las emisiones, dado que no es posible almacenar información sobre las emisiones medidas directamente durante el período de evaluación en cada fuente. El enfoque más común es combinar el proceso de cada actividad (factor de actividad), con información sobre las emisiones asociadas a este proceso de actividad (factor de emisión) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017). Entonces, la ecuación básica que estima las emisiones atmosféricas es:

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

$$IEA = \sum_{i=1}^n (FE_{j,i} \times FA_{i,t})$$

Donde:

$FE_{j,i}$: factor de emisión de la sustancia o mezcla de sustancias (j) para la actividad (i).
 $FA_{i,t}$: factor de actividad de la actividad (i) durante el tiempo (t).

Nota. Nótese que la fórmula para determinar las emisiones puede ser diferente, ya que puede incluir otros parámetros para estimar las emisiones, como la reducción de estos parámetros mediante el uso de sistemas de control de emisiones que no se estén incluyendo en el factor de emisión (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Tipos de Inventarios de Emisiones Atmosféricas

La guía para la elaboración de inventarios de emisiones atmosféricas define 6 grupos de inventarios de emisiones atmosféricas según su propósito descritos en la Tabla 1:

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Tabla 1

Tipos de inventarios de emisiones atmosféricas según su propietario

| TIPO DE INVENTARIO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS | PROPÓSITO |
|--|--|
| Inventario de emisiones atmosféricas para el reporte de emisiones | Generar información consolidada de emisiones para la construcción de reportes de emisiones nacionales, regionales, locales o institucionales. |
| Inventario de emisiones atmosféricas para la formulación y evaluación de estrategias | Generar información de emisiones para formular y evaluar estrategias enfocadas a la prevención y control de la contaminación del aire. |
| Inventario de emisiones atmosféricas para el diseño de SVCA | Generar información para el diseño del sistema de vigilancia de calidad del aire y campañas de monitoreo de calidad del aire. |
| Inventario de emisiones atmosféricas para la gestión ambiental corporativa | Generar información de soporte para el diseño, implementación y seguimiento de mecanismos enfocados a la reducción de las emisiones de contaminantes al aire en actividades productivas y de servicio. |
| Inventario de emisiones atmosféricas para modelación | Generar información para la modelación de la calidad del aire. |
| Inventario de emisiones atmosféricas para investigación | Generar información de soporte para la elaboración de estudios de diferente índole. |

Nota. Fuente: Guía para la elaboración de inventarios de emisiones atmosféricas

(Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017)

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Proceso de Elaboración de un Inventario de Emisiones Atmosféricas

Para el proceso de elaboración de un inventario de emisiones atmosféricas se establecen 4 etapas de desarrollo según lo establecido en la “Guía para la elaboración de inventarios de emisiones atmosféricas del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible”, las cuales se mencionan a continuación:

- Etapa 1 Formulación: Es en esta etapa en la cual se forman las bases para el desarrollo del inventario de emisiones atmosféricas, es decir, definir el objetivo, el propósito, y el alcance del mismo. Teniendo en cuenta las siguientes preguntas:

¿Qué es un inventario de emisiones?

¿Cuánto necesito para hacer un inventario de las emisiones atmosféricas?
- Etapa 2 Planificación: En este punto se crea un plan de trabajo, que es el paso fundamental para el desarrollo del inventario, el cual se describe mediante la Tabla 2.

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Tabla 2

componentes mínimos de un plan de trabajo

| | |
|---|--|
| Objeto y alcance del inventario de emisiones atmosféricas | Consolidación del objeto, propósito y alcance del inventario de emisiones atmosféricas establecidos en la etapa de formulación del inventario. |
| Metodología | Conjunto de métodos que se utilizarán para determinar el inventario de emisiones atmosféricas incluidos los métodos de clasificación y cuantificación de fuentes, métodos de medición o estimación de emisiones y procedimientos de control y aseguramiento de la calidad. |
| Recursos humanos | Personal requerido para el desarrollo del inventario de emisiones atmosféricas incluidos sus perfiles, funciones y responsabilidades. |
| Recursos técnicos | Recursos tangibles requeridos para el desarrollo del inventario de emisiones atmosféricas, incluidos entre otros materiales: suplementos, equipos y software. |
| Presupuesto | Relación de los egresos asociados al desarrollo del inventario de emisiones atmosféricas incluidos los recursos humanos, técnicos, logísticos y de información, entre otros. |
| Cronograma de actividades y planeación logística | Es la organización temporal y espacial en la cual se desarrollarán cada una de las actividades del inventario de emisiones atmosféricas. |

Nota. Fuente: Guía para la elaboración de inventarios de emisiones atmosféricas

(Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017)

- Etapa 3 Ejecución: Durante esta fase, se crea un inventario de emisiones atmosféricas según lo previsto en el plan de trabajo, editando información, describiendo y clasificando fuentes de emisión, cuantificando fuentes de emisión, estimando Cálculo de emisiones, reporte de emisiones, almacenamiento de información, reporte técnico y finalmente aseguramiento y control de calidad.

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

- Etapa 4 Evaluación y Actualización: Durante esta fase se realiza una evaluación periódica de la representatividad de la información y la necesidad de actualización. La información de un inventario de emisiones atmosféricas representa la extensión espacial y temporal para la que fue diseñado y por lo tanto cubre un tipo de fuente diferente al de un período, un área geográfica, un material o establecido como parte. Si necesita información sobre su inventario de emisiones atmosféricas, deberá actualizar su inventario de emisiones existente.

Es muy importante enfatizar que la información recopilada durante el desarrollo de un inventario de emisiones es esencial para la aplicación y desarrollo de modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos.

Capítulo 3: Contaminantes Criterio

Los contaminantes estándar son contaminantes que se emiten en grandes cantidades a partir de una variedad de fuentes y representan un riesgo generalizado para la salud y el bienestar humano. Los efectos provocados por estos contaminantes son principalmente agudos y no cancerígenos. Entre los efectos agudos, se encontró que el aumento de las concentraciones ambientales de material particulado (PM₁₀) y ozono está asociado con un aumento de la mortalidad prematura (Reynoso, Grutter, & Juárez, 2007). También se identifican, como aquellos gases emitidos a la atmósfera que tienen un nivel máximo permisible de contaminación en el aire, los cuales están regidos por la Resolución 2254 de 2017 en Colombia, y están comprendidos los siguientes: el material particulado (PM₁₀, PM_{2,5}), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃), y el monóxido de carbono (CO). En la Tabla 3 se establecen los niveles máximos permisibles para cada uno de los contaminantes criterio antes mencionados.

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

Tabla 3

Niveles máximos permisibles de contaminantes criterio en el aire

| Contaminante | Nivel máximo Permissible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | Tiempo de exposición |
|---------------------|---|-----------------------------|
| PM10 | 50 | Anual |
| | 100 | 24 horas |
| PM2,5 | 25 | Anual |
| | 50 | 24 horas |
| SO2 | 50 | 24 horas |
| | 100 | 1 hora |
| NO2 | 60 | Anual |
| | 200 | 1 hora |
| O3 | 100 | 8 horas |
| CO | 5000 | 8 horas |
| | 35000 | 1 hora |

Nota. Fuente: Resolución 2254 de 2017.

Estos contaminantes deben ser medidos, según lo establecido en la resolución, por las autoridades competentes siguiendo las instrucciones, periodicidades y métodos establecidos en el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire, con la finalidad de verificar el cumplimiento de los niveles máximos permisibles, evitando aumentar la contaminación atmosférica y los efectos de los mismos sobre la salud, teniendo en cuenta, que las concentraciones emitidas son generadas principalmente por el transporte, actividades de la industria y caseras.

PM₁₀ y PM_{2,5}

Las partículas en suspensión respirables presentes en la atmósfera se pueden dividir en dos grupos principales según su tamaño, existen las partículas con diámetro igual o menor a los 10 μm o 10 micrómetros que corresponden a las PM₁₀; y las constituidas por diámetros inferiores o iguales a 2,5 micrómetros, que es la fracción respirable más pequeña PM_{2,5}, lo que hace referencia a que son 100 veces menor al diámetro de un cabello humano.

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

El tamaño del diámetro de sus partículas no es lo único que las diferencia, también lo hace su composición y las fuentes por las que son generadas. Las PM_{2.5} provienen de fuentes artificiales como los gases de escape de los vehículos diésel; así pues las PM₁₀ pueden tener origen en fuentes naturales o antropogénicas, entre las naturales se ubican las tormentas de arena de las cuales las partículas de polvo se convierten en un componente de este material particulado de mayor tamaño.

SO₂

El dióxido de azufre es un gas incoloro con un olor acre compuesto por 1 átomo de azufre y 2 átomos de oxígeno (Salud Geoambiental, 2017) se produce por la incineración de inflamables fósiles como petróleo, gasolina, diésel, carbón, etc. Algunas de las principales fuentes de emisión de dióxido de azufre son: calefactores, plantas térmicas, fundición de minerales, vehículos automotores y fuentes de emisión natural como la que se producen en los volcanes (Ciencia química, 2017).

NO₂

El dióxido de nitrógeno NO₂ es un compuesto gaseoso de color canela formado por la combinación de un átomo de nitrógeno y dos átomos de oxígeno. Es un gas tóxico y desagradable (Salud Geoambiental, 2020). Su origen proviene de fuentes antropogénicas, principalmente donde se realiza el proceso de combustión como lo es en calderas, emisiones de vehículos, chimeneas, entre otros; así como también por fuentes naturales donde se encuentran los incendios forestales.

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

O₃

El ozono es un gas incoloro formado por tres átomos de oxígeno presentes en la superficie de la Tierra (ozono troposférico) y la estratosfera (ozono estratosférico). El ozono superficial también se llama ozono malo y el ozono estratosférico también se llama ozono bueno. Este gas es uno de los principales componentes del smog (CeMCAQ, 2017) Su origen proviene a partir de la reacción que existe en la atmosfera de dos contaminantes criterio el SO₂ y el NO₂ con la luz solar y radiación ultravioleta.

