

**ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL DEBIDO A LAS EMISIONES
ATMOSFÉRICAS DE LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS CONCENTRADOS
PARA ANIMALES EN LA ZONA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA**

MAURICIO GALVÁN GÓMEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2012**

**ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL DEBIDO A LAS EMISIONES
ATMOSFÉRICAS DE LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS CONCENTRADOS
PARA ANIMALES EN LA ZONA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA**

MAURICIO GALVÁN GÓMEZ

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de ingeniero
químico**

**Director
PhD. Debora Alcida Nabarlatz**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2012**

DEDICATORIA

Este gran logro se lo dedico especialmente a mis padres, mi madre Maria Magdalena Gómez Gómez y mi padre José Antonio Galván Puello por su gran esfuerzo y apoyo incondicional durante todo mi proceso de formación de pregrado que con este trabajo culmina.

A mis hermanos, José Manuel Galván Gómez y Fred Galván Gómez por su preocupación y siempre valiosa orientación que me ayudaron a ser quien hoy soy.

A mis amigos y demás familiares que de una u otra forma siempre estuvieron ahí celebrando mis logros y apoyándome en las dificultades.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a Dios que siempre está a mi lado y me ha dado la sabiduría necesaria para la feliz culminación de este trabajo.

A mi directora, la Dra. Debora Alcida Nabarlatz, quien sin su valiosa orientación y colaboración no hubiese sido posible la realización del presente trabajo.

A la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga – CDMB, a todos sus funcionarios que me acogieron durante el periodo de práctica dándome la mejor oportunidad de crecer como persona y como profesional.

A la Universidad Industrial de Santander que me brindó la oportunidad de vivir los mejores momentos de mi vida, formándome y educándome para ser un profesional integro que le genere progreso a este país.

A los ingenieros Henry Castro y Gustavo Oviedo por su valiosa disposición para orientarme en los momentos en que más lo necesitaba.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	13
OBJETIVOS	16
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	17
1.1 INVENTARIO DE EMISIONES	17
1.2 MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES	17
1.2.1 Muestreo en la fuente.	17
1.2.2 Modelos de emisión.	17
1.2.3 Factores de emisión (basados en proceso).	18
1.2.4 Balance de materiales.	18
1.3 MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES	18
1.3.1 Bases para la aplicación de modelos.	18
1.3.2. Modelo de dispersión gaussiano.	19
1.3.3. Estabilidad atmosférica.	20
2. METODOLOGÍA	21
2.2 DEFINIR LAS CARACTERÍSTICAS DEL INVENTARIO DE EMISIONES	22
2.2.1 Año base.	22
2.2.2 Tipos de fuente.	22
2.2.3 Contaminantes criterio.	22
2.3 SELECCIONAR LAS TÉCNICAS Y MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES	22
2.4 RECOPIRAR LA INFORMACIÓN RELACIONADA CON LAS EMISIONES Y DATOS DEL PROCESO	23
2.5 REALIZAR LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES.....	23
2.6 DOCUMENTAR LOS RESULTADOS.....	26
2.7 SELECCIONAR EL MODELO DE DISPERSIÓN.....	27
2.8 RECOPIRAR LOS DATOS DE ENTRADA DEL MODELO	27
2.9 ESTIMAR LAS MÁXIMAS CONCENTRACIONES POSIBLES.....	27
2.10 COMPARAR CON LA NORMA NACIONAL DE CALIDAD DEL AIRE.....	28
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	29
3.1 EMISIONES EN FUENTES FIJAS PUNTUALES	29
3.2 EMISIONES DE PST DEL PROCESO PRODUCTIVO	33
5. RECOMENDACIONES.....	38
BIBLIOGRAFÍA.....	39
ANEXOS.....	42

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Factores de emisión de la producción de alimentos concentrados.	26
Tabla 2. Matriz de estabilidad atmosférica y velocidades del viento.	28
Tabla 3. Características de las calderas y producción en kg h^{-1} .	29
Tabla 4. Características de los gases de combustión.	30
Tabla 5. Comparación de la concentración de salida con la norma.	32
Tabla 6. Datos de entrada software <i>SCREEN VIEW</i>	34
Tabla 7. Condiciones topográficas.	35
Tabla 8. Concentraciones máximas posibles. Tiempo de Exposición 24 horas	35
Tabla 9. Condiciones de concentración máxima.	36

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Difusión gaussiana desde una fuente fija puntual.	19
Figura 2. Metodología para la realización del trabajo.	21
Figura 3. Diagrama de bloques de la producción de alimentos concentrados	24
Figura 4. Emisiones de PST, SO ₂ , NO _x y CO de fuentes fijas. [kg año ⁻¹]	30
Figura 5. Emisión de CO ₂ en calderas (Ton año ⁻¹)	31
Figura 6. Emisiones de PST del proceso. [kg año ⁻¹]	33

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Clases de estabilidad atmosférica.	43
Anexo B. Plan de Gestión de la Calidad del Aire.	44
Anexo C. Descripción del equipo de monitoreo por medición directa.	45
Anexo D. Cálculo de la tasa de emisión de CO ₂ (25°C y 101,325 Kpa)	47
Anexo E. Equipos de control por empresa.	48
Anexo F. Interfaz gráfica software SCREEN VIEW.	49
Anexo G. Rosa de vientos de la ciudad de Bucaramanga	50

GLOSARIO

ANDI: Asociación Nacional de empresarios de Colombia

PST: Partículas suspendidas totales

ISC3: Industrial source complex 3

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

U.S. EPA: United States environmental protection agency

IDEAM: Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales.

RESUMEN

TITULO: Estudio de impacto ambiental debido a las emisiones atmosféricas de la producción de alimentos concentrados para animales en la zona metropolitana de Bucaramanga.

AUTOR: Mauricio Galván Gómez

PALABRAS CLAVES: Inventario de emisiones, dispersión atmosférica, Screen3, fuente fija puntual, PST, Valley, terreno simple, terreno complejo.

DESCRIPCIÓN: Se realizó el estudio de impacto ambiental atmosférico de la producción de alimentos concentrados en la zona metropolitana de Bucaramanga. Para tal fin se escogieron cuatro empresas como muestra representativa de esta actividad productiva específica.

Dicho estudio se compone de dos partes: la realización del inventario de emisiones de partículas suspendidas totales PST, SO₂, NO_x, CO y CO₂ en las calderas instaladas (fuentes fijas puntuales) y de PST en las diferentes etapas del proceso productivo. Por otra parte se realizó el modelado de la dispersión de PST, SO₂ y NO_x proveniente de las calderas mediante la aplicación del software *Screen View* que contiene los modelos *Screen3* y *Valley* para estimar las máximas concentraciones posibles en terreno simple y terreno complejo (elevaciones por encima de la altura de la chimenea) respectivamente.

Los resultados muestran que, en total, durante el año 2010 se emitieron 5041,58 kg de PST, 19494,16 kg de SO₂, 13511,04 kg de NO_x, 10842,07 kg de CO y 11859,12 ton de CO₂ en las calderas instaladas. Además, se emitió un total de 115267,78 kg de PST del proceso productivo, concluyendo que el enfriamiento del peletizado representa el 76% del total de dichas emisiones.

Se compararon las concentraciones de salida de los contaminantes con la normatividad vigente observando que sólo la Empresa C sobrepasa los niveles de PST y SO₂ en un 7,1 y 118,02 %, mientras que la concentración de NO_x representa el 95,16% del valor de la norma. Esto se debe a que el rendimiento de la combustión es muy bajo debido a una inadecuada relación aire-combustible. Las concentraciones estimadas mediante el modelo de dispersión no superan en ningún caso el 50% de los valores contemplados en la norma nacional de calidad del aire, por lo que no se requiere de un análisis detallado de la dispersión contaminante.

* Trabajo de Grado

** Facultad Ingenierías Físicoquímicas. Escuela Ingeniería Química. Directora Debora Alcida Nabarlatz.

ABSTRACT

TITLE: Study of environmental impact due to atmospheric emissions from the concentrated food production for animals in the metropolitan zone of Bucaramanga.

AUTHOR: Mauricio Galván Gómez

KEYWORDS: Emission inventory, atmospheric dispersion, Screen3, PST, simple terrain, complex terrain.

DESCRIPTION: A study of atmospheric environmental impact of concentrated food production in the metropolitan area of Bucaramanga was carried out. For this purpose, four companies were chosen as representative samples of this specific production activity.

This study is composed of two parts: the inventory of emissions of TSP, SO₂, NO_x, CO and CO₂ in the boilers installed (stationary point sources) and the PST at different stages of the production process. On the other hand, a dispersion modeling of TSP, SO₂ and NO_x from the boilers was performed by the application of Screen View software which contains the Screen3 and Valley models which can be used in order to estimate the maximum possible concentrations in simple terrain and complex terrain (elevations above of the stack height) respectively.

The results show that, in total, during 2010, 5041,58 Kg of PST, 19494,16 kg of SO₂, 13511,04 kg of NO_x, 10842,07 kg of C=, 11859,12 ton of CO₂ were emitted by boilers installed. While a total of 115,267.78 kg of TSP was emitted in the production process, concluding that the pellet cooling represent 76% of the total emissions.

The output concentrations of contaminants with current regulations were compared, showing that only Company C exceeds the levels of TSP in 7.1 and SO₂ in 118.02%, while the concentration of NO_x represents 95.16% of the standard value. It can be explained by the combustion efficiency; in this case it is very low due to inadequate air-fuel ratio. The concentrations estimated by the dispersion model in any case not exceed 50% of the values enshrined in the national standard of air quality; therefore, it does not require a detailed analysis of the pollutant dispersion.

