

MODELO CALIDAD DEL AIRE

AIR QUALITY MODEL

Diego Alejandro Bernal Cortes

Ingeniero Ambiental, Especialista en Modelamiento de la calidad del aire Universidad Católica de Chile, MCS Consultoría y Monitoreo Ambiental, Coordinador del Área de Geomática, Bogotá, Colombia
alejo1985@hotmail.com

RESUMEN

Al analizar la problemática que tiene actualmente el país, con respecto a los niveles de contaminación generados por los procesos en minería me surge la necesidad de estudiar cómo estos procesos afectan e impactan no solo al medio ambiente, sino también a la población cercana a dichos procesos extractivos en sus fases de producción actual y una fase de producción en periodo seco, un periodo de humedad o invernal, para desarrollar este proyecto encontraremos necesarios desarrollar unos factores que se hacen importantes para el modelo de dispersión de contaminantes como son: La topografía del terreno, ubicación y cantidad emitida por las fuentes de emisión contaminantes de interés, metodología y coberturas de uso del suelo, presencia de estructuras u obstáculos sobre las corrientes de viento respecto a las fuentes de emisión.

Palabras Clave: Niveles de contaminación, minería, modelo de dispersión medio ambiente, contaminantes.

ABSTRACT

By analyzing the problems that currently has the country with respect to pollution levels generated by mining processes arises I need to study how these processes affect and impact not only the environment, but also to the population of those processes extractive current production stages and a production phase in dry period, a period of moisture or winter, to develop this project will find necessary to develop some factors are important for pollutant dispersion model such as: the topography of the land , location and amount emitted by contaminants emission sources of interest, methodology and coverage of land use, presence of structures or obstacles on wind currents regarding emission sources.

Keywords: Levels of contamination, mining, environmental dispersion model.

INTRODUCCION

Según el documento “Norma de Calidad de Aire” expedido por la subdirección de Estudios Ambientales del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) (Convenio de Asociación 112/04), desde la década del 70 se ha venido trabajando para implementar una normatividad que permita proteger el medio ambiente de las continuas emisiones atmosféricas, así como prevenir una contaminación a gran escala y con ello una alteración a la salud de los habitantes de la región y del país.

Los estudios sobre la calidad del aire están asociados con la evaluación de la alteración de sus propiedades físicas y químicas, cualquiera que sea el mecanismo de incorporación (biogénico y/o antropogénico) en la masa de aire en estudio. Estos compuestos pueden presentarse como partículas sólidas, gotas líquidas, gases o mezclas de estas formas¹.

Las concentraciones de contaminantes del aire en un punto determinado dependen de la tasa de emisión a la atmósfera su dispersión y eliminación. La velocidad con que los compuestos del aire se dispersan, depende directamente de factores meteorológicos, como la velocidad y dirección del viento, turbulencia y estabilidad atmosférica, además de otros factores físicos como la humedad relativa, temperatura y presión.

Con el propósito de determinar las emisiones de material particulado respirable (PM10) como principal contaminante al aire en la actividad minera, así como las emisiones de otros contaminantes como el dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂) y monóxido de carbono (CO).

El modelamiento se llevó a cabo en el escenario de producción actual, en el caso del estudio la producción promedio de los últimos años (2009 a 2013) es de 90,000 m³/año (64 m³/hora en promedio). La modelación se realizó con diferentes tiempos de ponderación en tiempo seco (verano) para la producción actual, con el fin de establecer el comportamiento de los contaminantes respecto a la normatividad ambiental vigente y las concentraciones de fondo encontradas en las campañas de monitoreo de calidad del aire.

¹ MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 610 de 2010. Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el Territorio Nacional en Condiciones de Referencia. Bogotá. 2010.

Para el estudio se encuentra estructurado de la siguiente manera: Inicialmente se encuentran los objetivos, seguido de una breve descripción técnica de la metodología empleada para la evaluación del comportamiento de los contaminantes: material particulado respirable expresado como PM-10, dióxido de nitrógeno expresado como NO₂, dióxido de azufre expresado como SO₂ y monóxido de carbono expresado como CO; los resultados obtenidos y su comparación con las normas de calidad vigentes, las conclusiones del estudio, la bibliografía y finalmente los anexos dentro de los cuales se incluyen: los datos meteorológicos empleados, los archivos de entrada y salida de la modelación, la información cartográfica y las planchas donde se identifican las isoclinas correspondientes a la modelación.

1. TOPOGRAFIA DEL ÁREA DE INFLUENCIA DEL PROYECTO

El área general del proyecto se encuentra localizado en el sector de la Isla del Sol, jurisdicción del municipio de Ricaurte en el departamento de Cundinamarca, a 2 km del municipio de Melgar vía Girardot, amparado bajo el contrato de concesión minera No. 00000 del 01 de enero de 1993, adicionalmente cuenta con 10 hectáreas para beneficio, almacenamiento del material y áreas administrativas entre otras (Ver **Tabla 1**); en la siguientes coordenadas

	Este	Norte
1	921.460	921.460
2	921.460	921.460
3	920.260	921.460
4	920.260	921.460

Tabla 1: Coordenadas del área de estudio, Datum Magna Sirgas Origen Bogotá

2. INVENTARIO DE FUENTES ATMOSFERICAS

La industria existen diferentes procesos que, por razón de su naturaleza o por necesidades energéticas, producen y expulsan gases y partículas contaminantes a la atmósfera que son capturadas por fuentes de inmisión o receptores, por tal razón en los siguientes numerales se realiza un inventario de dichas fuentes a fin de cuantificar las emisiones de dichos procesos.