CO

El monóxido de carbono (CO) es un gas incoloro e inodoro que puede ser fatal. Ocurre siempre que se queman combustibles como gas natural, propano, gasolina, queroseno, queroseno, madera y carbón vegetal. La inhalación de CO evita que los gases tóxicos ingresen a la sangre y el oxígeno al cuerpo. Esto puede dañar el tejido y provocar la muerte (EPA, 2021).

Efectos a la salud

Los contaminantes criterio y como todos los presentes en el ambiente son los causantes de muchas afectaciones a la salud del ser humano, su naturalidad es ser gases tóxicos generados por distintas actividades antropogénicas y naturales lo que ocasiona complicaciones directamente al sistema respiratorio al ser inhalados como parte del aire. A raíz de esta contaminación atmosférica se ha aumentado el número de casos por enfermedades pulmonares, el material particulado suspendido sobre todo el PM_{2,5} por su composición y partículas de menor tamaño logran introducirse hasta el fondo de los pulmones ocasionando asma y alergias en mayor proporción a los niños, así mismo dificultad para respirar y problemas en el sistema cardiovascular, estas mismas afectaciones son causadas por los contaminantes O₃, SO₂ y el NO₂, lo que también incluyen inflamaciones en los bronquios, disminución de la capacidad pulmonar

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

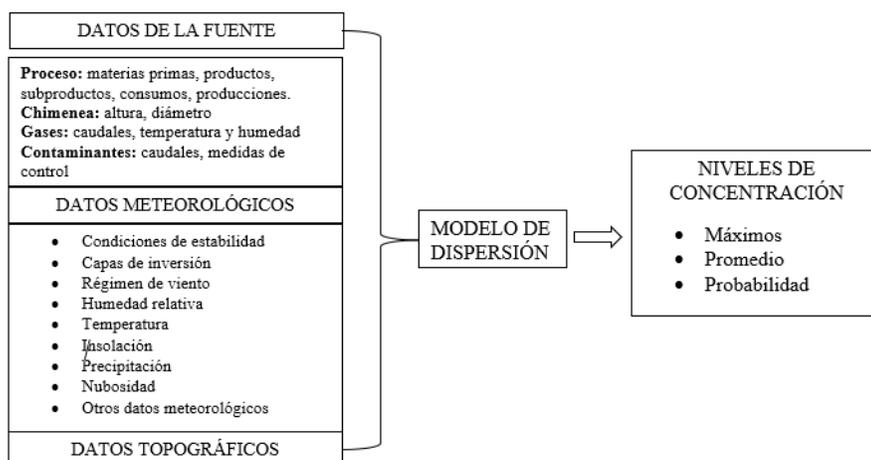
y otros síntomas de menor grado como la irritación ocular y las mucosas. Con el CO ocurre un caso particular, ya que a este contaminante se le conoce como “el asesino silencioso” porque como se había mencionado anteriormente, es un gas inodoro e incoloro que causa un envenenamiento al organismo sin que la persona lo note, generado incluso en su propia casa por la combustión, causando dolores intensos de cabeza, náuseas, irritabilidad y pensamientos confusos, además de falta de memoria y coordinación. Cabe resaltar, que las personas más susceptibles a ser afectadas por este tipo de contaminantes son los niños, adultos mayores y personas con enfermedades respiratorias; aun así, todos los seres humanos están expuestos de adquirir alguna complicación por esta lamentable contaminación, incluso también es afectada la salud de los animales, plantas y ecosistemas en general. Muchos estudios dan como resultado que los contaminantes criterio son los responsables de un incremento en la mortalidad de varios países.

Capítulo 4: Modelos de Dispersión de Contaminantes

Los modelos de calidad del aire utilizan técnicas matemáticas y numéricas para simular los procesos físicos y químicos que afectan a los contaminantes a medida que se dispersan y reaccionan en la atmósfera (Alcaide Lopez, 2000). Otra definición es la expresada por Carlos Alberto Echeverri en su libro “Contaminación Atmosférica, 2019”, un modelo de dispersión es la representación matemática de los procesos de transporte, transformación, dispersión y remoción de los contaminantes del aire como provecho de la interacción de las condiciones espaciales, la topografía y las propiedades de las fuentes generadoras. Un modelo es una construcción intelectual que representa la realidad y puede ser manipulado para predecir las consecuencias de varias acciones, en este caso, relacionando la emisión de un contaminante con su concentración en el aire.

Figura 3

Esquema de generación de un modelo de dispersión



MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Nota. Tomada de *Universidad de Chile-MI5DD, 2008*, como se citó en Astudillo Romero, 2012, Universidad San Francisco de Quito.

Parámetros de Dispersión

Los parámetros de dispersión σ_y y σ_z han sido evaluados mediante diferentes experimentos de dispersión atmosférica utilizando materiales trazadores. También de fuentes existentes (Ulriksen, 2005).

El esquema de cálculo más conocido es el de Pasquill-Gifford. Se definen categorías de turbulencia atmosférica (o categorías de estabilidad atmosférica), estimadas a partir de la velocidad del viento (factor mecánico sobre la turbulencia) y la radiación solar o nubosidad (factor térmico) (Ulriksen, 2005).

Cada tipo de turbulencia atmosférica utiliza una función variable de σ_y con la distancia desde la fuente y otra función de σ_z . Las expresiones para condiciones urbanas y condiciones rurales actualmente recomendadas se incluyen en la Tabla 4.

Tabla 4

Categoría de turbulencia atmosférica de Pasquill y condiciones meteorológicas que las definen

| Velocidad del viento (m/s) | Insolación diurna | | | Día o noche Cubierto (8/8) | Condic. nocturnas Nubosidad | |
|----------------------------|-------------------|----------|-------|----------------------------|-----------------------------|-----------------|
| | Fuerte | Moderada | Débil | | Seminub. >4/8 | Despejado <=3/8 |
| <2 | A | A-B | B | D | | |
| 2-3 | A-B | B | C | D | E | F |
| 3-4 | B | B-C | C | D | D | E |
| 4-6 | C | C-D | D | D | D | D |
| >6 | C | D | D | D | D | D |

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

Nota. Fuente: Pablo Ulriksen U., 2005.

Tabla 5

Formulas recomendadas por Briggs (1973) para $\sigma_y(x)$ y $\sigma_z(x)$ ($10^2 < x < 10^4$ m).

| Categorías de Pasquill | σ_y (m) | σ_z (m) |
|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Condiciones Rurales | | |
| A | $0,22x(1+0,0001x)^{-1/2}$ | $0,20 x$ |
| B | $0,16x(1+0,0001x)^{-1/2}$ | $0,12 x$ |
| C | $0,11x(1+0,0001x)^{-1/2}$ | $0,08x(1+0,0002x)^{-1/2}$ |
| D | $0,08x(1+0,0001x)^{-1/2}$ | $0,06x(1+0,0015x)^{-1/2}$ |
| E | $0,06x(1+0,0001x)^{-1/2}$ | $0,03x(1+0,0003x)^{-1}$ |
| F | $0,04x(1+0,0001x)^{-1/2}$ | |
| Condiciones Urbanas | | |
| A-B | $0,32x(1+0,0004x)^{-1/2}$ | $0,24x(1+0,001x)^{-1/2}$ |
| C | $0,22x(1+0,0004x)^{-1/2}$ | $0,20x$ |
| D | $0,16x(1+0,0004x)^{-1/2}$ | $0,14x(1+0,0003x)^{-1/2}$ |
| E-F | $0,11x(1+0,0004x)^{-1/2}$ | $0,08x(1+0,00015x)^{-1/2}$ |

Nota. Fuente: Pablo Ulriksen U., 2005.

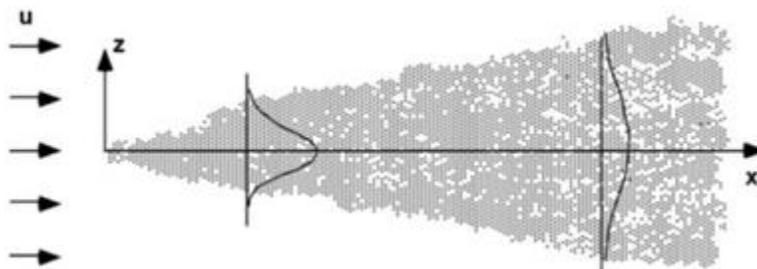
Modelo de Dispersión Gaussiano

Una fuente que emite continuamente contaminantes a la atmósfera produce un penacho. Las partículas inyectadas a la atmósfera en un mismo punto siguen trayectorias ligeramente diferentes, separándose entre ellas a disposición que se apartan de la fuente de emisión. Suponiendo que la emisión de contaminantes y los escenarios atmosféricos son constantes, se alcanza a una condición estacionaria, en el cual las plumas adquieren una determinada forma con el tiempo. Se suele suponer que la dispersión de los contaminantes es de tipo gaussiano (distribución estadística normal). La concentración es mayor en el eje del penacho, siendo menor hacia los lados como se muestra en la Figura 4 (Echeverri Londoño, 2019).

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

Figura 4

Penacho originado desde una fuente que emite continuamente



Nota. Tomado de *Contaminación Atmosférica*, de C. A. Echeverri Londoño, 2019, Ediciones de la U.