* Degree Work

**Faculty Physical-chemical engineering. Department Chemical Engineering. Director Debora Alcida Nabarlatz.

INTRODUCCIÓN

La industria de los alimentos concentrados o balanceados es aquella que procesa las materias primas provenientes del sector agrícola y agroindustrial. Entre ellas se encuentran la soya, el maíz amarillo duro, el sorgo, además de otros ingredientes como vitaminas, minerales y colorantes utilizados en la elaboración de complejos alimenticios destinados a la ganadería, la porcicultura, avicultura, acuicultura y la nutrición de equinos y mascotas.

Según la cámara de la industria de alimentos balanceados de la ANDI, entre los años 2005 y 2010, se presentó un incremento del 31,4% en la producción en Colombia, especialmente impulsado por el aumento en el consumo de la carne de pollo, y en menor proporción debido a las otras líneas de producto.^[1]

Esta industria emite grandes cantidades anuales de partículas suspendidas totales (PST) en cada una de las etapas del proceso productivo, generando un deterioro en la calidad del aire y a su vez provocando la aparición de enfermedades de las vías respiratorias en los seres humanos. Además, se emiten otros contaminantes en el proceso de generación de vapor (según sea el combustible utilizado para tal fin), tales como dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x), siendo estos dos últimos gases de efecto invernadero.

Por lo tanto, se realizará un estudio de impacto ambiental atmosférico de la industria de producción de alimentos concentrados mediante el uso de dos herramientas: primero la realización del inventario de emisiones, y luego la aplicación de un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos. Esto se llevará a cabo con el fin de determinar la calidad y cantidad de las emisiones de este sector y estimar las máximas concentraciones posibles de SO_2 , NO_x y partículas suspendidas totales(PST) haciendo la respectiva comparación con la norma de calidad del aire en Colombia.

En 2010, Lei y Zhang et al. ^[2] realizaron un inventario de las emisiones de contaminantes primarios y de CO₂ de la industria de la producción de cemento en China, concluyendo que las emisiones de CO₂ de la industria cementera representan un octavo del total de las emisiones de CO₂ en dicho país y que es posible reducir dichas emisiones en un 12,8% si se implementan tecnologías avanzadas.

Asimismo, en 2011 Huertas e Izquierdo et al. ^[3] estudiaron la dispersión de partículas suspendidas totales (PST) de las minas de carbón del norte de Colombia, mediante el modelo ISC3 (Screen3A) obteniendo altos coeficientes de correlación entre los datos experimentales y los estimados por el modelo (>0,73), sirviendo esto para que las autoridades ambientales impusieran nuevas medidas tendientes a la descontaminación atmosférica de la región por parte de las empresas mineras.

Para la realización del inventario de emisiones se empleó la metodología mexicana consignada en la Guía de Elaboración y Usos de Inventarios de Emisiones ^[4]. Por otro lado, para la correcta aplicación del modelo de dispersión de contaminantes se consultó la Guía Metodológica para la Evaluación del Impacto Ambiental Atmosférico ^[5] y la Norma Técnica Colombiana GTC 59 (Guía Metodológica para la Selección y Aplicación de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos) ^[6].

Este estudio tiene un significado relevante en el campo de la evaluación que el sector industrial tiene sobre la calidad del aire ya que se obtiene información sobre la cantidad y calidad de los contaminantes emitidos por la industria de los alimentos concentrados, sirviendo como herramienta a las autoridades gubernamentales para diseñar y aplicar los planes de gestión de calidad del aire para esta actividad específica, además de servir como referente para otros sectores productivos.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Estimar la cantidad de contaminantes atmosféricos emitidos por las fuentes fijas de la producción de alimentos concentrados o balanceados para animales en la zona metropolitana de Bucaramanga.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar cuál es el contaminante de mayor aporte por parte de la industria de alimentos concentrados o balanceados.
- Comparar la emisión de contaminantes a la atmósfera según el tipo de combustible utilizado para la generación del vapor en el proceso.
- Determinar la etapa del proceso en estudio en la cual se emiten en mayor cantidad contaminantes a la atmósfera.
- Predecir las concentraciones máximas posibles de los contaminantes emitidos por chimenea mediante la aplicación del modelo de dispersión SCREEN3 de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos de América.
- Determinar cuál es la empresa que constituye el mayor riesgo para el deterioro de la calidad del aire en la zona de influencia.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 INVENTARIO DE EMISIONES

Un inventario de emisiones es la recopilación, organización y presentación de las emisiones de los contaminantes atmosféricos característicos de una zona geográfica o de una actividad industrial específica. Los inventarios de emisiones son los instrumentos de partida para la elaboración de los planes de gestión de la calidad del aire. Como antesala al desarrollo de cualquier plan para el mejoramiento de la calidad del aire es necesario conocer los tipos de fuentes de emisiones, las características y las cantidades de los contaminantes emitidos, las características espaciales y temporales, los procesos y los sistemas de control para las fuentes de la zona o sector industrial escogido.

1.2 MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES

Para la estimación de emisiones existen siete métodos, los cuales son descritos a continuación de una manera jerárquica, de acuerdo a la confiabilidad de cada uno para su aplicación, resaltando el hecho que entre más confiable es el método, más costosa es su implementación.

1.2.1 Muestreo en la fuente. Se trata de una medición directa de la concentración a través de procedimientos en donde se recolecta una muestra usando equipos muestreadores, para luego ser analizada mediante el uso de equipos instrumentales en tiempo real.

1.2.2 Modelos de emisión. Son complejas ecuaciones dependientes de múltiples variables y parámetros. Normalmente estos modelos son aplicados a través de software especializados como el TANKS ^[7] de la EPA, que es un modelo que predice las emisiones de compuestos orgánicos volátiles de los tanques de almacenamiento de combustibles.

1.2.3 Factores de emisión (basados en proceso). Son valores numéricos que expresan la relación entre la cantidad de un contaminante emitido y un parámetro de la actividad de un proceso como la cantidad de combustible quemado o las toneladas de producto elaborado.

1.2.4 Balance de materiales. Consiste en realizar la estimación de las emisiones mediante la aplicación simultánea de balances de energía y masa, representando las corrientes de entrada y de salida para el proceso en estudio. Este método es muy utilizado cuando en los procesos existen compuestos orgánicos volátiles o donde hay reacciones químicas.

1.3 MODELOS DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES

Los modelos de dispersión de contaminantes son herramientas computacionales basados en un amplio desarrollo matemático que permite predecir a partir de las características de la fuente, las condiciones meteorológicas de la zona y la cantidad de contaminante emanado a la atmósfera, las concentraciones a nivel del suelo de dicho contaminante, estimando de esta manera, el impacto causado sobre la calidad del aire en un área específica.

1.3.1 Bases para la aplicación de modelos. La formulación matemática parte de las siguientes suposiciones:

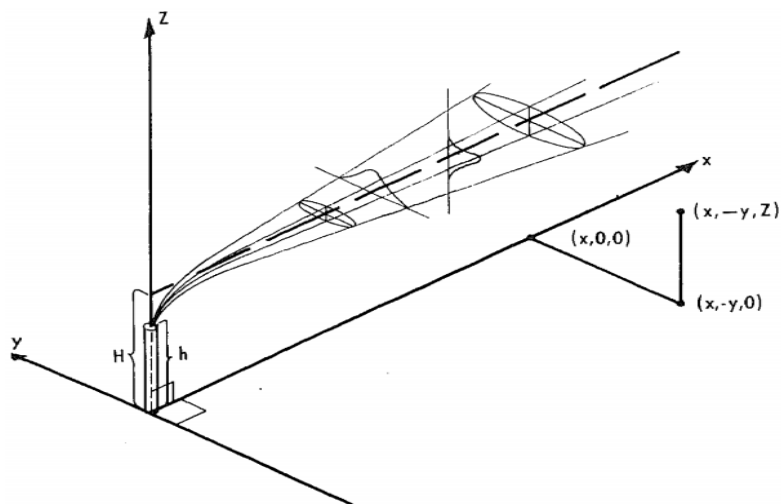
- La turbulencia de la atmósfera es uniforme en el área que se va a modelar.
- Se toman las emisiones con origen puntual.
- El eje de la pluma es horizontal en la dirección predominante del evento local y la pluma se desplaza a la velocidad promedio del viento. Debido a que las plumas normalmente poseen boyancia y/o momento, se realiza la corrección de la altura de emisión acondicionando a la altura del punto de descarga (chimenea) una altura Δh que se denomina elevación de la pluma.
- No existe sedimentación de los contaminantes.

- Los contaminantes son conservados y su emisión es uniforme.

1.3.2. Modelo de dispersión gaussiano. El modelo de dispersión gaussiano es ampliamente utilizado para calcular la concentración de gases no reactivos y de material particulado de menos de $20\ \mu\text{m}$ de diámetro, a una determinada distancia desde la altura efectiva de emisión H , la cual es la adición de la altura de la fuente y la elevación de la pluma ΔH . La formulación matemática fue propuesta por Turner en su libro *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates* ^[8] y considera lo siguiente:

- La pluma descargada por el ducto posee una altura efectiva igual a la altura de la chimenea más la elevación de esta, debido a la fuerza boyante previa del gas y el gradiente de temperatura entre los gases de salida y la temperatura ambiente.
- Una vez se llega a la altura efectiva de emisión, la pluma se desplaza en el plano horizontal conforme a la dirección predominante y la velocidad del viento. La dispersión de las especies descargadas se produce en los planos perpendiculares al desplazamiento de la pluma (yz), debido a la turbulencia atmosférica y se puede asumir una distribución gaussiana. (ver Figura 1)

Figura 1. Difusión gaussiana desde una fuente fija puntual.



Fuente: *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates*, Turner, 1970.