El principal contaminante emanado por la actividad productiva de la industria minera es el material particulado, y es este el contaminante que genera mayores conflictos con la comunidad ya que puede generar problemas de salud pública al incrementarse este contaminante en especial las partículas respirables (PM10) en el ambiente.

Factores de emisión fuentes fijas y difusas.

Los factores de emisión y los inventarios de emisiones han sido herramientas fundamentales para el manejo de la calidad del aire. La estimación de emisiones es importante para desarrollar estrategias de control, determinar la aplicabilidad y la autorización de programas de control, establecer a priori los efectos de las fuentes evaluadas y generar estrategias de mitigación apropiadas, entre otras aplicaciones.

Un factor de emisión es un valor representativo que se relaciona con la cantidad de contaminante liberado a la atmósfera por una actividad específica. Estos factores son usualmente expresados como el peso de un contaminante dividido en una unidad de peso, volumen, distancia, o duración de la actividad que emite el contaminante (ej., kilogramos de partículas emitidas por gramo de carbón quemado). Tales factores facilitan la estimación de las emisiones y en la mayoría de los casos, los factores son simples promedios de datos disponibles y usualmente se asume que son representativos para la fuente evaluada.

La ecuación general de un factor de emisión está dada por:

$$E = A \times EF \times (1 - ER/100)$$

Dónde: E = emisiones,

A = nivel de actividad,

EF = factor de emisión, y

ER = eficiencia del sistema de control, %.

Para la estimación de los factores se consideran dos pasos principales. Primero, es la calidad de los datos sobre los cuales se estiman los factores y segundo está relacionado con la capacidad de que el factor este en la capacidad de permanecer como un factor de emisión promedio de aplicación nacional para la fuente de interés.

Las pruebas de calidad de los datos están clasificadas de la A a la D como sigue:

A = Las pruebas fueron realizadas por una metodología reconocida y son reportadas con suficiente detalle para una validación adecuada.

B = Las pruebas son realizadas por una metodología reconocida, pero falla en datos suficientes para una adecuada validación.

C = Las pruebas son realizadas en una no aprobada o nueva metodología, o falla en una cantidad significativa de información de las fuentes.

D = Las pruebas son basadas en un método general no aprobado, pero el método un orden de magnitud en la estimación del factor.

La representatividad de la calidad del factor está clasificada de la A a la E como se muestra a continuación:

Excelente. El factor es desarrollado de una prueba de calidad de datos clasificada como A o B a partir de muchas fuentes de datos al azar en la población industrial. Por lo tanto, el grupo de fuentes muestreado es suficientemente específico para minimizar la variabilidad.

Sobre el promedio. El factor es desarrollado de una prueba de calidad de datos clasificada como A o B a partir de un número razonable de fuentes. Sin embargo, no se evidencia una desviación típica, y no es claro si las pruebas representan una muestra aleatoria del tipo de industria. Así como la clasificación A, el grupo de fuentes muestreado es suficiente para minimizar la variabilidad.

Promedio. El factor es desarrollado de una prueba de calidad de datos clasificada como A, B y/o C a partir de un número razonable de fuentes. Sin embargo, no se evidencia una desviación típica, y no es claro si las pruebas representan una muestra aleatoria del tipo de industria. Así como la clasificación A, el grupo de fuentes muestreado es suficiente para minimizar la variabilidad.

Por debajo del promedio. El factor es desarrollado de una prueba de calidad de datos clasificada como A, B y/o C a partir de un pequeño número de fuentes, y puede haber razones para sospechar que las fuentes referenciadas no representen una muestra aleatoria del tipo de industria. También puede haber evidencia de variabilidad dentro del grupo de fuentes muestreado.

Pobre. El factor es desarrollado de una prueba de calidad de datos clasificada como C y D, y puede haber razones para sospechar que las fuentes referenciadas no representen una muestra aleatoria del tipo de industria. También puede haber evidencia de variabilidad dentro del grupo de fuentes muestreado.

Es por esto que a la hora de seleccionar el factor de emisión debe tenerse en cuenta la anterior clasificación, la cual muchas veces por la disponibilidad de datos es necesario seleccionar factores de emisión con baja calidad si no es posible estimarlos por balance de masa o mediciones directas con la información disponible.

Factores de emisión fuentes móviles

Históricamente la EPA ha actualizado el reporte "Compilation of Air Pollutant Emission Factors." "Volume I: Stationary Point and Area Sources" para Fuentes fijas. Para Fuentes móviles el reporte "Volume II: Mobile Sources" (commonly referred to as "AP-42") de la EPA no siguió reportándose. Recientes factores de

emisión están disponibles por el uso de los modelos de Fuentes móviles en la Oficina de Transporte y Calidad del Aire (OTAQ).²

Los factores disponibles para fuentes móviles se basan en los datos fabricación y de diseño de los motores de los diferentes tipos de equipos y fabricantes, y debido a las regulaciones en cuanto a emisiones, los factores de emisión son referenciados a la normatividad cuando el equipo asegura que su diseño cumple con las especificaciones de las regulaciones EPA.