El modelo gaussiano de dispersión de contaminantes en la atmósfera considera la emisión de los contaminantes, la estabilidad atmosférica, la velocidad y dirección del viento, la altura de la emisión y las posiciones relativas de la fuente y el receptor para estimar la concentración del contaminante en un lugar determinado. Eligiendo el eje orientado a lo largo de la dirección del viento, la ecuación para determinar la concentración en sitio determinado debido a una fuente de emisión es:

$$C(x, y, z, H) = b + \frac{E}{2\pi u_H \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2} \left[e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2} + e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2} \right]$$

Donde:

$C(x, y, z, H)$ = Concentración del contaminante en la atmósfera en el punto x , y , y z
 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

b = Concentración de fondo del contaminante en la atmósfera, $\mu\text{g}/\text{m}^3$

E = Emisión del contaminante, $\mu\text{g}/\text{s}$

σ_y, σ_z = Coeficientes de dispersión horizontal y vertical, m

H = Altura efectiva de la chimenea, m

u_H = Velocidad del viento a la altura efectiva de la chimenea, m/s

$x, y, y z$ = Coordenadas

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

El modelo gaussiano contempla las siguientes consideraciones, según lo descrito en el libro “Contaminación Atmosférica de Carlos Alberto Echeverri”:

- Las condiciones de la atmósfera no cambian en el tiempo, es decir, la velocidad y la dirección del viento son constantes y la turbulencia se mantiene estacionaria y homogénea.
- Emisiones continuas y constantes desde una fuente puntual simple.
- Las concentraciones viento abajo son directamente proporcionales a la emisión.
- Las concentraciones viento abajo a nivel de piso generalmente son inversamente proporcionales a la velocidad del viento.
- La concentración de contaminantes en la dirección contraria del viento es igual a cero.
- Dado que σ_y y σ_z aumentan con el eje x , la concentración sobre la línea central del penacho disminuye con x . Sin embargo, la concentración a nivel del suelo aumenta hasta un máximo y luego disminuye.
- σ_y y σ_z aumentan con la turbulencia (inestabilidad).
- La concentración máxima a nivel del piso disminuye con el aumento de la altura de la chimenea.
- No es válido para descargas instantáneas o intermitentes de contaminantes procedentes de fuentes puntuales.
- Este modelo pierde validez a largas distancias (superiores a los 50 km).
- No hay remoción de los contaminantes por sedimentación y deposición en el suelo (es decir, hay reflexión total de la pluma en la superficie de la tierra).

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

- No hay remoción de contaminantes por transformación química a otras especies.

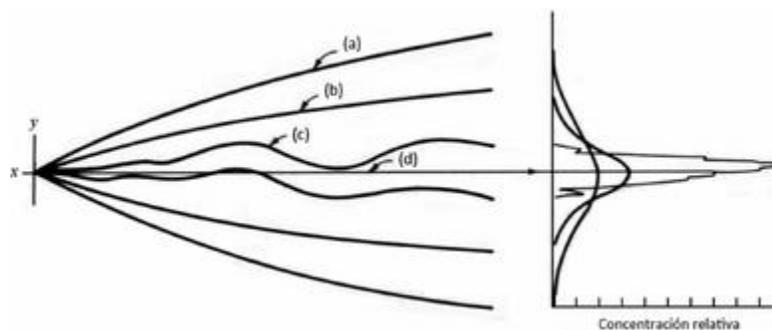
Dos tipos de parámetros afectan la dispersión de contaminantes: los parámetros de la fuente de emisión y los parámetros meteorológicos. La concentración es proporcional a la cantidad de contaminantes liberados. La velocidad del gas saliente y su temperatura elevan la tubería de succión. Los parámetros meteorológicos que afectan la difusión de contaminantes son la velocidad y dirección del viento y la estabilidad atmosférica. La concentración de contaminantes en la atmósfera es inversamente proporcional a la velocidad del viento, principalmente porque la mezcla turbulenta aumenta con la velocidad del viento. (Echeverri Londoño, 2019).

La Figura 5 presenta la dispersión de la pluma o penacho que se desprende de la chimenea. Es una dispersión de tipo gaussiano (distribución estadística normal) en el que las tres curvas están centradas en el mismo eje horizontal, pero la curva con mayor desviación estándar es más baja y se extiende a mayor distancia, es decir, la concentración del contaminante en la atmósfera es menor, presenta una mayor dispersión y se extiende a mayor distancia. Lo anterior está íntimamente relacionado con el tiempo y/o la distancia. A mayor distancia o lo que es lo mismo, cuando ha transcurrido más tiempo, la concentración de los contaminantes en la atmósfera disminuye. (Echeverri Londoño, 2019).

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

Figura 5

Comportamiento de la pluma y concentración con el tiempo.



Nota. Tomado de *Contaminación Atmosférica*, de C. A. Echeverri Londoño, 2019, Ediciones de la U.

La ecuación general del modelo gaussiano descrita anteriormente se puede simplificar asumiendo que todos los receptores están a nivel del suelo, por tanto, se establece de la siguiente manera:

$$C(x, y, 0, H) = b + \frac{E}{\pi u_H \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2}$$

Donde:

$C(x, y, z, H)$ = Concentración del contaminante en la atmósfera en el punto x , y , y z
 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

b = Concentración de fondo del contaminante en la atmósfera, $\mu\text{g}/\text{m}^3$

E = Emisión del contaminante, $\mu\text{g}/\text{s}$

σ_y, σ_z = Coeficientes de dispersión horizontal y vertical, m

H = Altura efectiva de la chimenea, m

u_H = Velocidad del viento a la altura efectiva de la chimenea, m/s

$x, y, y z$ = Coordenadas.

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

Y para el caso en que un receptor este a nivel del suelo y sobre el eje central, se simplifica de la siguiente manera:

$$C(x, 0, 0, H) = b + \frac{E}{\pi u_H \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{H}{\sigma_z} \right)^2}$$

Donde:

$C(x, y, z, H)$ = Concentración del contaminante en la atmósfera en el punto x , y , y z
 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

b = Concentración de fondo del contaminante en la atmósfera, $\mu\text{g}/\text{m}^3$

E = Emisión del contaminante, $\mu\text{g}/\text{s}$

σ_y, σ_z = Coeficientes de dispersión horizontal y vertical, m

H = Altura efectiva de la chimenea, m

u_H = Velocidad del viento a la altura efectiva de la chimenea, m/s

x, y, z = Coordenadas

La altura efectiva de la chimenea H se obtiene añadiendo un término Δh , la elevación de la pluma o penacho, a la altura real de la chimenea h .

$$H = h + \Delta h$$

En la cual:

H = Altura efectiva de la chimenea, m

h = Altura real de la chimenea, m

Δh = Elevación de la pluma, m

Con relación al cálculo de la elevación del penacho o pluma, se analizaron ciertos parámetros de lo que se concluyó que la ecuación indicada es la de Holland, la cual se describe a continuación, teniendo en cuenta que es más exacta para chimeneas altas:

$$\Delta h = \frac{V_S d_S F_e}{u_H} \left[1,5 + 2,68 \times 10^{-2} P d_S \left(\frac{T_S - T_a}{T_S} \right) \right]$$

Donde:

Δh = Altura de la pluma, m

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

V_s = Velocidad del gas en la chimenea, m/s

d_s = Diámetro de la chimenea, m

P = Presión atmosférica, kPa

u_h = Velocidad del viento a la altura efectiva de la chimenea, m/s

T_s = Temperatura de los gases en la chimenea, K

T_a = Temperatura ambiente, K

F_e = Factor de corrección

Nota: el factor de corrección depende de la estabilidad atmosférica.

Tabla 6

Factor de corrección

| | ESTABILIDAD | CONDICION |
|------|-------------|-------------------------|
| 1,2 | A | Muy inestable |
| 1,1 | B | Moderadamente inestable |
| 1,05 | C | Ligeramente inestable |
| 1 | D | Neutra |
| 0,9 | E | Ligeramente estable |
| 0,8 | F | Estable |

Nota. Fuente: Salazar, A. 1985 como se citó en Echeverri Londoño, 2019.

Modelo SCREEN3

Este modelo está netamente basado en ecuaciones Gaussianas. SCREEN3 utiliza un modelo gaussiano de pluma que combina factores meteorológicos y relacionados con la fuente para calcular las concentraciones de contaminantes de fuentes continuas, asumiendo que los contaminantes no reaccionan. Ninguna reacción química u otras eliminaciones (como depósitos húmedos o secos) afectan a la pluma durante el envío desde la fuente (Cabrera Fernández, 2012)

La ecuación principal de este modelo es la siguiente:

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

$$X = \frac{Q}{2\pi u_s \sigma_y \sigma_z} \left\{ e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z_r - h_e}{\sigma_z} \right)^2} + e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z_r + h_e}{\sigma_z} \right)^2} + \sum_{N=1}^k \left[\left[e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z_r - h_e - 2Nz_i}{\sigma_z} \right)^2} \right] + \left[e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z_r + h_e - 2Nz_i}{\sigma_z} \right)^2} \right] \right. \right. \\ \left. \left. + \left[e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z_r - h_e + 2Nz_i}{\sigma_z} \right)^2} \right] + \left[e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z_r + h_e + 2Nz_i}{\sigma_z} \right)^2} \right] \right] \right\}$$

Donde:

X= Concentración (g/m³)

Q= Flujo o tasa de emisión (g/s)

u_s= Velocidad del viento a la altura de la chimenea

σ_y= Parámetro lateral de dispersión

σ_z= Parámetro vertical de dispersión

Z_r= Altura del receptor sobre el suelo

h_e= Altura de la pluma (m)

Z_i= Altura de mezcla (m)

K= Sumatoria límite de la pluma, fuera de la tierra y a inversión elevada, usualmente <=

4.

Para calcular la altura del penacho o pluma, use la fórmula de Briggs. Esta ecuación nos permite calcular el aumento h de la columna de humo al introducir los efectos del impulso, la sustentación y la estabilidad atmosférica.

$$\Delta h = 114 \frac{CF^{\frac{1}{2}}}{u_s}$$

Donde:

C= Parámetro que depende del gradiente de temperatura

u_s= Velocidad del viento a la altura de la chimenea

F= Factor de flotación (m⁴/s³). El cual se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$F = g v_s D^2 \frac{(T_f - T_a)}{4T_a}$$

Donde:

g= aceleración de la gravedad

v_s= Velocidad del gas a la salida de la chimenea

D= diámetro interno de la chimenea

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

T_f = Temperatura de salida del gas, en K

T_a = Temperatura ambiente, en K

Para finalizar, la altura real de la pluma se calcula mediante:

$$h_e = h + \Delta h$$

Donde h es la altura de la chimenea.

Modelo AERMOD

AERMOD dentro de los modelos refinados que propone la EPA, se comporta como un modelo de haz gaussiano estático que simula la difusión de contaminantes en la atmósfera. Para realizar el cálculo, se tiene en cuenta las características del terreno y la presencia de edificios cerca de la fuente. Esto puede afectar la distribución del plumaje y representar un importante paso adelante en comparación con su predecesor. La capa límite convectiva es estable; flotabilidad y altitud de la barrera; aumenta la penetración de las plumas a la inversa; perfil de viento vertical, temperatura, vórtice, gestión de receptores en todo tipo de terreno. El radio de análisis para AERMOD no excede los 50 km del centro de la fuente por lo que se considera una herramienta de análisis a escala local (Goiburo Cordero, 2021).