La expresión de la distribución gaussiana es la siguiente:

$$C = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp -\frac{1}{2} \frac{y^2}{\sigma_y^2} \left\{ \exp -\frac{1}{2} \frac{(z-H)^2}{\sigma_z^2} + \exp -\frac{1}{2} \frac{(z+H)^2}{\sigma_z^2} \right\}$$

C : Concentración del contaminante en $\mu\text{g m}^{-3}$

Q : Taza de emisión del contaminante en g s^{-1}

z : Distancia en el eje z en m

y : Distancia en el eje y en m

h : Altura de la chimenea en m

H : Altura efectiva de emisión en m

σ_y, σ_z : Desviaciones normales horizontal y vertical respectivamente

1.3.3. Estabilidad atmosférica. Los valores de σ_y y σ_z dependen de la estructura turbulenta de la atmósfera. Con el fin de determinar estos parámetros, Pasquill ^[9] propuso una clasificación de las condiciones atmosféricas, denominadas clases de estabilidad atmosférica. Las variables independientes de la estratificación de la estabilidad atmosférica son: la velocidad del viento a 10 m de altura, la nubosidad y la radiación solar incidente (Ver Anexo A) que afecta el nivel de actividad convectiva y la dinámica de la capa de mezcla, así como el gradiente térmico vertical. Las clases de estabilidad son:

- Muy inestable (A)
- Inestable (B)
- Ligeramente inestable (C)
- Neutra (D)
- Ligeramente estable (E)
- Estable (F)

2. METODOLOGÍA

En la figura 2 se esquematiza la metodología utilizada para llevar a cabo el presente trabajo.

Figura 2. Metodología para la realización del trabajo.



Fuente: Adaptado de Guía de Elaboración y Usos de Inventarios de Emisiones, México, 2005.

2.1 IDENTIFICAR EL PROPÓSITO DEL INVENTARIO DE EMISIONES

El propósito del presente inventario es cuantificar las emisiones de la producción de alimentos concentrados para animales en el área de jurisdicción de la CDMB, con el fin que esta herramienta sirva como punto de partida para la implementación de un plan de gestión de calidad del aire para esta actividad productiva específica. (Ver Anexo B)

2.2 DEFINIR LAS CARACTERÍSTICAS DEL INVENTARIO DE EMISIONES

2.2.1 Año base. El año base para la realización del presente inventario es el 2010, ya que para este año se poseen la mayor cantidad de expedientes de las empresas productoras de alimentos concentrados relacionados con las mediciones de las emisiones atmosféricas, como lo son los muestreos isocinéticos a las calderas instaladas.

2.2.2 Tipos de fuente. Las fuentes consideradas son las calderas (fuente fija puntual) que suministran el vapor necesario para el proceso y las diferentes etapas de procesamiento del grano (fuente fija dispersa) donde el contaminante criterio son las partículas suspendidas totales (PST).

2.2.3 Contaminantes criterio. Los contaminantes criterio son las partículas suspendidas totales (PST), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂) como gas de efecto invernadero.

2.3 SELECCIONAR LAS TÉCNICAS Y MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES

El método de estimación de emisiones para las calderas es el muestreo directo en la fuente^[10]. (Ver Anexo C)

Para la estimación de las emisiones de partículas suspendidas totales (PST) de las diferentes etapas del proceso de producción se utilizó el *Compilation of Air*

Pollution Factors AP-42 ^[11] de la US EPA, donde están consignados los factores de emisión basados en proceso para la producción de alimentos concentrados para animales.

2.4 RECOPIRAR LA INFORMACIÓN RELACIONADA CON LAS EMISIONES Y DATOS DEL PROCESO

La recopilación de los datos relacionados con las emisiones se hizo mediante la revisión de los expedientes de la CDMB. En ellos están consignados los estudios de emisiones solicitados por la autoridad ambiental a las empresas seleccionadas dentro de su labor de hacer cumplir la normatividad vigente en materia de aire. La presentación de dichos estudios está regida por la Resolución 2153 del 2 de marzo de 2010 por la cual se establece el protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas ^[12].

Por otra parte los datos relacionados con el proceso se obtuvieron mediante visitas a las empresas seleccionadas para el presente estudio dentro de la labor de administración del Registro Único Ambiental ^[13] y mediante las sábanas de información de éste.

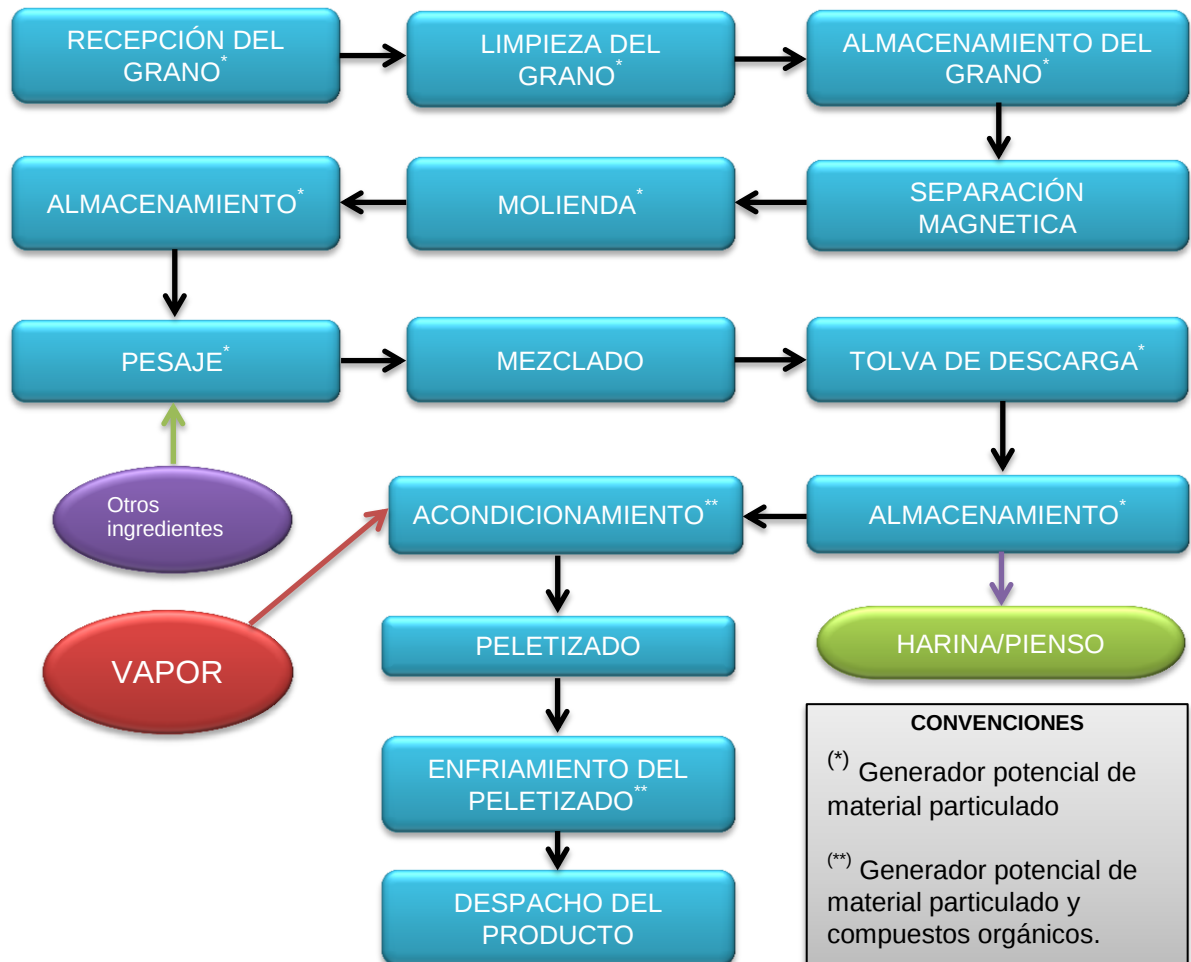
2.5 REALIZAR LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES

La estimación de las emisiones para las fuentes fijas puntuales (calderas) se realiza teniendo en cuenta los valores de emisión en kg h^{-1} para cada uno de los contaminantes criterio reportados en los estudios de muestreo en la fuente realizados por las empresas multiplicado por los registros anuales de tiempos de operación para obtener la cantidad total emitida durante el año 2010.

Para realizar la estimación de las emisiones de material particulado (PST) en las etapas del proceso de producción se hace una descripción general del proceso y se identifican las etapas de las cuales se posee el factor de emisión que relaciona la cantidad de contaminante descargado a la atmósfera con la cantidad de producto elaborado durante el período en estudio.

En la figura 3 se ilustra el proceso típico de elaboración de alimentos concentrados para animales, resaltándose las etapas en las que se presentan emisiones, y de qué tipo, a la atmósfera.

Figura 3. Diagrama de bloques de la producción de alimentos concentrados.



Fuente: Autor

El proceso de elaboración de alimentos concentrados para animales comienza con la recepción de la materia prima, la cual está compuesta por más de 200 ingredientes, incluyendo granos, subproductos (harina de carne, harina de huesos, pulpa de tomate, etc.), minerales, medicinas y vitaminas. La recepción se puede hacer en sacos, a granel, en canecas o carro tanque para líquidos.

Posterior al control de calidad de la materia prima (que consiste en una serie de pruebas fisicoquímicas), se hace la limpieza del grano para retirar partículas extrañas y polvo. Luego se procede a realizar una separación magnética de los granos en diferentes tamaños y texturas, también para retirar partículas de metal o similares que puedan averiar la maquinaria o contaminar el producto terminado.

Posteriormente sigue el proceso de molienda, donde un molino de martillos es el equipo más utilizado en esta etapa. El material pulverizado es tamizado para luego ser pesado junto a los demás ingredientes de acuerdo a la fórmula para un determinado alimento, y ser mezclado en equipos horizontales o verticales con agitadores de paleta. El material saliente de los mezcladores es harina o pienso que puede ser comercializado en esta presentación si se quiere.

Se procede a acondicionar la harina proveniente del mezclador con vapor, previo al proceso de peletizado, el cual consiste en la aglomeración de los ingredientes mediante la compactación en forma de pastilla, cubo, granulado, etc.