3. INVENTARIO DE FUENTES DE EMISION

A continuación, se describen los diferentes tipos de fuentes de emisión de partículas y gases a la atmósfera (según el Decreto 948 de 1998, resolución 610 de 2010 expedidas por el MAVDT hoy MADS y el Protocolo para el Seguimiento de la Calidad del Aire de Octubre de 2010 expedido por el mismo ente) para el área de estudio, referenciándose a continuación cada tipo de fuente:

➤ Fuentes de emisiones fijas puntuales

Son aquellas que emiten contaminantes al aire por ductos o chimeneas³. los desfuegos de los tanques de almacenamiento de combustible, sin embargo estas no son consideradas dentro del modelo de dispersión de contaminantes por no representar un contaminante de interés dada la actividad productiva (minería) y la baja emisión de estos contaminantes.

➤ Fuentes de emisiones fijas dispersas o difusas

Son aquellos en que los focos de emisión de una fuente fija se dispersan en un área, por razón del desplazamiento de la acción causante de la emisión.

Este es el principal tipo de emisión encontrado en la actividad productiva de las minas, ya que por actividades como el uso de las vías de acceso, acopio de material inorgánico (almacenamiento directo de material extraído), proceso de cargue/descargue, trituración y transporte de material, se generan emisiones de material particulado y otros gases al emplear combustibles para realizar dichas actividades.

Para determinar las fuentes de emisión, a continuación se presenta un resumen del proceso de producción:

² US EPA AP-42: Compilation of Air Pollutant Emission Factors. Transport and Air Quality. Disponible en: <http://www.epa.gov/oms/ap42.htm>

³ Ministerio de medio ambiente. Decreto 948 de 1995. Bogotá 1995

- En el sector de Ricaurte, el río Magdalena presenta la tendencia de ensanchar su cauce y desarrollar barras fluviales e islas, denominado comúnmente Isla del Sol, la cual tiene como característica que contiene un nivel de gravilla recubierto por arenas.
- *Descripción de las operaciones:*
El sistema de explotación del proyecto es a cielo abierto, a través del método de dársenas, que consiste en la conformación de recuadros intercalados de 70 m X 30 m y una profundidad de 2 m aproximadamente
En cuanto a las operaciones mineras estas consisten en el arranque del material: el cual se realiza con retroexcavadora de marca Caterpillar; cargue y transporte interno que se realiza directamente a las volquetas Dumper marca Caterpillar de capacidad de 40 toneladas; el lavado y trituración en la planta de beneficio; el transporte externo lo realizan los compradores del material en volquetas de diferentes capacidades.

En el beneficio del material extraído del río se utiliza agua, el sobrante de esta, se reutiliza incorporándola al proceso. En la trituración se obtienen tres tipos de materiales los cuales siempre están húmedos lo que no permite la dispersión de material particulado. Las arenas, gravillas y gravas son almacenadas en pilas de 5 a 7 metros de altura, donde llegan las volquetas a recoger el material, transportándolo por la vía interna del predio, la cual se encuentra sin pavimentar. En cuanto a las volquetas, estas son pesadas y carpadas al salir de los predios del proyecto, para evitar que salgan sobrecargadas y se puedan provocar derrames de material húmedo y emisión de partículas en la zona de influencia. En la **Figura 3** se muestra una descripción de las diferentes áreas dentro del área de producción de mineral.



Figura 3 Área de trituración y los patios de acopio de material.

Descripción del proceso de trituración

1. La trituración inicia con la llegada del crudo (material de río) a una tolva que cuenta con una capacidad de 60 m³ aproximadamente, está la entrega a un

dosificador o alimentador y luego la pasa a una banda transportadora de (20,5m) de largo que lo conduce a la primera zaranda vibratoria.

2. La zaranda o criba hace la clasificación de tres tipos de material; la arena natural, la gravilla y gravas:

- ✓ La arena natural (0" – 5/16") utiliza el sistema de lavado, pasa a una noria que elimina el exceso de agua y de esta a una banda transportadora (24,5m) de largo, para su almacenamiento final.
- ✓ Las gravillas (5/16" – 1/2") salen a través de otra banda transportadora (15,72m) y llegan a un molino vertical para su fracturación
- ✓ Las gravas (1/2" – 15/16") son transportadas en una banda (6,40m) hasta un molino impactor donde se realiza el proceso de trituración, de ahí el material triturado es transportado por otra banda (18,23m) y también el material fracturado del molino vertical es transportado en una banda de (12,40m), esta se une a la banda anterior. De allí llegan a la segunda zaranda vibratoria, donde se hace la clasificación y se obtienen cuatro productos; la arena de trituración el cual llega una noria donde es retirado el exceso de agua y de aquí es transportado por una banda (18,23m) para su posterior almacenamiento. El segundo producto es un triturado de 1/2" que también es llevado en banda transportadora (18,23m) para su posterior almacenamiento. El tercer producto es un triturado de 3/4" que es transportado de en una banda (18,23m) al acopio y el cuarto producto es un sobre tamaño que es llevado nuevamente al impactor por una banda (24,3m) para que nuevamente realice el ciclo y disminuya su tamaño.

3. Por último el agua sobrante del proceso de trituración es reutilizada para el mismo.

- Vías de acceso externas e internas

Para este artículo se pretende la utilización como acceso externo la carretera Panamericana, esta vía corresponde a la red primaria o Nacional (Autopista Bogotá – Girardot), la cual se encuentra en óptimas condiciones y cuenta con un sistema de ciclo rutas. El proyecto cuenta con una vía de acceso interno al área de beneficio y a la zona de explotación, en recepción con una longitud de aproximadamente 1.7 km, y un ancho que varía entre de 8 m y 12 m. Según lo evidenciado en campo, muchas de las vías que comunican los diferentes barrios de los municipios del área de influencia del proyecto y todas las vías dentro del área de explotación se encuentran sin pavimentar, provocando que la fuerza (rozamiento) de las llantas de los vehículos contra la superficie del camino cause pulverización del material en la superficie levantando partículas, estando estas expuestas a fuertes corrientes de aire; la turbulencia levantada detrás del vehículo continúa en la superficie del camino después de que el vehículo ha pasado, evidenciándose como una fuente de material particulado a la atmósfera.