De acuerdo a EPA-454/R-03-004 del 2005, el sistema AERMOD, cuenta con diferentes preprocesadores: AERSURFACE, AERMINUTE, AERCORE AERPLOT, AERMET y AERMAP que brindan bondades al modelo convirtiéndolo en una versátil herramienta de predicción.

Cimorelli, expone para el cálculo de los coeficientes de difusión lateral y vertical por AERMOD las siguientes ecuaciones:

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

$$\sigma_y = \frac{\left(\frac{\sigma_v x}{u_s}\right)}{\left(1 + \frac{x/u_s}{2T_{Ly}}\right)^p}$$

Donde:

σ_y = coeficiente de dispersión lateral

$p=0,5$

u_s = velocidad del viento

σ_v = velocidad de turbulencia lateral

T_{Ly} =escala integral lagrangiano

x = distancia desde la fuente a favor del tiempo

El coeficiente de dispersión vertical σ_{zS} está compuesto por la contribución del componente elevado (Z_{es}) y del componente cerca de la superficie (Z_{gs}).

$$\sigma_{zS} = \left(1 - \frac{h_{es}}{z_i}\right) \sigma_{zgs} + \left(\frac{h_{es}}{z_i}\right) \sigma_{zes}$$

Donde:

h_s =turbulencia vertical por mezcla mecánica

x = distancia desde la fuente a favor del tiempo

i =escala integral lagrangiano.

σ_{zes} =componente elevado

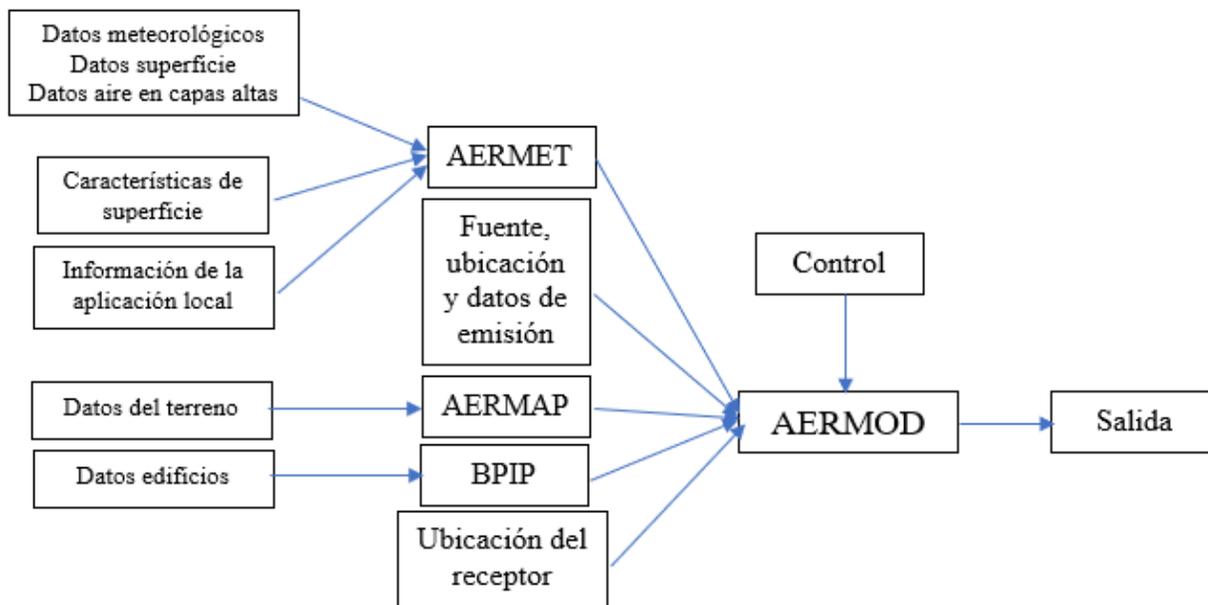
σ_{zgs} = componente cerca de superficie.

El modelo AERMOD cuenta con una serie de módulos preprocesadores que se describen en la Figura 6.

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

Figura 6

Diagrama de bloques del modelo AERMOD y preprocesadores.



Nota. Tomado de *Estudio De Modelos De Dispersión Y Su Aplicación Al Control Industrial*, por G. Villar Lagos, 2017, Universidad de Alcalá Escuela Politécnica Superior.

Modelo de pluma gaussiana quebrada

Este modelo es similar al modelo de pluma gaussiana estacionaria, pero considera las variaciones de la dirección del viento, lo que da origen a una pluma que se quiebra siguiendo estas variaciones. El cálculo lo realiza considerando la pluma dispersada en un intervalo de tiempo como un conjunto de fuentes puntuales de contaminante y que se dispersa con los datos meteorológicos del intervalo de tiempo actual. Entonces para calcular la dispersión para el tiempo n se deben sumar todas las contribuciones de cada uno de los elementos de volumen dx_n , dy_n , dz_n , producidos por la pluma al tiempo $(n-1)$ (Caputo, Gimenez, & Schlamp, 2004).

De acuerdo a Panitz, la concentración integrada en el intervalo de tiempo n resulta:

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

$$C_n(x, y, z, t) = \frac{Q_0}{2\pi\sigma_y\sigma_z u_n} \exp\left(-\frac{\eta_n^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right\} \Delta f_n$$

Donde:

C_n = Concentración de actividad integrada en el n-ésimo intervalo en la posición (x,y,z)
(Ci*s*m⁻³)

Q_0 = Actividad total emitida en el n-ésimo intervalo de tiempo

h = Altura efectiva de emisión

u_n = Velocidad del viento a la altura h

η_n = Distancia desde el centro de la pluma al punto considerado

Δf_n = Función que limita el alcance de la pluma. La cual resulta de realizar la integración

de todos los volúmenes diferenciales que contribuyen a la concentración de contaminante para el siguiente intervalo de tiempo, siendo:

$$\Delta f_n = \frac{F_1(\xi_n) - F_2(\xi_n)}{2}$$

Con

$$F_1(\xi_n) = \text{crf}\left(\frac{u_n \Delta t_n - \xi_n}{\sqrt{2}\sigma_y}\right)$$

$$F_2(\xi_n) = \text{crf}\left(-\frac{\xi_n}{\sqrt{2}\sigma_y}\right)$$

Donde:

Crf = Función error

ξ = Distancia desde la fuente al punto considerado en la dirección del viento

$\Delta t_n = (t_n - t_{n-1})$ intervalo de tiempo de integración

Modelo tipo puff

La principal diferencia entre los modelos de pluma y los de puff es que estos últimos son aplicables a situaciones en las cuales el tiempo de emisión y el de observación es corto comparado con el tiempo necesario para que el contaminante llegue hasta la posición del

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

receptor. Claramente se puede saber qué modelo utilizar para emisiones largas respecto del tiempo de viaje o emisiones de corta duración respecto del mismo tiempo, sin embargo, para cuando los tiempos son comparables es necesario utilizar una combinación de estos dos (pluma y puff). Los modelos de puff también pueden utilizarse en condiciones de vientos leves o calmo.

Asumiendo por un lado que en todas las direcciones la distribución de la concentración de contaminante es gaussiana y por otro lado se considera la conservación de la masa, resulta para la concentración de contaminante el modelo de puff gaussiano. La ecuación que describe esta concentración es: (la cual fue descrita desde el centro del puff) (Caputo, Gimenez, & Schlamp, 2004).

$$C(x, y, z, t) = \frac{Q_{ip}}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

Donde:

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ = Parámetros de dispersión para el puff

Q_{ip} = Emisión para ese intervalo de tiempo

Para calcular los parámetros de dispersión se puede recurrir a la teoría de similitud.

Según Hanna S.R, 1982, para tiempos cortos (algunos segundos desde la emisión) la razón de difusión de un puff ($d\sigma^2/dt$) es:

$$\frac{d\sigma^2}{dt} \propto t(\in \sigma_0)^{2/3} \quad \sigma^2 = \sigma_0^2 + c_1 t^2 (\in \sigma_0)^{2/3}$$

Donde:

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

ϵ = Difusividad turbulenta

t = Tiempo transcurrido desde la emisión

σ_0 = Tamaño inicial del puff

Y para tiempos largos se puede ver que:

$$\frac{d\sigma^2}{dt} \propto t^2 \in \quad \sigma^2 = C_2 \in t^3$$

Para tiempos aún más largos, esto es para tamaños de vórtices mayores que el tamaño del puff tendremos que:

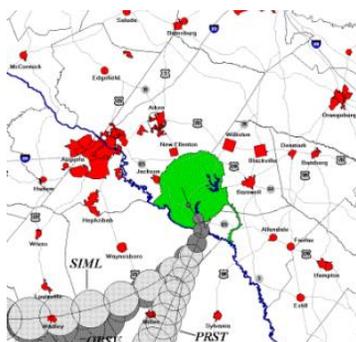
$$\lim_{t \rightarrow \infty} \sigma_{puff}^2 = \sigma_{pluma}^2$$

Modelo PUFF-PLUME

El modelo de dispersión PUFFPLUME es un modelo gaussiano que modela el transporte atmosférico de radionucleidos y productos químicos, incluido el estiércol húmedo y seco, las observaciones meteorológicas en tiempo real y la entrada de las condiciones meteorológicas, se incluyen métodos de entrega de ráfaga o estilo. Este es el modelo básico recomendado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos para la respuesta de emergencia a las emisiones atmosféricas durante la manipulación de material nuclear (Villar Lagos, 2017). Fue creado por el laboratorio “Pacific Northwest National Laboratory (PNNL)” para el año 1970.

Figura 7

Simulación de transporte realizada con el modelo PUFF-PLUME.



MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Nota. Tomada de *Estudio De Modelos De Dispersión Y Su Aplicación Al Control Industrial*, por G. Villar Lagos, 2017, Universidad de Alcalá Escuela Politécnica Superior.