Los pellets ya formados se enfrían y secan en equipos enfriadores de peletizado de tipo horizontal o vertical que utilizan aire a temperatura ambiente, ya que para el almacenamiento y preservación idónea el contenido de humedad no debe superar el 12% y la temperatura no debe estar por encima de la temperatura ambiente por más de 5°C.

El producto finalmente es empacado en las diferentes presentaciones de empaque (bultos, sacos, bolsas, etc.) para luego ser llevado a las bodegas de almacenamiento de producto terminado para su despacho a los clientes.

La estimación de las emisiones de material particulado se hace con base en los factores de emisión del proceso desarrollados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA), consignados en *Compilation of Air Pollution Emission Factors (AP-42)* ^[11], Estos factores relacionan los kilogramos de partículas emitidas a la atmósfera con las toneladas de producto terminado como nivel de actividad.

En la tabla 1 se presentan los factores de emisión disponibles relacionados con la producción de alimentos concentrados para animales.

Tabla 1. Factores de emisión de la producción de alimentos concentrados.

Etapa fuente de emisión	Equipo de control de emisiones	Factor de emisión (Kg PST Ton ⁻¹ producto terminado)
Recepción del grano	Ninguno	0,0085
Limpieza del grano	Ciclón	0,0375
Almacenamiento	Ninguno	ND
Molienda con molino de martillo	Ciclón	0,0335
	Filtro de mangas	0,006
Molienda con secador	Ciclón	0,075
Molienda con pulverizador	Ciclón	0,012
Mezclado	Ninguno	ND
Acondicionamiento	Ninguno	ND
Enfriamiento del peletizado	Ciclón	0,18
	Ciclón de alta eficiencia	0,075
Empaque del producto	Ninguno	0,00165

Fuente: *Compilation of Air Pollution Emission Factors (AP-42)* ^[11], US EPA.

2.6 DOCUMENTAR LOS RESULTADOS

La presentación de los resultados se hace en dos partes, por una parte se presentan las cantidades totales emitidas por las fuentes fijas puntuales (calderas) y por otra parte las emisiones de las fuentes fijas dispersas (etapas del proceso) haciendo los respectivos análisis comparativos entre las empresas seleccionadas de acuerdo a las particularidades de cada una. Se realizan las respectivas comparaciones con la normatividad vigente en materia de emisiones teniendo en cuenta el combustible utilizado para la generación del vapor y la producción horaria para la emisión relacionada con el proceso productivo.

2.7 SELECCIONAR EL MODELO DE DISPERSIÓN

La selección del modelo de dispersión se realizó de acuerdo a la *Guía metodológica para la selección y aplicación de modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos GTC 59* ^[6], la *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental atmosférico* ^[5] y *Revision to the Guideline on Air Quality Models: Adoption of a Preferred General Purpose (Flat and Complex Terrain) Dispersion Models and Other Revisions; Final Rule* ^[14]. Para ello se seleccionó el software de uso libre *Screen View* ^[15] de la compañía *Lakes Environmental Software* que incorpora el modelo *Screen3* ^[16] para los cálculos en terreno simple y el modelo *Valley* ^[17] para los cálculos en terreno complejo de las máximas concentraciones posibles en la etapa de sondeo de contaminantes provenientes de fuentes fijas puntuales como lo son las calderas, indispensables durante el proceso de producción de alimentos concentrados para animales.

2.8 RECOPILAR LOS DATOS DE ENTRADA DEL MODELO

Posterior a la selección del modelo de dispersión a utilizar se procede a recopilar los datos requeridos por el modelo para su ejecución. Para ello se recurre nuevamente a los expedientes de la CDMB donde están consignados los estudios de muestreos isocinéticos a las calderas en las empresas seleccionadas para hacer la caracterización necesaria de la fuente a modelar y estimar las tasas de emisión de los contaminantes. Las características topográficas de la zona se toman del software *Google Earth* ^[18] y estas son verificadas mediante visitas a la zona. La rosa de los vientos requerida para determinar la dirección predominante de dispersión de los contaminantes se consulta al IDEAM.

2.9 ESTIMAR LAS MÁXIMAS CONCENTRACIONES POSIBLES

El modelo *Screen3* ^[16] emplea una matriz de clases de estabilidad atmosférica y velocidades del viento para encontrar el “peor caso” ^[19] de condiciones meteorológicas. Dicha combinación resulta en la máxima concentración a nivel del

suelo. La matriz de estabilidad atmosférica y velocidades del viento que examina el modelo *Screen3* se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Matriz de estabilidad atmosférica y velocidades del viento.

Clase de estabilidad	Velocidad del viento a 10 m (m s ⁻¹)													
	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	8	10	15	20	
A	*	*	*	*	*									
B	*	*	*	*	*	*	*	*	*					
C	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*			
D	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
E	*	*	*	*	*	*	*	*	*					
F	*	*	*	*	*	*	*							

Fuente: SCREEN3 Model User's Guide EPA, North Carolina, 1995.

El paquete *SCREEN VIEW* estima las máximas concentraciones sobre la base de 24 horas de exposición para elevaciones del terreno mayores a la altura de la chimenea (terreno complejo) mediante el modelo de sondeo *VALLEY* ^[17] asumiendo estabilidad clase E y velocidad del viento a la altura de la chimenea de $2,5 \text{ m s}^{-1}$.

2.10 COMPARAR CON LA NORMA NACIONAL DE CALIDAD DEL AIRE

Con el fin de evaluar el impacto de las fuentes escogidas sobre la calidad del aire se comparan los resultados obtenidos con los valores consignados en la Resolución 610 del 24 de marzo de 2010, determinando si las máximas concentraciones estimadas mediante el modelo superan el 50% del valor de la norma y si se requiere de una modelación detallada (fase dos) mediante un modelo refinado que tenga en cuenta los datos meteorológicos específicos de la zona en la que están ubicadas dichas fuentes.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 EMISIONES EN FUENTES FIJAS PUNTUALES

En la tabla 3 se presentan las características principales de las fuentes fijas puntuales (calderas) y la producción en kg h^{-1} de alimentos concentrados asociada a dicha fuente.

Tabla 3. Características de las calderas y producción en kg h^{-1} .

PARAMETRO	EMPRESA A	EMPRESA B	EMPRESA C	EMPRESA D
Tipo	Caldera 200 BHP	Caldera 80 BHP	Caldera 250 BHP	Caldera 200 BHP
Sistema de control	Multiciclones	No tiene	Ciclón	Filtro de mangas
Combustible utilizado	Cuesco de palma	Gas natural	Carbón mineral	Cuesco de palma
Poder calorífico (kJ kg^{-1})	18840,6	27783,033	29075	16747,2
Régimen de operación (h año^{-1})	5760	7728	6912	6912
Consumo combustible (kg h^{-1})	100	28,02	250	201,03
Emisión PST (kg h^{-1})	0,25	1,19e-03*	0,48	0,04
Emisión SO_2 (kg h^{-1})	0,12	3,75e-04*	2,42	0,30
Emisión NO_x (kg h^{-1})	0,06	0,04	0,74	1,12
Emisión CO (kg h^{-1})	0,29	0,052*	0,40	0,88
Emisión CO_2 (kg h^{-1})	408,68	84,25	352,73	928,24
Producción (kg h^{-1})	16100	7000	23650	30000
Consumo combustible / producción	0,00621	0,004	0,01057	0,0067

Fuente: Expedientes de la CDMB

* Estas tasas se calcularon mediante los factores de emisión para la combustión de gas natural de la EPA, *AP-42, Capítulo 1: Fuentes de combustión externa Sección 1.4: Combustión de gas natural*.

**La tasa de emisión de CO_2 se calculó con base en el análisis de gases de combustión medido a condiciones de referencia (25°C y 760 mm Hg) de todas las fuentes. (Ver Anexo D)

En la tabla 4 se presentan las características de los gases emitidos por las chimeneas de las calderas con los resultados de los análisis de gases por combustión.

Tabla 4. Características de los gases de combustión.

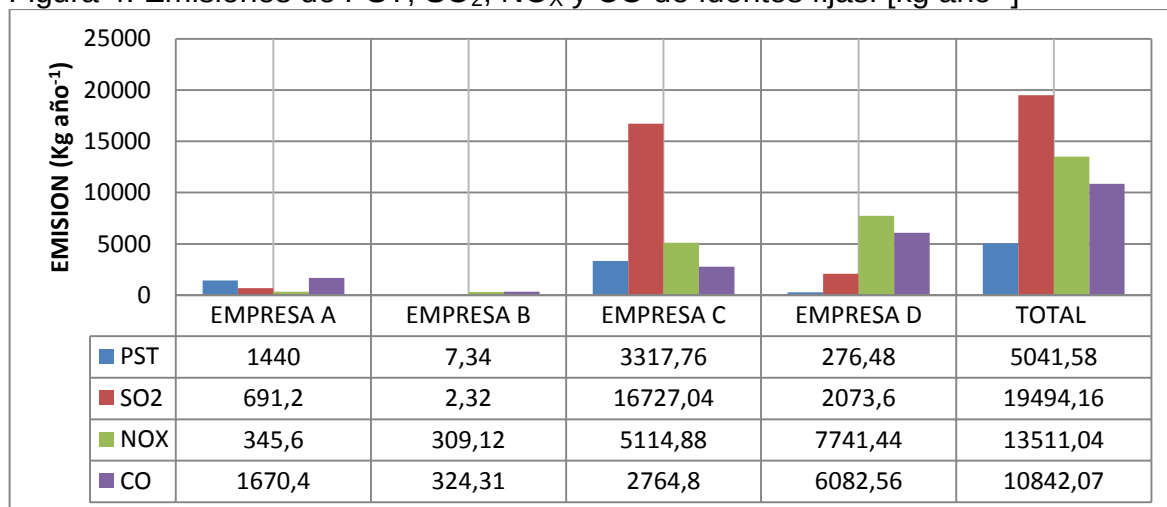
PARÁMETRO	EMPRESA A	EMPRESA B	EMPRESA C	EMPRESA D
Caudal ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	0,74	0,15	0,96	1,62
Velocidad (m s^{-1})	5,89	3,11	5,49	12,71
Humedad (%)	7,16	12,47	4,78	9,01
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	73,58	83,28	177,50	80,96
Presión absoluta (mmHg)	703,86	700,85	698,72	705,94
O _{2ref} * (%)	13	11	11	13
O ₂ (%)	12,20	5,28	14,58	11,88
CO (%)	0,01	0,05	0,02	0,02
CO ₂ (%)	8,53	8,68	5,68	8,85
N ₂ (%)	79,26	86	79,73	79,26

Fuente: Expedientes de la CDMB

*Oxígeno de referencia: Cantidad de oxígeno que debería salir por la chimenea de una fuente fija cuando se encuentra operando bajo las recomendaciones del fabricante.