Se procede a establecer los factores de emisión más apropiados dependiendo del tipo de actividad. En la **Tabla 2** se establecen los factores de emisión para las actividades identificadas en la actividad minera de estudio.

Tabla 2 Factores de emisión para material particulado respirable PM10 de las fuentes de emisión dispersas identificadas en la actividad minera de estudio para el escenario actual.

ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN	FACTOR DE EMISIÓN PM10	UNIDADES	CALIDAD FACTOR	FUENTE
Vías de acceso	Actividad de transporte de mineral extraído y procesado	Ecuación 1(a) $E = k (s/12)^a (W/3)^b$ Para vías destapadas en zonas industriales.	Lb/VMT	B	US EPA AP-42 Cap. 13.2.2
Clasificación en las zaranda inicial con humectación	Emisión de material particulado por efecto del movimiento del material sobre una superficie abierta	0,0037 (factor con sistema de control en este caso humectación)	kg/Mg	C	US EPA AP-42 Cap. 11.19.2
Trituración	Emisión de material particulado por efecto de la trituración en la Trituradora vertical y la trituradora con impactor	0,0075*	kg/Mg	C	
Clasificación en las zaranda final con humectación	Emisión de material particulado por efecto del movimiento del material sobre una superficie abierta	0,0011 (factor con sistema de control en este caso humectación)	kg/Mg	E	
Descarga de material sobre las pilas o sobre volquetas	Operaciones realizadas para recolectar y descargar por medio de maquinaria pesada o las bandas transportadoras el materia crudo o procesado lo que genera emisiones de material particulado por acción del viento.	$E = K(0,0016)(U/2,2)^{1,3}/(M/2)^{1,4}$	kg/Mg	A o B**	US EPA AP-42 Cap. 13.2.4
Descarga de material sobre el dumper	Descarga de material en la zona de extracción sobre el DUmper que transporta el material a la planta				
Erosión eólica de áreas expuestas***	Fenómeno causado por acción del viento sobre las áreas intervenidas a cielo abierto.	0,425****	Mg/ (ha x año)	C	US EPA AP-42 Cap. 11.9.2 NPI EETM for Mining

* Se toma el factor de la AP 42 para trituración de finos sin control ya que aplica para tamaños de partículas de 5 a 25 mm cercanos al rango de producto triturado (1 a 16 mm) ** El factor de clasificación baja de A a B dependiendo de las propiedades de humedad y limos*** Se tomará el mismo factor de emisión para las vías destapadas sin paso de vehículos. ****Debido a que no se dispone de un factor de emisión de la EPA para PM10, se toma como referencia la proporción PST/PM10 empleada por la NPI Australia.

- Fuentes de emisión difusas o dispersas no consideradas
- Otros contaminantes identificados en fuentes de emisión difusas en el área de estudio como compuestos orgánicos volátiles (COV's) e hidrocarburos totales (HCT) provienen de actividades como cargue y almacenamiento de los combustibles, no se incluyen dentro de los modelos de dispersión dada la

complejidad del modelamiento de este tipo de contaminantes y su baja emisión y trascendencia a la población; sin embargo, es importante mantener el control de buenas prácticas de manejo de estos materiales lo cual no solo evitará explosiones y daños a los trabajadores, sino también evitará la contaminación del suelo, cuerpos de aguas y calidad del aire en el ambiente de trabajo.

Cabe resaltar que para el modelo de dispersión no se incluyen fuentes de emisión dispersas o difusas externas o ajenas al proyecto como por ejemplo las fuentes naturales (la erosión eólica de las áreas descubiertas no se consideran fuentes naturales por ser generadas de la actividad antrópica) y las fuentes generadas por la actividad de la población (quema de basura, arado de tierras, cocción de alimentos, ganadería, agricultura, emisión de partículas por rodadura de la maquinaria de transporte propia de la población, etc.) las cuales se describen a continuación:

Dentro del área de influencia del proyecto, se observó actividad ganadera (ganado vacuno) en pequeña proporción, por lo que se considera una fuente menor relacionada con la generación de gas metano debido a los procesos bioquímicos que llevan a cabo los animales por la digestión y la degradación de sus desechos orgánicos

Se observó además, que en algunos sectores del área del proyecto, es costumbre de la comunidad que habita el sector y de los turistas, la utilización de leña como combustible para la preparación de sus alimentos, contribuyendo de esta manera a la emisión de material particulado a la atmosfera. Así mismo, se evidenció la disposición a cielo abierto de residuos sólidos y su posterior incineración, lo que advierte emisiones de material particulado y demás contaminantes relacionados con la composición del residuo quemado. De igual manera se observó quema de vegetación en la ronda del río Magdalena, con el fin de que el humo actúe como un repelente contra los mosquitos

➤ Fuentes de emisiones móviles

Las fuentes móviles como su nombre lo indica, son todos aquellos instrumentos, equipos u organismos que generan algún tipo de emisión y que trasladan su posición de un lugar a otro.