Modelos Eulerianos

El transporte de contaminantes atmosféricos inertes se puede simular convenientemente utilizando un modelo numérico resolviendo la ecuación de dispersión atmosférica y la ecuación de conservación de la masa de contaminantes (método de Euler). Los modelos eulerianos incluyen modelos de pronóstico del tiempo, modelos de caja única, modelos multidimensionales basados en cuadrículas y módulos fotoquímicos. Incluye los supuestos menos restrictivos (González Valladolid, 2003), pero también son los más intensivos en computación. Resuelven un número finito de aproximaciones de varias ecuaciones y dividen el área del modelo horizontal y verticalmente en una gran cantidad de celdas. Estas celdas interactúan entre sí para simular una amplia gama de procesos que afectan los cambios en las concentraciones de contaminantes, como la química, la difusión, la adhesión y la deposición (para partículas) y la deposición (tanto húmeda como seca) (González Valladolid, 2003).

Ecuación de difusión atmosférica:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_j \frac{\partial c}{\partial x_j} = v_c \frac{\partial^2 c}{\partial x_j^2} + S_c$$

Donde:

V_c = Difusividad molecular del componente en el aire
 S_c = Término de la entrada del contaminante desde los focos emisores
 c = Concentración de contaminante en el instante t y la posición x_j ; cuya dispersión está afectada por el flujo u_j .

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

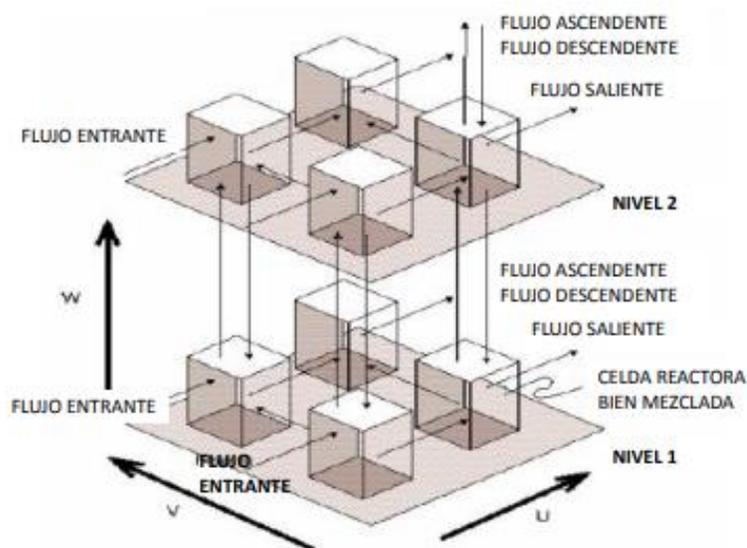
En condiciones turbulentas, la velocidad es una función aleatoria del espacio y el tiempo. Esto generalmente se expresa subdividiendo cada variable en un componente promedio u_j y su variante u'_j . Por tanto, la fórmula para determinar la distribución de cada contaminante es:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\bar{u}_j + u'_j)c_i] = D_i \frac{\partial^2 c_i}{\partial x_j \partial x_j} + R_i(c_1, \dots, c_N) + S_i(\vec{x}, t)$$

Esta ecuación es producto del estudio de la teoría de la perturbación turbulenta, donde $\bar{u}'_j = 0$ (Seinfeld, 2012).

Figura 8

Diagrama de “celdas” de un modelo Euleriano.



Nota. Tomada de *Estudio De Modelos De Dispersión Y Su Aplicación Al Control Industrial*, por G. Villar Lagos, 2017, Universidad de Alcalá Escuela Politécnica Superior.

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

Modelo CMAQ

CMAQ (Community Multiscale Air Quality) es un modelo de dispersión euleriano desarrollado como un proyecto de código abierto por la División de Modelado de Ciencias Atmosféricas de los EE. UU. Agencia de Protección Ambiental e incluye una serie de programas para modelar simulaciones de calidad del aire; probablemente sean los más adecuados para simular el entorno de una ciudad o región y obtener concentraciones de contaminantes primarios y secundarios reactivos y no reactivos. Como se mencionó anteriormente, CMAQ es un modelo euleriano en tres dimensiones. Esto significa que puede simular la química atmosférica y el transporte a lo largo de tres ejes y modelar y simular entre ozono, polvo (partículas PM) y otros contaminantes atmosféricos tóxicos, visibilidad y contaminantes ácidos. Contaminantes que afectan a los nutrientes troposféricos. Diseñado como una "atmósfera", el modelo CMAQ se puede utilizar para simular escenarios complejos de calidad del aire, desde la escala local hasta la cobertura hemisférica completa (Villar Lagos, 2017).

Modelo CAMx

CAMx es un modelo fotoquímico tridimensional euleriano de dispersión de contaminantes, y sus funciones principales son las siguientes (Refinería de PETRONOR).

- Posibilidad de utilizar mallas anidadas tanto en horizontal como en vertical.
- Función que permite elegir entre diferentes mecanismos fotoquímicos y de fase gaseosa: Cuatro versiones de mecanismos de enlace carbono-carbono IV (CBIV). Mecanismo SAPRC99.
- Un sistema coherente de conservación de ecuaciones de masa y transporte.

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

- Sistema de proyección cartográfica (geografía, UTM, Lambert, Kyokushin Rengo).
- Resuelve varias ecuaciones de continuidad.
- Resolución individual para cada proceso (convección, difusión, etc.) dentro de cada celda de la cuadrícula y en cada intervalo de tiempo.
- Hay dos formas de depósito de contaminantes, húmedo y seco.

Modelo WRF-CHEM

WRF-CHEM es un modelo de tipo euleriano. El modelo euleriano tiene en cuenta los procesos de transporte, las emisiones, la dispersión, las fluctuaciones atmosféricas y la eliminación de contaminantes. Además, proporcionan resultados altamente descompuestos espacial y temporalmente con respecto a la calidad del aire en el contexto de la investigación 3D. Estos modelos se pueden utilizar para interpretar eventos pasados, evaluar el impacto potencial de varias estrategias de reducción de emisiones y predecir la calidad del aire (Astudillo Romero, 2012).

WRF-CHEM, se determina mediante dos componentes:

- Componente meteorológica:

Los componentes meteorológicos dinámicos basados en núcleos son computacionalmente eficientes y adecuados para simular fenómenos característicos desde metros hasta miles de kilómetros. Este modelo ofrece diferentes opciones para registrar parámetros físicos que representan procesos importantes como la interacción suelo-atmósfera, radiación solar, física de nubes y precipitación. El modelo numérico se inicializa y se refuerza mediante el límite de datos meteorológicos del modelo de pronóstico global. (Global

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

Forecast Models, GFM) de baja resolución que se obtienen de forma gratuita.

(NOAA,2011).

- **Componente química:**

La composición química del modelo está claramente relacionada con el transporte y la respuesta de la especie, no solo con el aerosol. La química está integrada en el modelo meteorológico y su procesamiento digital corresponde a las variables meteorológicas (Astudillo Romero, 2012).

Los componentes de la calidad del aire del modelo son compatibles con los componentes meteorológicos que utilizan el mismo sistema de transporte (conservación de masa y escalares). Es decir, los datos meteorológicos y químicos siguen siendo los mismos. Mantienen estos valores en el modelo y se utilizan también. La misma cuadrícula (componentes horizontales y verticales), el mismo patrón de transporte físico y las mismas fases de tiempo eliminan la necesidad de interpolación en el tiempo. (NOAA, 2011).

Modelo de Caja

El modelo de caja es un modelo de mezcla homogénea, es decir, en el cual se asume que los contaminantes se mezclan totalmente dentro de ciertas parcelas de aire limitadas verticalmente que viajan con la velocidad del viento general. El modelo de caja, que se usa para estimaciones de carácter general, utiliza una fórmula sencilla para valorar la concentración de contaminantes en un volumen de control con límites muy definidos (Bedoya, J. Meteorología para dispersión atmosférica. En: Revista Ainsa. No 19, Año X. Medellín, diciembre de 1990 como se citó en “Contaminación Atmosférica, 2019”):

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

$$C_i = b + \frac{eL}{uH}$$

Donde:

C_i = Concentración del contaminante en la atmósfera, $\mu\text{g}/\text{m}^3$

b = Concentración de fondo del contaminante en la atmósfera, $\mu\text{g}/\text{m}^3$

e = Emisiones por unidad de área, $\mu\text{g}/\text{s}\cdot\text{m}^2$

L = Largo de la ciudad, m

H = Altura de mezcla, m

u = Velocidad del viento, m/s

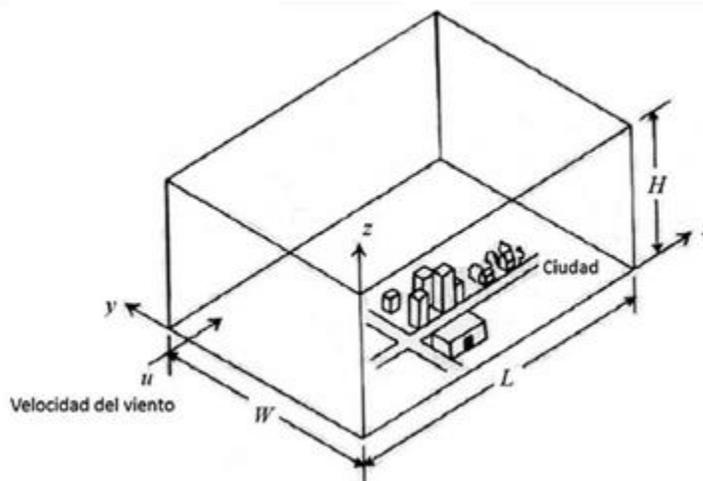
El modelo de caja contempla las siguientes consideraciones, según lo establecido en el libro Contaminación Atmosférica de Carlos Alberto Echeverri:

- La ciudad es un rectángulo de dimensiones W y L , uno de los cuales es paralelo a la dirección del viento.
- Los gases de escape se generan desde la superficie y se mezclan en la caja con una concentración uniforme.
- La turbulencia atmosférica produce una mezcla completa de contaminantes con una altitud de mezcla H , que no se mezcla por encima de esa altitud.
- Este vórtice es tan fuerte que las concentraciones de contaminantes son uniformes en todo el espacio aéreo sobre la ciudad, pero no en las tierras altas.
- La velocidad del viento es constante e independiente del tiempo, la ubicación o la altitud.
- No entran ni salen contaminantes por la parte superior o los lados de la caja.
- El contaminante en asunto tiene una vida media en la atmósfera suficiente para atravesar la ciudad a la velocidad del viento de interés.