En la figura 4 se presenta el total de las emisiones, en kg año^{-1} de PST, SO₂, NO_x y CO en las calderas de las empresas seleccionadas para este estudio.

Figura 4. Emisiones de PST, SO₂, NO_x y CO de fuentes fijas. [kg año^{-1}]



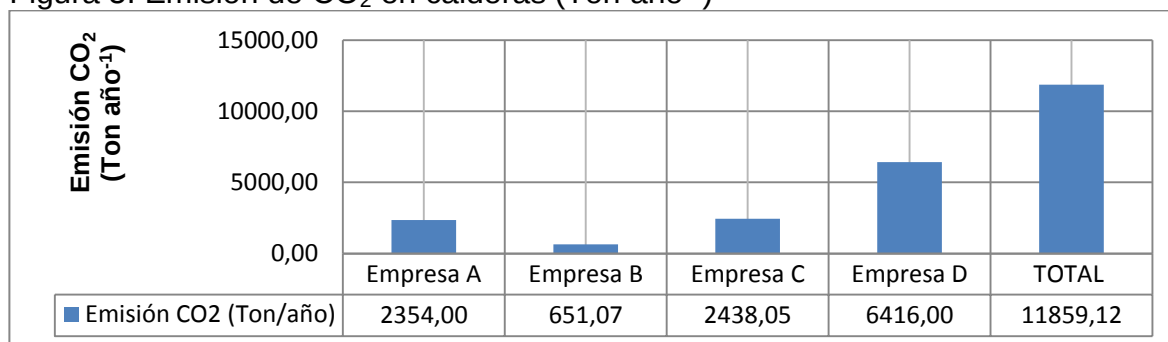
Fuente: Autor

En la figura se observa que la Empresa C es la que en mayor cantidad emite estos contaminantes a la atmósfera proveniente de la caldera, ya que es la que presenta un mayor consumo de combustible. Además, esta empresa tiene la relación combustible utilizado / producción más alta de todas, lo que la convierte en la más

ineficiente. Por otra parte se observa que el mayor contaminante emitido por esta empresa es el SO_2 , debido al alto contenido de azufre del carbón mineral.

Asimismo se puede ver que la Empresa B es la que menos emite estos contaminantes a la atmósfera, presentando los valores más bajos de consumo de combustible y la relación combustible utilizado / producción, lo que la convierte en la empresa más eficiente, además de confirmar la conveniencia ambiental de la utilización del gas natural.

Figura 5. Emisión de CO_2 en calderas (Ton año^{-1})



Fuente: Autor

En la figura 4 se presenta el total de las emisiones de CO_2 en las calderas, en la que se observa que la Empresa D es la que más emite CO_2 a la atmósfera a pesar de que es la Empresa C la que presenta mayor consumo de combustible. Esto debido a que la Empresa C tiene un rendimiento de combustión muy bajo, aspecto que se evidencia en el porcentaje de O_2 por encima del valor de referencia (ver tabla 4), lo que quiere decir que hay una cantidad de aire excesiva que disminuye el rendimiento de la combustión, por lo tanto, se está calentando aire.

A diferencia de las demás fuentes, la Empresa C es la que única que presenta este problema en la relación aire/combustible, por lo tanto se requieren de mantenimientos preventivos y correctivos a la fuente con el fin de que el porcentaje de O_2 en exceso disminuya y así alcanzar un proceso de combustión eficiente.

En la tabla 5 se hace la comparación de las concentraciones de PST, SO₂ y NO_x en los gases de salida de las chimeneas de las calderas con el valor límite permitido consignado en la Resolución 909 de 2008 ^[20] por la cual se establecen las normas estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera.

Tabla 5. Comparación de la concentración de salida con la norma.

CONTAMINANTE	LIMITE NORMA (µg m ⁻³)	EMPRESA A (µg m ⁻³)	EMPRESA B (µg m ⁻³)	EMPRESA C (µg m ⁻³)	EMPRESA D (µg m ⁻³)
PST	300	84,1 28%	SIN MEDIR	214,28 107,1%	6,03 2%
	200				
SO₂	500	41,3 SIN NORMA	SIN MEDIR	1098,98 218,2%	45,59 SIN NORMA
	350	20,79 5,9%		333,06 95,2%	170,20 48,6%

Fuente: Autor

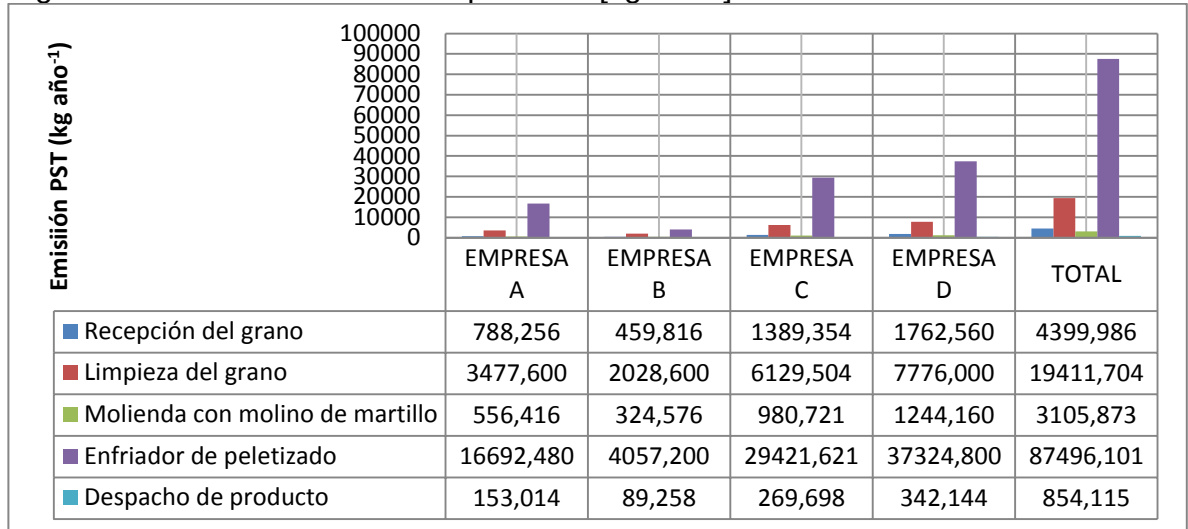
En la tabla 5 se observa que la Empresa C es la única que supera los límites contemplados en la norma, esto se debe a que el rendimiento del proceso de combustión es muy bajo, debido a una mala configuración del quemador, que se refleja en un exceso de aire muy elevado. Esto, hace que al momento de realizar la corrección de la concentración por oxígeno de referencia estos valores aumenten considerablemente.

Por otro lado, el alto contenido de azufre de hasta el 4,02% ^[21] y las cenizas del carbón mineral contribuyen al valor tan alto de la concentración de SO₂. La razón por la cual la concentración de NO_x constituye el 95,16% del valor consignado en la norma es la temperatura de salida de los gases, ya que a altas temperaturas el N₂ reacciona con el O₂ en exceso presente en los gases de combustión formando NO y NO₂ que forman el grupo de los NO_x.

3.2 EMISIONES DE PST DEL PROCESO PRODUCTIVO

En la figura 6 se presentan los resultados de las emisiones de PST debido a las diferentes etapas de producción de alimentos concentrados para animales, teniendo en cuenta los equipos de control en cada etapa para la aplicación del factor de emisión. (Ver Anexo E)

Figura 6. Emisiones de PST del proceso. [kg año⁻¹]



Fuente: Autor

En la figura 6 se puede observar que en total la Empresa D es la que más emite PST a la atmósfera debido a las etapas del proceso dado, dado que es la que tiene mayor tasa de producción.

En cuanto a las etapas de producción se observa que el enfriamiento del peletizado representa el 76% del total de las emisiones del proceso productivo. Esto se debe a que tres de las empresas seleccionadas cuentan en esta etapa con un ciclón simple como sistema de control, lo que ocasiona esta diferencia. En contraste, la Empresa B posee un ciclón de alta eficiencia para el control de la emisión de PST.

3.3 APLICACIÓN DEL SOFTWARE DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES

En la tabla 6 se presentan los datos de entrada del software *SCREEN VIEW* utilizado para estimar las máximas concentraciones posibles de PST, SO₂ y NO_x emitidos de las calderas de las empresas. No se hace para el CO porque requiere de un modelo especializado. (Ver Anexo F)

Tabla 6. Datos de entrada software *SCREEN VIEW*

PARAMETRO	EMPRESA A	EMPRESA B	EMPRESA C	EMPRESA D
Tipo de fuente	Puntual	Puntual	Puntual	Puntual
Altura de la chimenea (m)	19,4	14,6	20	20,4
Diámetro interior del ducto (m)	0,49	0,3	0,62	0,5
Velocidad de salida (m s ⁻¹)	5,89	3,11	5,49	12,71
Temperatura de salida (K)	346,73	356,43	450,65	354,11
Temperatura ambiente (K)	304,15	298,15	300,15	303,15
Altura del receptor (m)	0	0	0	0
Opción Urbana/Rural	U	U	U	U
Meteorología**	COMPLETA	COMPLETA	COMPLETA	COMPLETA
Tasa de emisión PST (g s ⁻¹)	0,0694	*	0,1333	0,0111
Tasa de emisión SO ₂ (g s ⁻¹)	0,0333	*	0,6722	0,0833
Tasa de emisión NO _x (g s ⁻¹)	0,0167	0,0111	0,2055	0,3111

Fuente: Expedientes de la CDMB.