Las observaciones realizadas detallan que la mayoría de las fuentes móviles presentes en el área se constituyen por vehículos pesados como retroexcavadoras, máquinas de carga y volquetas que circulan dentro del área de explotación de materiales de construcción, extrayendo, cargando y transportando el material crudo y procesado. Adicionalmente se evidencia el tránsito constante

de vehículos livianos y pesados por la vía nacional, cruzando esta vía de manera transversal el área de influencia del proyecto.

Una vez identificadas las fuentes de emisión móviles, se procede a determinar los factores de emisión apropiadas. En la **Tabla 3** se establecen los factores de emisión para las actividades identificadas en la actividad minera de estudio.

Tabla 3 Factores de emisión de las fuentes de emisión móviles identificadas en la actividad minera de estudio.^{1,2}

FUENTE DE EMISIÓN	POTENCIA MOTOR (hP)	CONSUMO DE COMBUSTIBLE	PESO SIN CARGA (ton)	REG. EPA*	FACTOR DE EMISIÓN HC/CO/NO ₂ /PM10** (g/hp-h) y SO ₂ (g/h)
Maquina de carga D400eII Ejector	405	10-12 gal/hora	40	Tier 3	0,2/1,0/2,8/0,2 y 280,3
Draga Eléctrica Shark Dredge	800	18-22 gal/hora	77	Tier 2	0,3/1,0/4,5/0,2 y 509,7
Retroexcavadora Caterpillar 345c LME	345	10-12 gal/hora	45	Tier 3	0,2/1,0/2,8/0,2 y 280,3
Cargador Caterpillar 938gII	160	4,5 gal/hora	13	Tier 2	0,4/1,0/4,5/0,2 y 114,7
Volquetas (0-8m ³)	120-130	4 gal/hora	15	Tier 1	0,4/1,0/6,9/0,2 y 101,9
Volquetas (8-16m ³)	270	8 gal/hora	18	Tier 1	0,4/1,0/6,9/0,2 y 203,9
Volquetas (16-35m ³)	400-450	10-12 gal/hora	30	Tier 1	0,3/1,0/6,9/0,2 y 280,3

Fuente: 1 US EPA Exhaust Emission Factors for Nonroad Engine Modeling--Compression-Ignition Report No. NR-009A. 2 Fichas técnicas de los equipos.

En la **Tabla 3**, se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- Los factores de emisión están asociados a las regulaciones Estadounidenses en materia de fuentes móviles, la cual se clasifica como Tier 1, 2 o 3 dependiendo del modelo de fabricación del motor asociado al equipo.
- Para fines del estudio, los óxidos de nitrógeno (NOx) reportados por el AP-42 se tomarán expresados como dióxido de nitrógeno (NO₂). Se supone una proporción PST/PM10 del 50% ya que la EPA solo reporta PST.
- Por información disponible se realiza la suposición que las volquetas tienen una capacidad promedio hasta de 35m³ con motores entre 120 y 400 hp, y su año de fabricación son entre los años 1996 a 2001.

Así mismo, en la **Tabla 3**, la EPA contempla emisiones de dióxido de azufre en el combustible dadas las regulaciones ambientales en el país cuyo valor depende de la composición de azufre en la fuente, por tal motivo, para SO₂ se emplea el factor de emisión estimado a partir del factor de emisión para ACPM en Colombia.⁴

4. INVENTARIO DE FUENTES DE INMISIÓN O RECEPTORES

Para el modelo de dispersión es importante establecer cuáles son las fuentes de inmisión o receptores afectados por la actividad minera.

⁴ Factores de emisión para combustibles colombianos. Unidad de Planeación minero Energética (UPME). Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN). Consultada en Junio 3 de 2012. Disponible en: http://www.siame.gov.co/siame/documentos/documentacion/mdl/HTML/18_FECOC.htm

Los principales receptores de emisión encontrados en el área de monitoreo son los trabajadores de la planta y los habitantes que se encuentran dentro del área de influencia del proyecto. De esta manera los principales receptores son condominios, hoteles y zonas de descanso que se encuentran en la ronda del área del proyecto, además de los habitantes del municipio de Flandes que se encuentran hacia el extremo sur y sureste del área de influencia del proyecto, teniendo en cuenta que hacia allí predominan los vientos.

5. METEOROLOGÍA Y COBERTURA DE USOS DEL SUELO

Ya que la dispersión de contaminantes se da bajo las propiedades físicas en la columna del aire, es necesario caracterizar las propiedades de estas variables en el modelo de dispersión.

Debido a la poca disponibilidad de información meteorológica horaria detallada que esté cerca de la zona de estudio, la información meteorológica fue modelada a través del modelo a mesoescala MM5 por un proveedor extranjero el cual es directamente alimentado al programa de modelamiento AERMOD VIEW 8.1

Además de las propiedades físicas superficiales, los datos modelados entregan también las propiedades físicas de la columna del aire (meteorología de altura), importante para determinar propiedades de los gradientes de temperatura vertical (temperatura potencial de aire seco, equivalente de aire húmedo y virtual de aire seco), virtual, y demás propiedades relacionadas con la capa límite de mezclado y estabilidad atmosférica (fenómenos de turbulencia) de los contaminantes.