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

Figura 9

Aplicación del modelo de caja.



Nota. Tomado de *Contaminación Atmosférica*, de C. A. Echeverri Londoño, 2019, Ediciones de la U.

Modelos lagrangianos

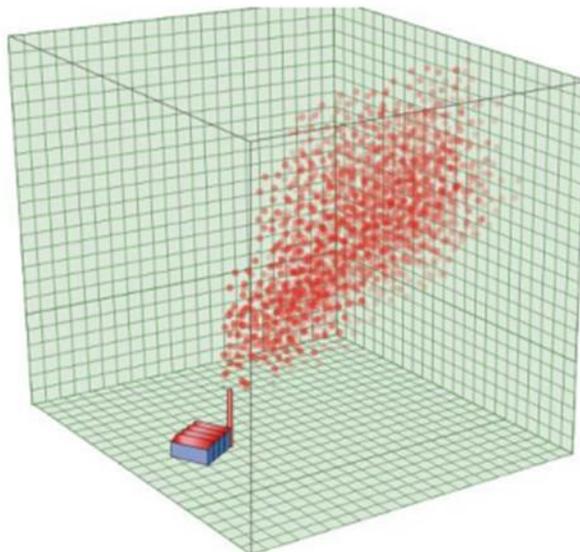
La metodología de los modelos lagrangianos radica en analizar el comportamiento de las partículas dentro de un flujo y así simular la turbulencia dentro de este flujo (González Barrás, 2002).

El modelo de dispersión lagrangiano sigue matemáticamente la contaminación del haz o penacho en matrices o "partículas" y cómo las matrices o partículas se mueven a través de la atmósfera, modelando el movimiento de las partículas como un movimiento orbital aleatorio (Villar Lagos, 2017).

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

Figura 10

Diagrama de partículas de un modelo de dispersión lagrangiano en 3D.



Nota. Tomada de *Estudios de modelos de dispersión y su aplicación al control industrial* (p. 49), por G. Villar, 2017, Universidad de Alcalá Escuela Politécnica Superior.

En la aproximación lagrangiana (Seinfeld, 2012 como se citó en Hernández et al, 2015) el estudio se centra en el comportamiento de partículas contaminadas típicas o elementos individuales. Teniendo en cuenta los factores de contaminación, el sistema se vuelve turbulento en la posición x 'y en el tiempo t '. El movimiento es descrito por la órbita $X(x', t', t)$ determinada por su origen x' 'y su posición final $X(x', t', t)$ en el tiempo t .

$$\iiint_{-\infty}^{\infty} \Psi(x, t) dx = 1$$

Donde $\Psi(x, t)$ es la función de densidad de probabilidad

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

Por otro lado, la probabilidad de que un contaminante esté en la posición x en el momento t se puede expresar como el producto de dos densidades de probabilidad, densidades de probabilidad de transición $Q(x, t|x', t')$ además, para todas las posiciones iniciales, las densidades de probabilidad de los contaminantes detectados en x en el tiempo t son:

$$\Psi(x, t) = \iiint_{-\infty}^{\infty} Q(x, t|x', t') \Psi(x', t') dx$$

Para algunos contaminantes (n), la suma de todas las densidades de probabilidad de todos los elementos de la misma especie representa la concentración promedio:

$$\langle c(x, t) \rangle \geq \sum_{i=1}^n \Psi_i(x, t)$$

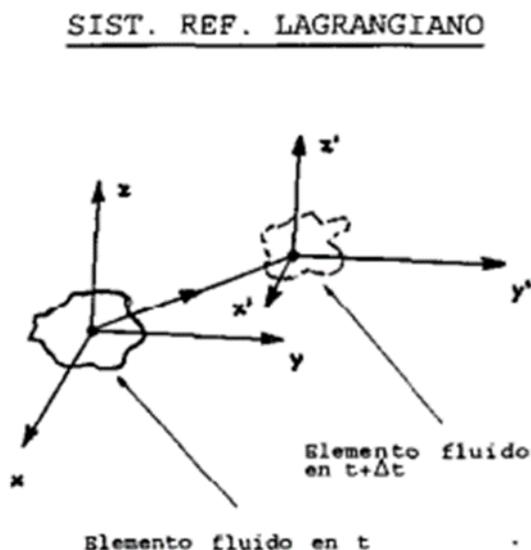
Además, es necesario considerar tanto la distribución inicial de contaminantes como la contribución de la fuente $S(x, t)$, por lo que la ecuación lagrangiana generalizada para la concentración promedio es:

$$\langle c(x, t) \rangle \geq \iiint_{-\infty}^{\infty} Q(x, t|x_0, t_0) \langle c(x_0, t_0) \rangle dx_0 + \iiint_{-\infty}^{\infty} \int_{t_0}^t Q(x, t|x', t') S(x', t') dt' dx'$$

Figura 11

Sistema de referencia lagrangiano.

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS



Nota. Tomada de *Modelo lagrangiano de difusión de partículas por el método de Monte-Carlo*, por R. González, 2002, Universidad Complutense de Madrid.

A continuación, se encuentran algunos de los principales modelos de dispersión atmosféricos de tipo lagrangiano establecidos en la EPA (Environmental Protection Agency) americana.

FLEXPART (Flexible Particle Dispersion Model)

El modelo de dispersión FLEXPART es un modelo de dispersión de Lagrange para calcular la dispersión de partículas en distancias medias y largas. Este es un buen modelo para calcular la dispersión de contaminantes después de una explosión en una central nuclear, por ejemplo. El modelo FLEXPART se ha convertido en una herramienta muy conveniente y popular para modelar y analizar el transporte de contaminantes. Esta evolución lo ha hecho disponible para su uso en muchos análisis de la calidad del aire, donde el transporte juega un

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

papel importante (por ejemplo, el flujo de intercambio entre la estratosfera y la troposfera, o el ciclo global del agua) (Villar Lagos, 2017).

“Es un modelo de dispersión de partículas lagrangiano que simula el transporte a distintas escalas, así como la difusión, la deposición seca y húmeda y el decaimiento radiactivo de especies que pueden ser emitidas desde fuentes puntuales, lineales o de volumen” (Vaz de Jesús et al, 2008).

En este modelo de dispersión las fuentes desprenden un hilo de partículas que son transportadas y se dispersan en la atmosfera, estas partículas cuentan con una masa y se mueven en el viento por efectos meteorológicos y de turbulencia atmosférica (Vaz de Jesús et al, 2008).

$$e - p = m * \frac{dq}{dt}$$

La ecuación anterior permite calcular el aumento de evaporación (e) y el decrecimiento de la precipitación (p), como el cambio de humedad en el tiempo $\frac{dq}{dt}$ multiplicado por la masa (m) de cada partícula.

NAME

El modelo NAME (dispersión atmosférica digital) es un modelo lagrangiano que utiliza una atmósfera modelada para calcular la dispersión de partículas. Las partículas en movimiento se derivan de la meteorología, que puede cambiar con el espacio-tiempo. El movimiento de las partículas contiene componentes aleatorios para simular la turbulencia atmosférica. Por lo tanto, no es necesario hacer suposiciones sobre la forma de la concentración de contaminantes requerida por el modelo de haz de Gauss. El modelo de varianza NAME, desarrollado por Met Office después del accidente de Chernobyl, mostró la necesidad de un método que pudiera usarse

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

para predecir la varianza y la deposición. Eventos extensos de dispersión atmosférica, incluidos accidentes nucleares, erupciones volcánicas, accidentes químicos, fuegos artificiales, enfermedades infecciosas, animales aéreos y procedimientos tradicionales de predicción de la calidad del aire. En modo inverso, NAME se utiliza para estudiar las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos (Villar Lagos, 2017).

CALPUFF

Se trata de un modelo de Lagrange de nubes aisladas, que simula por medio del programa CALMET los efectos de las condiciones meteorológicas debido a variaciones temporales y espaciales sobre el transporte, transformación y eliminación de nubes contaminantes. Se puede aplicar en una escala de decenas a cientos de kilómetros y contiene algoritmos para gestionar pequeños procesos y grandes efectos. CALPUFF es un modelo de dispersión transitoria multicapa en modo antorcha que simula los impactos en el tiempo y el espacio, teniendo en cuenta las variaciones de las condiciones climáticas sobre el transporte de contaminantes y reduciendo los contaminantes por sedimentación húmeda y seca que podemos realizar, similar a la transformación de contaminantes por reacción química (Villar Lagos, 2017).

Según Arregoces et al. (2018) las concentraciones en receptores (CR) se determinan a partir de la siguiente ecuación:

$$CR = \frac{Q}{2t - t1} \frac{Fy(tR)Fz(tR)}{4\pi u * \sigma z * ze * \sigma y * ye} * \left\{ erf * \left[\frac{t2 - tR}{\sqrt{2} * \sigma y * \frac{ye}{u}} \right] - erf * \left[\frac{t1 - tR}{\sqrt{2} * \sigma y * \frac{ye}{u}} \right] \right\}$$

Donde:

Q = es la masa total del material en la bocanada

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

$Fy(tR)$ y $Fz(tR)$ = son las funciones de las distribuciones vertical y horizontal de la pluma en función de tiempo de viaje desde la fuente hasta el receptor

u = es la velocidad media en (m/s) de la elevación del centro de la pluma

$\sigma z * ze * \sigma y * ye$ = son los parámetros de dispersión efectiva (m)

HYSPLIT

El modelo HYbrid Single Particle Lagrangian Integrated Trayectoria (HYSPLIT) es un sistema integral para calcular trayectorias de distribución complejas y simular sedimentos (liberados). Calcula el empuje o la resistencia de algunas partículas contaminadas u órbitas simples sin utilizar módulos adicionales. La dispersión del contaminante se calcula asumiendo un modelo de emisión discontinua de explosivos (burbuja) o un modelo de emisión continua de partículas. El modelo de emisión de haz discontinuo (puff) expande la ráfaga más allá de las dimensiones de la celda meteorológica (horizontal o vertical) y la divide en múltiples haces que contienen la masa del contaminante. En el modelo de emisión de partículas, algunas partículas son arrastradas y dispersadas por el componente caótico. De forma predeterminada, el modelo asume un formato de distribución de partículas tridimensional (horizontal y vertical) (Villar Lagos, 2017).