*No se consideran estas tasas de emisión porque son datos irrelevantes comparados con los demás, debido a que en esta empresa la caldera funciona con gas natural.

**Meteorología completa se refiere a que el modelo evalúa todas las combinaciones de estabilidad atmosférica y velocidades del viento descritas en la tabla 2.

Con el fin de poder determinar la dirección predominante de la dispersión de los contaminantes estudiados, se recurre a la rosa de vientos de Bucaramanga (Ver Anexo G), elemento que fue consultado directamente en la página del IDEAM ^[22].

De acuerdo a la rosa de vientos la dirección predominante del viento es la dirección norte. Con base en este aspecto se obtienen las respectivas elevaciones del terreno en la dirección norte aledañas a las chimeneas de las calderas de las empresas seleccionadas. Estas características del terreno son muy relevantes para la correcta estimación de las máximas concentraciones posibles.

En la tabla 7 se presentan las condiciones topográficas en la dirección norte del terreno aledaño a las chimeneas de las calderas estudiadas.

Tabla 7. Condiciones topográficas.

EMPRESA A	Elevación(m)	30	40	50	60	70
	Distancia (m)	2118,03	2683,47	3057,92	3125,66	3462,29
EMPRESA B	Elevación (m)	25	35	45	55	65
	Distancia (m)	2152,17	2726,52	2773,18	2913,23	3076,43
EMPRESA C	Elevación (m)	30	40	50	60	70
	Distancia (m)	312,96	348,45	388,32	428,06	467,64
EMPRESA D	Elevación (m)	31	41	51	61	-
	Distancia (m)	1716,31	1799,85	1891,55	1974,68	-

Fuente: Google Earth

En la tabla 8 se presentan las máximas concentraciones posibles de PST, SO₂ y NO_x (principalmente NO₂) estimadas mediante el software *SCREEN VIEW* haciendo la respectiva comparación con los valores consignados en la Resolución 610 de Marzo 24 de 2010 ^[23] (por la cual se establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión) para el territorio nacional en condiciones de referencia. El software estima las concentraciones sobre la base de 1-h de exposición y se convierten a 24-h de exposición multiplicándose por el factor 0,4. ^[24]

Tabla 8. Concentraciones máximas posibles. Tiempo de Exposición 24 horas

Contaminante	Limite norma ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Empresa A ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Empresa B ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Empresa C ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Empresa D ($\mu\text{g m}^{-3}$)
PST	300	6,16	2,66	8,45	0,51
		2,1%	1,8%	2,8%	0,2%
SO₂	250	2,96	*	42,62	3,84
		1,2%		17%	1,5%
NO_x	150	1,48	*	13,03	14,33
		1%		8,7%	9,6%

Fuente: Autor

*Tiempo de exposición: período de tiempo a lo largo del cual se promedian las concentraciones del contaminante.

En las tablas anteriormente presentadas se observa que ninguna de las concentraciones estimadas alcanza el 50% del valor consignado en la norma de calidad del aire, por ende, no se requiere de la segunda etapa de modelación para las fuentes seleccionadas (análisis detallado) ya que en la etapa de sondeo, el aporte contaminante de éstas no representa un riesgo para el deterioro de la calidad del aire de la zona evaluada.

En la tabla 9 se presentan las condiciones en las cuales se dan las máximas concentraciones estimadas mediante el software *SCREEN VIEW*.

Tabla 9. Condiciones de concentración máxima.

FUENTE	DISTANCIA (m)	ESTABILIDAD ATMOSFERICA	VELOCIDAD DEL VIENTO A 10 m DE ALTURA (m s^{-1})	ALTURA EFECTIVA DE LA CHIMENEA (m)
Empresa A	103	C	1,0	29,29
Empresa B	68	C	1,0	18,45
Empresa C	313	D	1,2	46,5
Empresa D	142	C	1,0	40,64

Fuente: Autor

En la tabla 9 se observa que la Empresa B localiza el punto de máxima concentración a 68 metros de la fuente, lo que representa la menor distancia de todas las fuentes evaluadas, esto es debido a que es la que presenta la altura efectiva de chimenea más baja.

La Empresa C es la que presenta el punto de máxima concentración más alejado de la fuente, esto debido a que presenta la altura efectiva de chimenea mayor. Sin embargo, al impactar la pluma sobre un punto de elevación del terreno aumenta el valor de la máxima concentración por que se genera acumulación de los gases.

4. CONCLUSIONES

- La industria de la producción de alimentos concentrados aporta mayoritariamente material particulado, representado como PST (partículas suspendidas totales) como contaminante a la atmósfera, debido principalmente a la manipulación y procesamiento del grano.
- El uso de carbón mineral combustible representa un gran aporte de contaminantes a la atmósfera, principalmente SO_2 , requiriendo de sofisticados sistemas de control para gases y partículas para mitigar su impacto.
- La etapa del proceso de producción que más aporta material particulado es la del enfriamiento del peletizado, representando el 76% del total de las emisiones del proceso productivo.
- Las concentraciones estimadas mediante el modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos no sobrepasan, en general, el 20% del valor consignado en la norma de calidad del aire, por lo tanto, las fuentes fijas evaluadas no representan un riesgo para el deterioro de la calidad del aire en la zona de influencia.
- La Empresa C es la que más impacto genera sobre la atmósfera ya que sobrepasa los niveles de emisión permitidos en la Resolución 909 de 2008. Esto debido a una mala configuración del quemador, lo que genera una mala relación aire/combustible, disminuyendo sustancialmente el rendimiento en la combustión. Además, las condiciones del terreno aledañas a ésta hacen que potencialmente impacte sobre la calidad del aire, superando los niveles de inmisión permitidos en la Resolución 610 de 2010.

5. RECOMENDACIONES

- Desarrollar estudios de impacto ambiental atmosférico para otros sectores productivos de los que se presume, aporten al deterioro de la calidad del aire.
- Realizar una caracterización del tamaño y forma del material particulado emitido por las fuentes, esto con el fin de poder determinar si hay fenómenos de deposición y/o sedimentación durante su residencia en la atmósfera.
- Desarrollar estrategias de control de las emisiones de PST en la etapa de enfriamiento del peletizado o desarrollar una nueva tecnología para llevar a cabo esta parte del proceso, ya que esta es la que más emite PST en el proceso productivo.
- Realizar este tipo de estudios de manera periódica, con el fin de seguir la evolución del aporte de la carga contaminante a la atmósfera de parte de los sectores productivos del país.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ASOCIACION NACIONAL DE EMPRESARIOS DE COLOMBIA, Cámara industria alimentos balanceados [en línea], <<http://www.andi.com.co/pages/comun/infogeneral.aspx?Id=14&Tipo=2>> [citado en 31 de agosto de 2011].
- [2] LEI, Yu y ZHANG, Quiang; NIELSEN, Chris; HE, Kebin. An inventory of primary air pollutants and CO₂ emissions from cement production in China, 1990-2020. En: Atmospheric Environment. Enero, 2011. vol. 45. no. 1. p. 147-154. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.09.034>> [citado en 31 de agosto de 2011]
- [3] HUERTAS, José I.; HUERTAS, María E. e IZQUIERDO, Sebastián; GONZALEZ, Enrique D. Air quality impact assessment of multiple open pit coal mines in northern Colombia. En: Journal of Environmental Management . enero, 2012. vol. 93. no. 1. p. 121-129. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.08.007>> [citado en 31 de agosto de 2011].
- [4] MEXICO. SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES; INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGIA y WESTERN GOVERNORS ASSOCIATION. Guía de elaboración y usos de inventarios de emisiones. En: Revista VIRTUALPRO Procesos Industriales [en línea], <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/descarga.html?cv_pub=457&tipo_file=pdf&filename=457> [citado en 03 de agosto de 2011].
- [5] DAWIDOWSKI, Laura; GÓMEZ, Darío y REICH, Silvia. Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental atmosférico. Prólogo del señor diputado Fernando W. Maurette. En: Biblioteca Virtual de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental [en línea], <<http://www.bvsde.paho.org/bvsci/e/fulltext/guiaeia/guiaeia.pdf>> [citado en 28 de agosto de 2011].
- [6] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Guía metodológica para la selección y aplicación de modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos. GTC 59. Bogotá D.C.: El instituto, 1998. 17 p.
- [7] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. TANKS Emissions Estimation Software [en línea]. <<http://www.epa.gov/ttnchie1/software/tanks/>> Versión 4,09D. Washington D.C., 2005. Octubre 5 de 2006. [citado en 28 de agosto de 2011].
- [8] TURNER, D. Bruce. Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates. En: California Department of Transportation [en línea], <<http://www.i80.dot.ca.gov/newtech/researchreports/1969-1970/70-07.pdf>> [citado en 18 de noviembre de 2011].

[9] PASQUILL, Frank. Atmospheric Diffusion: The Dispersion of Windborne Material from Industrial and other Sources. 2 ed. Londres. D. Van Norstand Company Ltd. 1974.

[10] COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 2153 (02, noviembre, 2010). Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas. Bogotá D.C. p. 6-24.

[11] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. AP-42, Compilation of air pollutant emission factors [en línea]. 5 ed. Washington D.C. Enero 1995, revisado noviembre 1997. 9.9.1 Grain elevators & processes. <<http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch09/final/c9s0909-1.pdf>>. [citado en 01 de octubre de 2011].

[12] COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 2153 (02, noviembre, 2010). Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas. Bogotá D.C.