Finalmente, se requieren cálculos de parámetros secundarios para establecer propiedades del suelo que interfieren en la dispersión de los contaminantes. Es por esto que dependiendo del uso del suelo y las propiedades del mismo se debe parametrizar parámetros secundarios los cuales ya están predeterminados y se deben seleccionar en la modelación. En la **Tabla 4** se observa la clasificación de los usos del suelo basado en el conjunto de datos nacionales de cobertura del suelo del USGS en 1992 (NLCD92 por sus siglas en Inglés) ⁵ para Estados Unidos y su equivalencia con la metodología CORINE Land Cover ⁶ adoptada a nivel nacional para facilitar la selección en la modelación.

⁵ AERSURFACE User's Guide EPA-454/B-08-001. Enero 2008. Disponible en: http://www.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aersurface_userguide.pdf

⁶ Leyenda Nacional de Cobertura de La Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia escala 1:100,000. Instituto de Estudios Ambientales IDEAM. Junio 2010.

Tabla 4: Clasificación del uso de suelo NLCD92 y su equivalencia con la metodología nacional CORINE LAND COVER

NUMERO DE CLASE NLCD92	DESCRIPCIÓN NLCD92	EQUIVALENCIA CORINE LAND COVER
11	<i>Agua Abierta:</i> Todas las áreas de agua abierta, por lo general con menos del 25% de cobertura de la vegetación / tierra.	5. Superficies de agua 5.1. Aguas continentales
12	<i>Hielo Perenne/Nieve:</i> todas las zonas caracterizadas por una cubierta de superficie un año de duración de hielo y / o nieve.	3. Bosques y áreas seminaturales 3.3 Áreas abiertas, sin o con poca vegetación 3.3.5. Zonas nivales o glaciares
21	<i>Baja Intensidad Residencial:</i> Incluye áreas con una mezcla de materiales construidos y vegetación. Materiales construidos representan 30-80% de la cubierta. Vegetación está de 20 a 70 % de la cubierta. Estas áreas incluyen comúnmente viviendas unifamiliares. Las densidades de población son más bajas que en las zonas residenciales de alta intensidad.	1. Territorios artificializados 1.1 Zonas urbanizadas 1.1.2 Tejido urbano discontinuo
22	<i>Alta Intensidad Residencial:</i> Incluye áreas altamente desarrolladas donde la gente reside en masa. Ejemplos incluyen complejos de apartamentos. La vegetación cubre menos del 20 % de la cobertura. Materiales construidos están por el orden del 80% de la cobertura.	1. Territorios artificializados 1.1. Zonas urbanizadas 1.1.1 Tejido urbano continuo
23	<i>Comercio, Industria y Transporte:</i> Incluye infraestructura (e.g. vías, trenes, etc.) y todas las áreas comerciales desarrolladas no clasificadas dentro de la zona residencial alta.	1. Territorios artificializados 1.2. Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación.
31	<i>Roca Pelada, Arena, Arcilla:</i> Áreas descubiertas de roca y desiertos.	3. Bosques y áreas seminaturales 3.3 Áreas abiertas, sin o con poca vegetación 3.3.1 Zonas arenosas naturales 3.3.2. Afloramientos rocosos 3.3.3 Tierras desnudas o degradadas
32	<i>Canteras, Minas de Transferencia, Pozos de Grava:</i> Áreas de explotación minera	1. Territorios artificializados 1.3 Zonas de extracción minera y escombreras
33	<i>Transicional:</i> Áreas de vegetación dispersa (menos del 25% de la cobertura) que cambia dinámicamente de una cobertura a otra, generalmente a causa de las actividades de uso de suelo. Ejemplos: poda de bosques, transición entre agricultura y bosques, vegetación temporal y cambios por causas naturales (e.g. incendios, inundaciones, etc.)	1. Territorios artificializados 1.4 Zonas verdes artificializadas, no agrícolas 2. Territorios agrícolas 2.4. Areas agrícolas heterogéneas
41	<i>Bosque Deciduo:</i> Áreas dominadas por árboles donde el 75% de las especies cambian el follaje en respuesta a la estación climática.	3. Bosques y áreas seminaturales 3.1. Bosques 3.1.2. Bosque abierto
42	<i>Bosque Siempre Verde:</i> Áreas dominadas por árboles donde más del 75% de las especies mantienen sus hojas todo el año.	3. Bosques y áreas seminaturales 3.1. Bosques 3.1.1. Bosque natural denso 3.1.4. Bosque de galería ripario 3.1.5 Plantación forestal
43	<i>Bosque Mixto:</i> áreas dominadas por mezcla de árboles que cambian o no su follaje con la estación climática.	3. Bosques y áreas seminaturales 3.1. Bosques 3.1.3. Bosque natural fragmentado
51	<i>Arbustos:</i> áreas dominadas por vegetación leñosa natural o seminatural con extensiones aéreas, generalmente menos de 6 m de alto, con individuos o grupos sin tocarse entre ellos. La cobertura de arbustos es de alrededor de 25 a 100% y los árboles dispersos representan menos del 25% de la cobertura.	3. Bosques y áreas seminaturales 3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva 3.2.2. Arbustal 3.2.3 Vegetación secundaria o en transición 3.2.3.1 Vegetación secundaria alta
61	<i>Huertas, Viñedos, Otros:</i> áreas plantadas y mantenidas para la producción de frutas, nueces, fresas, o plantar ornamentales.	2. Territorios agrícolas 2.2 Cultivos permanentes 2.2.2 Cultivos permanentes arbustivos 2.2.3 Cultivos permanentes arbóreos
71	<i>Pastizales, Herbáceos:</i> áreas cubiertas con más del 25% en herbáceos y exceden la cobertura de los arbustos.	2. Territorios agrícolas – 2.3 Pastos 3. Bosques y áreas seminaturales 3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva 3.2.1.1. Herbazal denso 3.2.1.1.1 Herbazal denso de tierra firme 3.2.1.2 Herbazal abierto 3.2.3 Vegetación secundaria o en transición 3.2.3.2 Vegetación secundaria baja
81	<i>Pasto/forraje:</i> áreas de pastos, legumbres, o mezclas de pastos-legumbres.	2. Territorios agrícolas 2.1 Cultivos transitorios 2.2 Cultivos permanentes
82	<i>Cultivos en hilera:</i> Áreas usadas para la producción de granos como maíz, frijol, vegetales y tabaco.	
83	<i>Cultivos pequeños granos:</i> Áreas usadas para la producción de granos como trigo, avena y arroz.	
84	<i>Barbrecho:</i> Áreas usadas para la producción de granos que no exhiben vegetación como resultado de actividades de trillado	