“HYSPLIT es un modelo de solución lagrangiana, que se centra en el comportamiento de partículas o elementos discretos de contaminantes representativos en las diferentes especies en la atmósfera, considerando a través de funciones, un régimen turbulento en una posición, un tiempo, una trayectoria y una posición final” (Hernández Garcés et al, 2015).

Urbina et al. (2016) afirma que “HYSPLIT utiliza cálculos de trayectorias en ecuaciones de dinámica de fluidos, para predecir la posición en X, Y y Z de una partícula llevada por el viento, o sea es un SIG, con la capacidad de predecir la trayectoria de una partícula”

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

RIMPUFF

Es un modelo de dispersión de emisiones de explosivos o ráfagas discontinuos distribuido localmente desarrollado por el Laboratorio Nacional Danés Riso. Este modelo proporciona una simulación detallada en tiempo real de la dispersión atmosférica que tiene en cuenta las fluctuaciones del viento, los remolinos y la dispersión. Es un modelo de dispersión de emisión discontinua de tipo ráfaga (puff) adecuado para simular la dispersión de haces y fuentes de haces en el tiempo y el espacio utilizando diversas meteorologías. Optimizado para ejecutar computadoras personales similares a PC, este modelo incorpora capacidades de división de ráfagas (puff) para manejar la dicotomía de la pluma y la divergencia del flujo debido al flujo, el flujo inclinado y las influencias de la isla. El modelo RIMPUFF incluye pasos para calcular rápidamente las dosis de rayos gamma de radioisótopos y detritos en el aire liberados a la atmósfera desde plantas de energía nuclear. En RIMPUFF, la propagación del haz o ráfaga se controla mediante el grado de ruido local que resulta de las mediciones in situ o se proporciona mediante cálculos realizados por el preprocesador. El modelo viene con fórmulas adicionales para la altura del haz, la inversión y reflectancia del suelo, el algoritmo de cuantificación gamma y la reducción en húmedo y en seco (Villar Lagos, 2017).

LILLPELLO

LILLPELLO es un modelo de Lagrange desarrollado por el Ministerio de Defensa sueco, que simula la dispersión de gases en la atmósfera, inicialmente formada solo por gas ligero y luego por gas de alta densidad. Las ecuaciones de energía, momento (vertical y horizontal) y masa se incluyen en el modelo para incorporar simulaciones de gas de alta densidad. El modelo se compara con datos experimentales sobre pérdidas de amoníaco (NH₃) (Villar Lagos, 2017).

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

STILT

STILT es un modelo lagrangiano de difusión aleatoria de partículas orientadas al receptor basado en el código modelo HYSPLIT del Laboratorio de Recursos del Aire (ARL) de la NOAA. Este modelo simula el efecto corriente arriba sobre la posición del receptor siguiendo la evolución de una serie de partículas (que representan masas iguales de partículas de aire) realizadas por convección y distorsión. La información sobre esta partícula se obtiene de una simulación meteorológica (Lin et al., 2003 como se citó en Guerrero Molina, 2013).

Este modelo funciona sin conexión y está dictado por campos meteorológicos generados por otros modelos que integran digitalmente ecuaciones de dinámica atmosférica. Esta propiedad conduce a un bajo costo computacional y flexibilidad en el uso de diferentes campos meteorológicos y la capacidad de construir diferentes conjuntos de modelos para evaluar errores de simulación (Lin et al., 2007 como se citó en Guerrero, 2013). Tener múltiples modelos es muy beneficioso porque acercarse a una serie de modelos es una forma prometedora de reducir la incertidumbre en tránsito al modelar la varianza (Guerrero Molina, 2013).

Aplicación de los Modelos de Dispersión Atmosférica

A nivel nacional e internacional es bastante representativa el manejo de los modelos de dispersión en diferentes proyectos, como análisis en la concentración de cualquiera de los gases contaminantes criterio presentes en el viento, obteniendo resultados fundamentales con la finalidad de contrarrestar la contaminación del medio ambiente. A continuación, se describen algunos proyectos en los que se han aplicado los modelos de dispersión mencionados anteriormente:

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

- En el proyecto de investigación “Implementación de un modelo de análisis de dispersión atmosférica de material particulado (PM10) a través de la herramienta AERMOD VIEW en el municipio de Yumbo (Valle del Cauca)” como bien lo dice su título se aplicó el modelo tipo gaussiano AERMOD en el municipio de Yumbo en el año 2020, para saber la concentración de las partículas en suspensión (PM10) y las fuentes generadoras del mismo. Los resultados del modelo muestran que la mayor contribución de PM10 en el sector industrial es la extracción, procesamiento y venta de materiales de construcción (canteras), así como esta actividad no respeta el nivel máximo permisible de concentración por un período de tiempo/hora. En concentraciones superiores a $200 \mu\text{g} / \text{m}^3$ en 24 horas. De lo que se concluye que el modelo fue exitoso.
- Tesis de grado “Modelado y simulación de la dispersión de contaminantes en la Pluma de una chimenea por el método de dispersión Gaussiano” desarrollada en Trujillo/Perú para el año 2016. Se desarrolló un modelo de dispersión Gaussiano para determinar la posible concentración de contaminantes en una pluma de una chimenea con la implementación programación como Visual Basic, MatLab y Excel, obteniendo un resultado que fue comparado con el modelo SCREEN3 de la EPA donde se logró una desviación del 3%, considerándose adecuado para ser utilizado.
- Proyecto “Aplicación De Un Modelo De Dispersión Atmosférica” definido en la Pontificia Universidad Católica De Valparaíso para el año 2012, en el cual se utilizó un modelo tipo Gaussiano llamado SCREEN3, para modelar frente a escenarios ficticios con la finalidad de demostrar la versatilidad del modelo,

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

haciendo las pertinentes comparaciones en el resultado de la concentración al cambiar ciertos datos de entrada. Efectuado para dar sugerencias a los problemas en las revisiones sistemáticas de estudios de impacto ambiental y proposiciones de medidas para mejorarlos.

- Proyecto de Tesis “Utilización de modelos de dispersión atmosférica para la estimación de dosis de exposición” establecido en la Universidad de Trujillo en Perú, para el año 2012. Este trabajo implementa para el cálculo de dosis el modelo Gaussiano de dispersión de contaminantes, además, proponen un algoritmo de cálculo que permite evaluar la dosis de exposición para fuentes instantáneas para lo cual también se elabora un programa de cálculo en el entorno Matlab. De lo que concluyen que los dos modelos son una herramienta útil.
- El modelo WRF/Chem fue utilizado por Misenis en (2010) para inspeccionar la sensibilidad de las predicciones de calidad del aire para dos esquemas de capa límite planetaria y tres modelos de la superficie terrestre. (UCE Ciencia. Revista de postgrado. Vol. 3(2), 2015).
- Cohan y otros (2010) aplicaron una práctica de análisis de sensibilidad de orden mayor para calcular el grado en que la incertidumbre de la velocidad de reacción influye en las estimaciones de las concentraciones de ozono y su sensibilidad a las emisiones de precursores, durante un episodio de contaminación del aire en Houston, Texas, utilizando el modelo CAMx. (UCE Ciencia. Revista de postgrado. Vol. 3(2), 2015).
- De los modelos eulerianos el más usado es el CMAQ. Kim y otros (2010) llevaron a cabo una serie de análisis de sensibilidad con cinco esquemas de capa

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

límites diferentes, asociados con tres modelos diferentes de superficie terrestre para examinar el impacto de las variables meteorológicas en las concentraciones de ozono predichas usando CMAQ con perspectiva local. Por su parte, Chemel y otros (2010) llevaron a cabo una evaluación integral del modelo CMAQ, como parte de la estimación de la contaminación en el Reino Unido. El rendimiento del modelo fue evaluado para los valores límites normativos de los contaminantes y de las especies que contribuyen a la deposición ácida y nitrogenácea con medidas de las redes nacionales de vigilancia. Mientras que Borge y otros (2010) investigaron la influencia de las condiciones químicas de contorno sobre la respuesta del modelo CMAQ sobre la Península Ibérica. (UCE Ciencia. Revista de postgrado. Vol. 3(2), 2015).

- En Castro (2015) estudio de la tendencia de los contaminantes criterio en algunas ciudades de la zona del Bajío mediante el modelo numérico HYSPLIT, se realizó un análisis de dispersión de los contaminantes criterio emitidos a la atmosfera en las ciudades de Salamanca y Querétaro, allí se buscó obtener la concentración de los contaminantes y la interacción de dicha contaminación entre ambas ciudades. Para tal fin se necesitó información sobre de latitud y altitud de las zonas de estudio, además de datos meteorológicos con los que se logró evaluar la trayectoria del viento, información necesaria para la aplicación del modelo HYSPLIT pues permite determinar el movimiento de las masas. Debido a los resultados que se obtuvieron en el presente análisis se estableció que el modelo HYSPLIT es óptimo para el cálculo del patrón de dispersión de los contaminantes criterio en cuestión y que estos no se desplazan conjuntamente ya que cada pluma

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

sigue una trayectoria diferente por las direcciones del viento presentadas en cada ciudad.