[13] INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Registro único ambiental manufacturero. [en línea]<<http://institucional.ideam.gov.co/jsp/loader.jsf?lServicio=Publicaciones&lTipo=publicaciones&lFuncion=loadContenidoPublicacion&id=679>>. [citado en 30 de noviembre de 2011].

[14] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 40 CFR 51 Revision to the Guideline on Air Quality Models: Adoption of a Preferred General Purpose (Flat and Complex Terrain) Dispersion Model and Other Revisions; Final Rule. [en línea]. Washington. Noviembre 9, 2005. <http://www.epa.gov/scram001/guidance/guide/appw_05.pdf>. [citado en 17 de septiembre de 2011].

[15] LAKES ENVIRONMENTAL SOFTWARE. Screen View TM. [en línea]. Ed. 3.0.0. <<http://www.weblakes.com/products/screen/index.html>>.

[16] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. SCREEN3 Model User's Guide [en línea]. Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division. North Carolina. Septiembre 1995. <http://www.weblakes.com/products/screen/resources/docs/lakes_screen3_model_user_guide.pdf>. [citado en 31 de julio de 2011].

[17] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. VALLEY Model User's Guide [en línea]. Office of Air and Waste Management. North Carolina. Septiembre

1977. <<http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockkey=2000WXE/.txt>>. [citado en 31 de julio de 2011].

[18] GOOGLE INC. Google Earth ®. [en línea]. Ed. 6.1.0.5001. <earth.google.com>

[19] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. SCREEN3 Model User's Guide [en línea]. Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division. North Carolina. Septiembre 1995. <http://www.weblakes.com/products/screen/resources/docs/lakes_screen3_model_user_guide.pdf>. p. 44. [citado en 31 de julio de 2011].

[20] COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 909. [en línea]. (05, junio, 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. Bogotá D.C. <http://www.minambiente.gov.co/documentos/res_0909_050608.pdf>.

[21] COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA. EL CARBON COLOMBIANO. Fuente de energía para el mundo. [en línea]. Bogotá D.C. 3.1.3. Minería del carbón por regiones. p. 27–28. <www.upme.gov.co/Docs/Cadena_carbon.pdf>. ISBN 958 – 97750 – 0 – 4. [citado en 13 de enero de 2012]

[22] INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Rosa de vientos – Bucaramanga. [en línea]. <<http://bart.ideam.gov.co/cliciu/rosas//viento.htm>>. [citado en 27 de agosto de 2011].

[23] COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 610. [en línea]. (24, marzo, 2010). Por la cual se establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia. Bogotá D.C. <http://www.minambiente.gov.co/documentos/normativa/ambiente/resolucion/res_0610_240310.pdf>.

[24] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Screening Procedures for Estimating the Air Quality Impact of Stationary Sources, Revised. [en línea]. Washington D.C. Cap. 4. Estimating Source Impact on Air Quality. p. 15. <http://www.epa.gov/oppt/exposure/presentations/efast/usepa_1992b_sp_for_estim_aqi_of_ss.pdf>. [citado en 20 de agosto de 2011].

ANEXOS

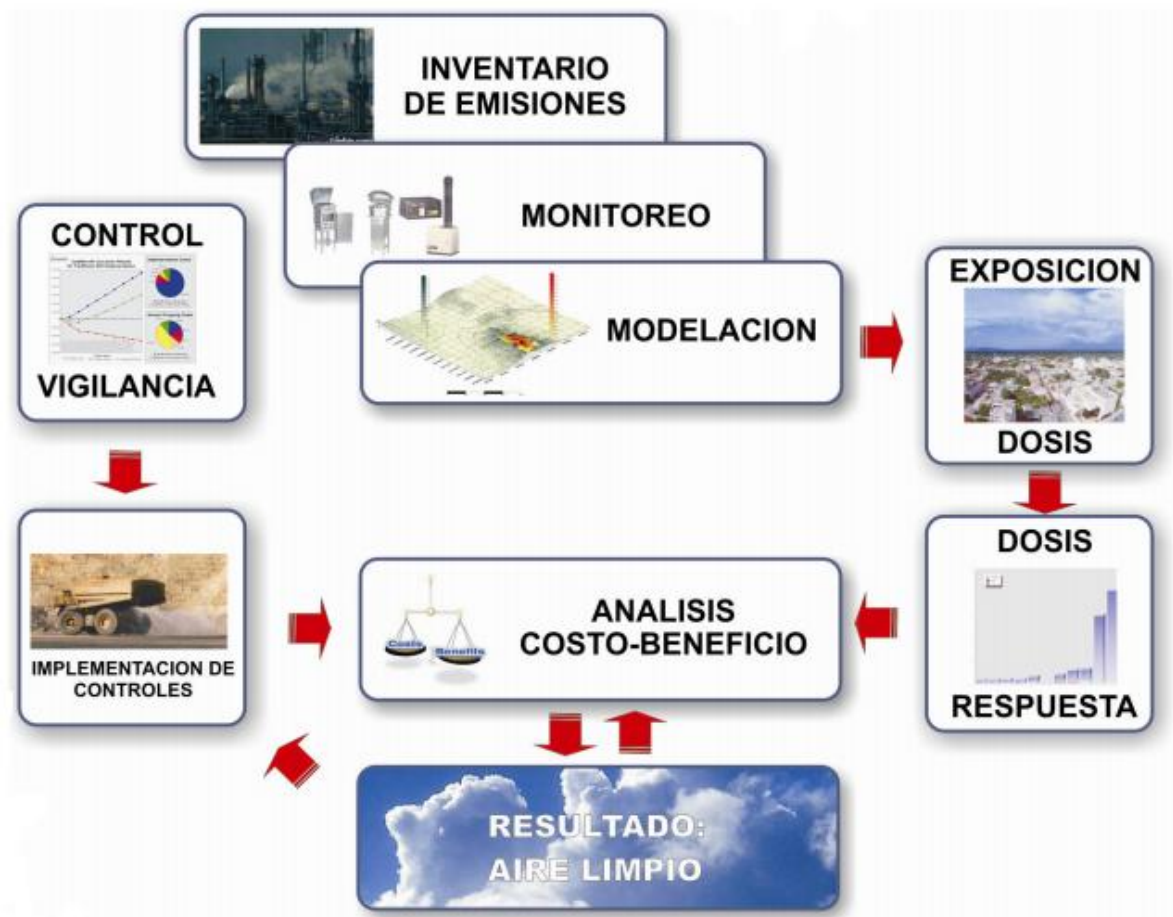
Anexo A. Clases de estabilidad atmosférica.

Velocidad del viento (m/s) a 10m de altura	Día			Noche*	
	Radiación solar incidente			$4/8 \leq \text{Nubosidad} \leq 7/8$	Nubosidad $\leq 3/8$
	Fuerte (mayor que $50 \text{ cal cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$)	Moderada (entre 25 y $50 \text{ cal cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$)	Débil (menor a $25 \text{ cal cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$)		
< 2	A	A—B	B	F	F
2—3	A—B	B	C	E	F
3—5	B	B—C	C	D	E
5—6	C	C—D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Fuente: Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental atmosférico. Honorable Cámara de Diputados de la Nación Argentina. Buenos Aires, 1997.

*La noche se define como el período desde una hora después de la puesta del sol hasta una antes de la salida del mismo.

Anexo B. Plan de Gestión de la Calidad del Aire.



Fuente: Manual de Fundamentos y Planeación de Inventarios de Emisiones. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Consultor: K2 Ingeniería Ltda. Bogotá D.C.

Anexo C. Descripción del equipo de monitoreo por medición directa.

Equipo dispositivo	Imagen	Descripción
BOQUILLA		La boquilla es un dispositivo fabricado generalmente en acero inoxidable, cuarzo o borosilicato cuyo filo en la parte final debe estar hacia el exterior, para conservar un diámetro interno constante, por el mismo motivo debe ser construida de una sola pieza. Se debe disponer de una variedad de tamaños ya que van desde 0,32 -1,27 centímetros de diámetro interior.
SONDA		La sonda consiste en un tubo metálico que se encuentra recubierto con una resistencia eléctrica variable para calefacción. En un extremo la sonda tiene una unión esférica para acoplarse al resto del equipo, en el otro extremo tiene un acople para colocar la boquilla toma muestra, también tiene un termopar para medir la temperatura del gas y un tubo pitot tipo S con sus respectivas conexiones al manómetro ubicado en el módulo de control. Cuenta con todas las conexiones eléctricas necesarias para su operación.
CONSOLA		Con esta unidad se controlan las operaciones necesarias para la toma de la muestra. Consiste en un indicador múltiple de temperaturas, interruptores y relés necesarios para la operación del sistema, un medidor de volumen para gases secos con carátula indicadora, un manómetro de vacío para la operación de la bomba de vacío con sus correspondientes válvulas de control fino y grueso, los manómetros para la determinación de caídas de presión en el tubo pitot-S y en el orificio y las tomas de presión y eléctricas.

(Continúa en la siguiente página)

PORTAFILTRO		Fabricado en vidrio de borosilicato con un soporte para el filtro de frit de vidrio y un empaque de caucho de silicona. Pueden utilizarse otros materiales de construcción como acero inoxidable o teflón, su objetivo es garantizar la hermeticidad tanto en su entrada y salida, como alrededor del filtro, se ubica inmediatamente a la salida de la sonda (o ciclón, si es utilizado).
MODULO DE TOMA DE MUESTRA		El módulo de toma de muestra consiste de dos secciones: La primera es la sección caliente (horno) donde se coloca el filtro y el ciclón, esta sección tiene un termopar para medir la temperatura del horno y una resistencia eléctrica variable para calentar toda la sección. La segunda sección es fría (nevera), consiste en una caja aislada donde se colocan los impactadores en un baño de agua o hielo.
IMPACTADORES		Los impactadores son recipientes de vidrio que se unen entre sí de manera hermética para hacer pasar la muestra, luego de que esta ha sido filtrada. Se ubican en la cámara fría, que es bañada en su interior agua o hielo. El contenido de cada uno de los impactadores depende del método utilizado para la determinación de los contaminantes.
CORDÓN UMBILICAL		Es el dispositivo que conecta la sonda de toma de muestra con el módulo de control, por medio del cual se transmiten al módulo de control los datos de presión y temperatura en la sonda de toma de muestra.
BOMBA VACIO		La bomba se utiliza para forzar el paso continuo de la muestra por el equipo de monitoreo, de manera que se pueda controlar el volumen que ha sido transportado.
EQUIPO DE MONITOREO		

Fuente: Manual de Fundamentos y Planeación de Inventarios de Emisiones. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Consultor: K2 Ingeniería Ltda. Bogotá D.C.