85	Áreas urbanas/recreacionales: Áreas mezcladas entre urbanización y vegetación para fines recreacionales, anti erosivos o estéticos.	1. Territorios artificializados 1.4 Zonas verdes artificiales, no agrícolas
91	Humedales leñosos: Áreas con vegetación se presenta del 25 al 100% de la cobertura y la superficie es periódicamente cubierta con agua.	4. Áreas húmedas
92	Humedales herbáceos emergentes: áreas con herbazales perennes que cubren del 75 a 100% la cobertura y la superficie es periódicamente cubierta con agua.	3. Bosques y áreas seminaturales 3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva 3.2.1.1Herbazal denso 3.2.1.1.2 Herbazal denso inundable

Fuente: AERSURFACE. EPA-454/B-08-001

En resumen los datos meteorológicos modelados arrojan los siguientes parámetros:

Calor sensible (W/m^2).	Calor sensible (W/m^2).
Velocidad conectiva (m/s).	Gradiente de Temperatura vertical potencial sobre la capa limite planetaria.
Altura de convección generada sobre la capa limite (m).	Altura mecánica generada en la capa límite (m).
Longitud de Monin Obukhov (m).	Longitud de rugosidad superficial (m).
Relación de Bowen.	Albedo.
Velocidad del viento (m/s)	Dirección del viento ($^{\circ}$).
Temperatura (K)	Velocidad de precipitación (mm/hr)
Humedad relativa (%)	Presión barométrica (mb)

Para la descripción climática general a partir de la información de estos datos modelados, se obtienen los gráficos de comportamiento de cada variable meteorológica entre las cuales se seleccionan temperatura ($^{\circ}C$), precipitación total anual (mm), humedad relativa (%), nubosidad o cobertura nubes (octas), dirección ($^{\circ}$) y velocidad de viento (m/s) con la respectiva rosa de viento y la altura de capa de mezcla (m). Adicionalmente se describe el balance hidroclimático⁷ y la zonificación climática en la zona de estudio.

6. ESTRUCTURAS Y BARRERAS EN LA ZONA

Las estructuras y barreras presentes en el área de estudio son importantes para la dispersión de contaminantes ya que pueden generar cambios en los flujos de viento y por lo tanto alteran la dispersión de los contaminantes.

En el proyecto se identifican dos jarillones construidos sobre el cual se implementó con una barrera viva de Limón Swinglea de 2,20 m de alto. Las barreras se encuentran a cada costado del predio y miden 424m y 440m, con el fin de mitigar la dispersión de material particulado y ruido a los predios vecinos los cuales son utilizados como centros turísticos y de descanso.

7. MODELACION EN EL SOFTWARE AERMOD VIEW

⁷ MONSALVE. S. German. Hidrología en la ingeniería. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Segunda edición. Colombia. 1955. Pág. 159 y 160.

Generalidades⁸

La dispersión de contaminantes en la atmósfera sigue los mismos principios físicos de mezclado de otros fluidos como el agua en un río.

Cuando una descarga vertical de aire caliente es descargada en la atmósfera libre, donde existe un viento permanente, este subirá primero y posteriormente se doblará y viajará con el viento. Este proceso diluye los contaminantes y los aleja de la fuente. Entre los procesos que generan esta dispersión se encuentran los procesos de turbulencia y variación en las condiciones atmosféricas (cambio de propiedades del fluido) que generan dispersión vertical y horizontal.

Para analizar el comportamiento de los contaminantes en un área de influencia se emplean modelos matemáticos útiles en la estimación de la calidad del aire en aquellas zonas donde no se dispone de una red de vigilancia de contaminación atmosférica, o en aquellas zonas donde el registro no sea suficiente. Naturalmente, el estudio de tal influencia se puede determinar a través del modelamiento físico o químico.

Para su estudio, los modelos se pueden agrupar en cuatro clases genéricas: gaussianos, numéricos, estadísticos o empíricos y físicos. Entre los modelos más conocidos se encuentran los siguientes:

CALPUFF Modeling System

Es un modelo en estado inestable (muestra el comportamiento de la emisión de contaminantes que varían en función del tiempo), de múltiples capas (turbulento y laminar) y de multicomponentes y que simula los efectos del tiempo y el espacio con las condiciones meteorológicas sobre el transporte de contaminantes. Este modelo puede ser aplicado en escalas de decenas a cientos de kilómetros. Incluye algoritmos para efectos de escala superficial (ej. adsorción en el terreno), tan bien como efectos en amplio rango (tales como remoción del contaminante debido a la impregnación húmeda y deposición seca, transformación química, y efectos de visibilidad de las concentraciones de material particulado).