- Gómez et al. (2011) aplicó el modelo HYSPLIT en estudios de contaminación atmosférica en la estación regional La Palma en Cuba para determinar la trayectoria de masas de aire que estaban provocando precipitaciones con un PH bajo, allí se realizó el estudio a 11 muestras de precipitación que arrojaron características que las clasificaron como lluvia ácida y por ese motivo que se inició con el análisis de la razón que estaba provocando este evento, en efecto, se determinó que existían contaminantes presentes en el aire y se concluyó que la correcta aplicación del modelo concede determinar la trayectoria de los contaminantes atmosféricos y el origen de la emisión.
- Según Arregoces et al. (2018) en su evaluación del modelo CALPUFF para la estimación de las concentraciones de PM₁₀ de una cantera en una región montañosa ubicada al norte de Colombia, el modelo permitió satisfactoriamente la simulación de la dispersión de las partículas PM₁₀ en la zona de estudio a pesar de los terrenos tan complejos encontrados allí y arrojó valores muy asertivos, dado que, se contó con datos meteorológicos de una estación cercana a la fuente de emisión, lo que permite que el grado de incertidumbre sea menor.
- En su tesis de maestría Ruiz (2013) realizó la modelación de la dispersión por medio del modelo CALPUFF de las emisiones de SO₂ y NO₂ de las termoeléctricas en el distrito metropolitano de la ciudad de Quito para estimar el impacto a la atmósfera generado por ellas, con el presente modelo se logró determinar la concentración de estos contaminantes correctamente, ya que los

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

resultados fueron similares a los que arroja los monitores presentes en la ciudad en ese entonces, además de encontrar una presencia de partículas PM2.5 bastante alta en la atmosfera emitidas no solamente por las termoeléctricas sino también por fuentes móviles en la ciudad.

- Vaz de Jesús (2008), nos habla sobre cómo se implementó el modelo de dispersión atmosférica FLEXPART en la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), esta aplicación se debió a la emisión de material radioactivo a la atmosfera y a que el modelo FLEXPART sirve mucho de apoyo en emergencias ambientales a gran escala, además, por ser un modelo lagrangiano no mezcla el chorro de partículas emitidas por una fuente fija en toda la celda mientras que el modelo euleriano con el que ya contaban MOCAGE si lo hacía.

Conclusiones

A través de la investigación e indagación en diferentes fuentes bibliográficas se logró materializar los objetivos propuestos en el trabajo, se dio a conocer la información concerniente a la legislación actual en el país (Colombia), estableciendo que si hay leyes que velan por el buen trato al medio ambiente, que previenen y controlan los contaminantes más nocivos, con la finalidad de cuidar la salud de la población, animales y fauna. Además, de recopilar información acerca de los modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos más efectivos y comunes en el mercado, para que las personas que no conozcan sobre ellos mediante el presente documento

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

estén al tanto de cómo funcionan y que de verdad son de gran ayuda a la hora de actuar en contra de la contaminación atmosférica, sustentado mediante las aplicaciones ya mencionadas en diferentes partes del mundo, puesto que este tipo de contaminación es una de las causantes de mayor influencia en la tasa de mortalidad en varios países, y saber que lamentable el ser humano con las nuevas industrias es una de las fuentes principales de emisiones de estos gases tóxicos, es decir, el mismo humano se está matando. Por tal razón, es importante informarse de cuáles son esos agentes nocivos que causan tal afectación y de donde provienen, lo que se puede lograr con la correcta aplicación de estos modelos de dispersión, ya que a través de los resultados arrojados se puede incentivar a las personas a encontrar y construir nuevas tecnologías que sean amigables con el medio ambiente, a incluir nuevos hábitos y actividades de conciencia forjados desde casa.

La elección de cualquiera de los modelos de dispersión depende del tiempo solicitado, el ambiente de dominio y la naturaleza de la fuente, en estos se incluyen los datos de entrada disponibles en el sector de estudio, desde datos de la fuente, datos meteorológicos y datos topográficos, identificando de esta manera el modelo que mejor se adapta a la situación y brindar resultados exitosos.

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

Referencias

- Alcaide Lopez, M. T. (2000). *Efectos Ambientales del trafico urbano: La evaluacion de la contaminación atmosferica en Madrid* [Tesis]. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes.
- Arregoces, H., Mendoza, Y. y Rojano, R. (2018). *Evaluación del CALPUFF para Estimar Concentraciones Ambientales de PM10 de una Cantera en Terrenos Complejos*. Información tecnológica Vol. 29 N° 5
- Astudillo Romero, M. (2012). *Modelación de dispersión espacial de contaminantes del aire en la ciudad de Cuenca*. Universidad San Francisco de Quito.
- Bustos Salas, C. (2004). *Aplicacion de Modelos de Dispersion Atmosferica en la evaluación de impacto ambiental: analisis del proceso*. Universidad de Chile.
- Cabrera Fernández, J. A. (2012). *Aplicación de un modelo de dispersión atmosférica de Valparaíso*. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Cantalapiedra, P. A. (2001). *Efectos de la contaminación atmosférica en las esculturas de bronce: estudio de la pátina*. Universidad Complutense de Madrid.
- Caputo, M., Gimenez, M., & Schlamp, M. (2004). *Dispersión de contaminantes en la atmosfera: Analisis de modelos*. Mecánica Computacional Vol. XXIII, 1727-1741.
- Castro, E. (2015). *Estudio de la tendencia de los contaminantes criterio en algunas ciudades de la zona del Bajío mediante el modelo numérico HYSPLIT*. Universidad Autónoma de Querétaro.

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

CeMCAQ. (2017). *Centro de Monitoreo de la Calidad del Aire del Estado de Querétaro*.

Obtenido de <http://www.cemcaq.mx>

Echeverri Londoño, C.A. *Contaminación atmosférica*. Bogotá: Ediciones de la U, 2019

EPA. (2021). *Agencia de Protección Ambiental en Estados Unidos*. Obtenido de EPA.gov

Espinoza, G. (2001). *Fundamentos de Evaluación de Impacto Ambiental*. Banco interamericano de desarrollo y centro de estudios para el desarrollo.

Goiburo Cordero, D. M. (2021). *Aplicaciones del modelo gaussiano de dispersión atmosférica AERMOD*. Revista Cubana de Ingeniería Vol. XII.

Gómez Zamora, Y. y Cuesta Santos, O. (2011). *Aplicación del Modelo HYSPLIT en estudios de contaminación atmosférica en la estación regional La Palma*. Estudios de Caso. Revista Cubana de Meteorología.

González Barrás, R. M. (2002). *Modelo lagrangiano de difusión de partículas por el método Monte Carlo*. Universidad Complutense de Madrid.

González Valladolid, E. (2003). *Modelación de transporte y dispersión de partículas PM2.5 y PM10 utilizando un modelo euleriano a nivel meso escala en la región de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*. Universidad Autónoma Metropolitana.

Guerrero Molina, O. J. (2013). *Desarrollo de una metodología para evaluar la cobertura espacial de la Red de Monitoreo de la calidad del aire de Bogotá* [Tesis]. Universidad Nacional de Colombia.

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

Hernández Garcés, A., Jauregui Haza, U., Souto González, J., Caseres Long, J. J., & Saavedra

Rodriguez, S., Guzmán Martínez, F. y Torres Valle, A. (2015). *Estado actual de los modelos de dispersion atmosférica y sus aplicaciones*. Revista de postgrado UCE Ciencia.

Marín Ocampo, M. y Otalvora Martínez, A. (2020). *Implementación de un modelo de análisis de dispersión atmosférica de material particulado (PM10) a través de la herramienta AERMOD VIEW en el municipio de Yumbo (Valle del Cauca)*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD).

Mendoza Huertas, M. A. (2012). *Utilizacion de modelos de dispersión atmosferica para la estimación de dosis de exposición*. Universidad Nacional de Trujillo.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Guía para la elaboración de inventarios de emisiones atmosféricas*.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (26 de Julio de 2017). Resolución 1519 de 2017. *Por la cual se adoptan los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental (EIA), requerido para el trámite de la licencia ambiental de los proyectos de construcción y operación de centrales generadoras de energía hidroeléctrica y se toman otras determinaciones*. Núm. 50308.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (20 de Mayo de 2020). Resolución 448 de 2020. *Por la cual se establecen los Términos de Referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental (EIA), requerido para el trámite de la licencia ambiental temporal para la formalización minera y, se toman otras determinaciones*. Núm. 51321.

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

Ministerio De Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial. (octubre, 2010). *Protocolo Para El Control Y Vigilancia De La Contaminación Atmosférica Generada Por Fuentes Fijas.*

Versión 2.0.

Perdiz Dávila, J. M. (2016). *Modelado y simulacion de la dispersión de contaminantes en la pluma de una chimenea por el metodo de dispersión Gaussiano.* Universidad Nacional de Trujillo.

Petracca, M. E. (2017). *Fundamentos y cuantificación economica de la evaluacion de impacto ambiental.* Universidad Complutense de Madrid.

Refineria de PETRONOR. (s.f.). *Estudio De Impacto Ambiental Del Proyecto De Nuevas Unidades Para Reducir La Producción De Fuel-Oil. Anexo IX-B.* Estudio De Dispersión Fotoquímico.

Reynoso, J. A., Grutter, M., & Juárez, D. C. (2007). *Evaluacion del riesgo por contaminantes criterio y formaldehído en la ciudad de Mexico.* Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 170-174.

Ruiz Reinoso, S. (2013). *Modelación de la dispersión de las emisiones SO2 y NO2 de las termoeléctricas de la ciudad de Quito en el software CALPUFF.* Escuela Politécnica nacional.

Salud Geoambiental. (2017). *Instituto para la Salud Geoambiental.* Obtenido de <https://www.saludgeoambiental.org/>

Sánchez, L. (2011). *Evaluación de impacto ambiental.* Universidad de Sao Paulo.

MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

- Sarmiento, I. D., & Paez, L. M. (2019). *Analisis multitemporal del comportamiento de contaminantes criterio del aire en el dia sin carro en el periodo 2002-2015 de la ciudad de Bogota, D.C.* Universidad Santo Tomas.
- Ulriksen, P. (2005). *Modelos de Dispersion de Contaminantes.* Universidad de Chile.
- Urbina, J., Monterroso, L., & Gandini, M. (2016). *Analisis de la dispersión de un patógeno de cultivos mediante la modelación del movimiento atmosférico en un SIG. Royas de la Soja.*
- Vaz de Jesús, V., Allué Camacho, M., & Martinez Marco, I. (2008). *Implementación del modelo de dispersion atmosférica FLEXPART en AEMET.* Agencia estatal de meteorología.
- Villar Lagos, G. (2017). *Estudio De Modelos De Dispersión Y Su Aplicación Al Control Industrial.* Universidad de Alcalá, Escuela Politécnica Superior.