Anexo D. Cálculo de la tasa de emisión de CO₂ (25°C y 101,325 Kpa)

Para realizar el cálculo de la tasa de emisión de las calderas se utilizó la siguiente ecuación:

$$Emisión\ de\ CO_2\ \frac{Ton}{año} = \frac{Q_{CR}\ \frac{m^3}{h} * \%CO_2 * PM_{CO_2}\ \frac{Kg}{Kmol} * t_{operación}\ \frac{h}{año}}{V_{molar}\ \frac{m^3}{Kmol} * 1000}$$

FUENTE	$Q_{CR}\ \frac{m^3}{h}$	$\%CO_2$	$F_{operación}\ \frac{h}{año}$	$Emisión\ de\ CO_2\ \frac{Ton}{año}$
Empresa A	2664	8,53	5760	2354
Empresa B	540	8,675	7728	651,07
Empresa C	3456	5,675	6912	2438,05
Empresa D	5832	8,85	6912	6416

$Q_{CR}\ \frac{m^3}{h}$: Caudal en condiciones de referencia base seca

$\%CO_2$: Porcentaje de CO₂ de gases de chimenea por análisis de combustión

$PM_{CO_2}\ \frac{Kg}{Kmol}$: Peso molecular del CO₂ 44 $\frac{Kg}{Kmol}$

$t_{operación}\ \frac{h}{año}$: Tiempo de operación anual de la fuente

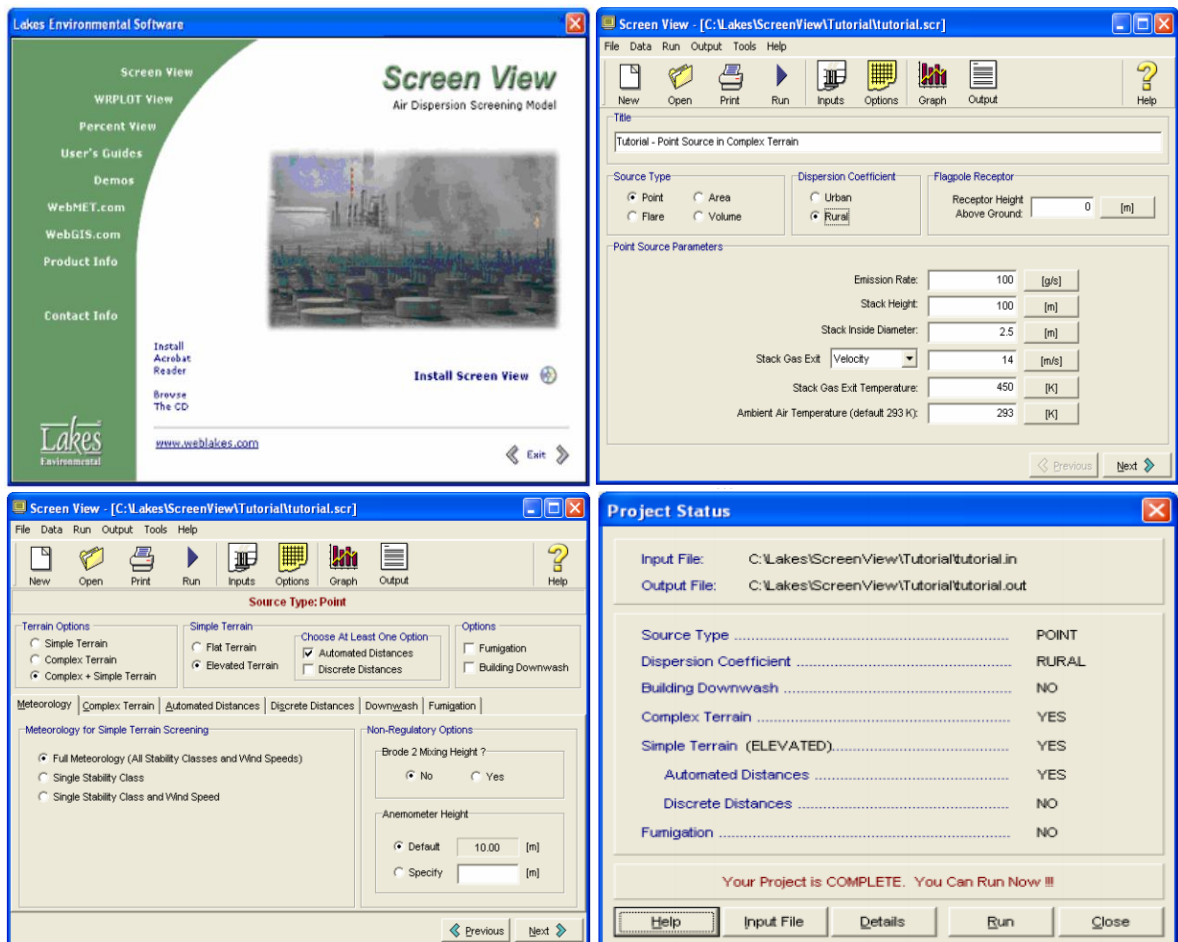
$V_{molar}\ \frac{m^3}{Kmol}$: Volumen molar de un gas a condiciones de referencia 24,47 $\frac{m^3}{Kmol}$

Anexo E. Equipos de control por empresa.

ETAPA	EMPRESA A	EMPRESA B	EMPRESA C	EMPRESA D
Recepción del grano	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno
Limpieza del grano	Ciclón	Ciclón	Ciclón	Ciclón
Molienda con molino de martillo	Filtro de mangas	Filtro de mangas	Filtro de mangas	Filtro de mangas
Enfriamiento del peletizado	Ciclón	Ciclón de alta eficiencia	Ciclón	Ciclón
Despacho del producto	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno

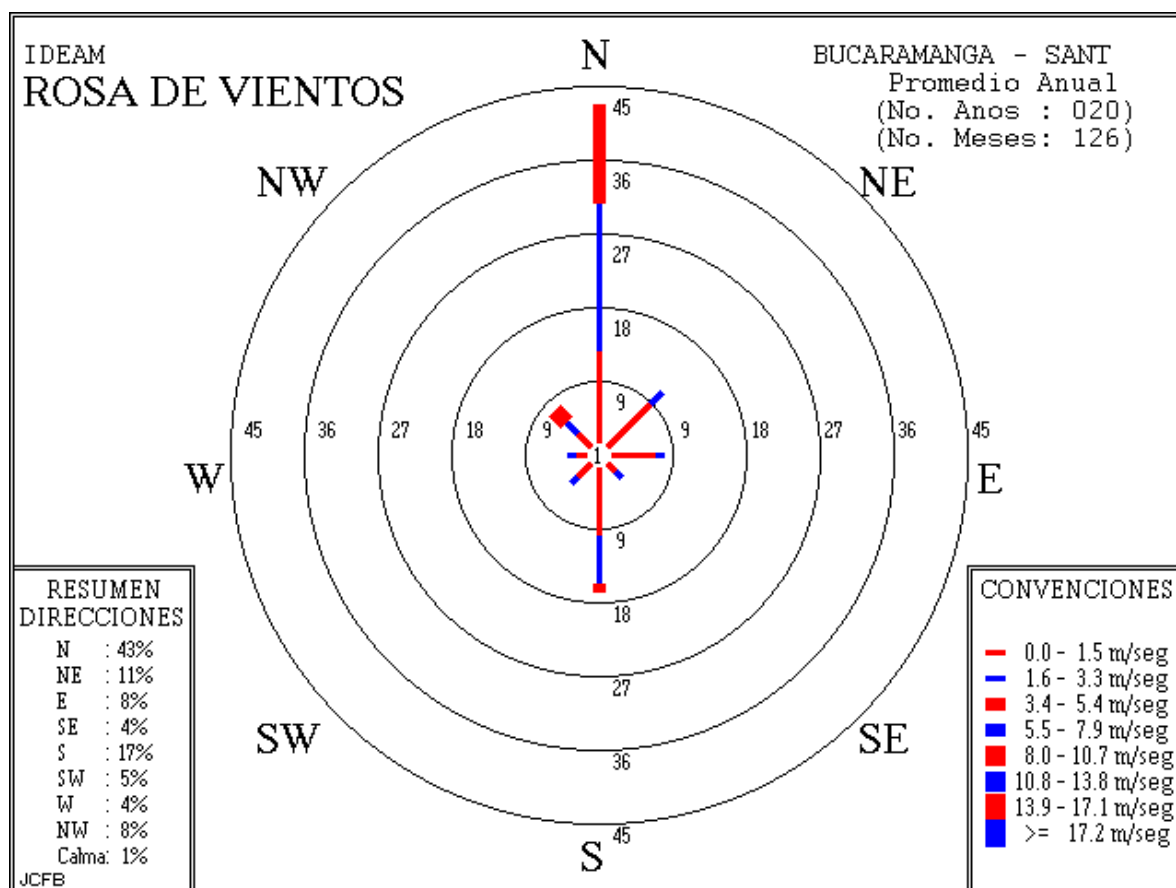
Fuente: Autor

Anexo F. Interfaz gráfica software SCREEN VIEW.



Fuente: Screen View User's guide. Lakes Environmental Company. Waterloo, Ontario, Canadá.

Anexo G. Rosa de vientos de la ciudad de Bucaramanga



Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.