AERMOD Modeling System

Es un modelo en estado estable es decir que genera los resultados de emisión de contaminantes a manera constante, es decir genera el mapa de dispersión a condiciones específicas en un día a un flujo constante de emisión, que incorpora la dispersión del aire basados en la turbulencia de las regiones aledañas a la región de medición y conceptos de escalamiento, incluidos las fuentes superficiales y elevadas y en terrenos simples y complejos. Este modelo está basado en el modelo ISCST3 (Industrial source Complex)

⁸ US EPA Environmental Protection Agency. Modelos de dispersión. Disponible en: <http://www.epa.gov>

Las técnicas empleadas en el modelo ISCST3 se basan en presunciones y métodos de otros modelos de dispersión anteriores, también de la EPA. Este método utiliza un modelo Gaussiano estacionario de penacho que incorpora factores relacionados con la fuente y factores meteorológicos para estimar la concentración del contaminante proveniente de las fuentes de emisión.

La distribución de las concentraciones de contaminantes en dirección vertical se encuentra afectada por la distribución vertical de velocidades. Esta distribución de velocidades en la CBL (Capa límite Convectiva), está constituida por una serie de Como consecuencia de este fenómeno, la distribución de masa de contaminantes no resulta ser gaussiana (simétrica), sino que presenta sesgo vertical positivo. Así, en condiciones convectivas, AERMOD utiliza una función de densidad de probabilidad sesgada para caracterizar la distribución vertical de concentraciones.

En AERMOD, los parámetros de dispersión horizontal y vertical son resultado de la combinación de dos efectos diferentes:

- Dispersión debida a la turbulencia ambiente.
- Dispersión inducida.

En los siguientes párrafos de este numeral describe los pasos necesarios para la elaboración del modelo de dispersión de contaminantes para el proyecto:

I. Creación de un Proyecto

En el módulo AERMET del software AERMOD VIEW, se crea un archivo .amf en donde se ingresan los datos meteorológicos y el uso de suelo y otras propiedades del área de estudio

Posteriormente se crea el proyecto en el AERMOD VIEW el cual ya incluye los datos meteorológicos.

II. Importación del plano base

Una vez creado el proyecto se importa la cartografía base del proyecto la cual puede provenir de levantamiento topográfico, bases de datos IGAC o base de datos “Geographic Information Systems Resource (GIS)”

III. Definición de fuentes de emisión e inmisión

Con la cartografía base introducida en el software, se procede definir los contaminantes a modelar y a insertar los tipos de fuentes de emisión detectados en el área del proyecto.

Posteriormente, se definen las fuentes de inmisión o receptores, para lo cual se incluye las diferentes coordenadas de las viviendas, centros poblados y demás áreas de vivienda que se encuentren en el área de influencia del proyecto. De igual manera se debe incluir una grilla de receptores ya sea de forma radial o cartesiana con el fin de establecer los límites sobre los cuales se requiere generar el mapa de concentración y que sobre estos el programa arroje las

concentraciones, esto es útil a la hora de establecer áreas ambientalmente sensibles.

IV. Opciones de dispersión

Al crear el proyecto, se debe ingresar al cuadro Control Pathway donde se presentan las opciones de dispersión. En esta se selecciona la opción Regulatory Default, opción ya incluida en el programa y el cual es la opción que emplea las regulaciones de la EPA la cual considera:

- El descenso desde la descarga de las fuentes (Stack-tip downwash). Importante en la capa límite convectiva (capa de aire cercana al suelo que se ve afectada por la convección debida al intercambio diurno de calor, humedad y momento con el suelo) ya que considera la cima de la pluma de dispersión de forma vertical desde la fuente.
- La dispersión de flotación inducida (Buoyancy – induced dispersión). Este componente es necesario para determinar la varianza corregida para los componentes horizontales.
- Las rutinas de procesamiento en estado de calma (Calms procesing routines). Es decir que no emplea correcciones por condiciones en flujo turbulento.
- Los exponentes de perfil de vientos por defecto (Default wind profile exponents).
- Los gradientes potenciales de temperatura vertical (Default vertical potential temperature gradients).

V. Contaminantes y tiempos de ponderación

En el mismo cuadro Control Pathway en la opción Pollutant/Averaging debe seleccionarse el tipo de contaminante y el coeficiente de dispersión que para el caso de estudio es rural.

En el programa AERMOD se pueden establecer tiempos de ponderación establecidos a partir de los datos empleados para realizar el modelamiento de dispersión y por lo tanto solo es útil para aclarar qué periodo se requiere que se ponderen los datos que se están ingresando al programa. Los tiempos de ponderación pueden ser horarios, diarios, mensuales o anuales. En el caso del presente estudio se realizará el modelo basado en los tiempos de ponderación horario, diario y promedio anual para su comparación con la normatividad ambiental vigente para los parámetros a modelar en el alcance del estudio PM10, NO₂ y SO₂.

VI. SALIDA DE DATOS Y RESULTADOS DE LA MODELACIÓN

Con todos los datos introducidos en el software y ejecutada la modelación, se generan datos de salida los cuales pueden ser exportados a una hoja de cálculo Posteriormente se ejecuta otra aplicación del software para generar las isopletras o líneas de igual concentración del área de estudio.

8. NIVELES DE INMISIÓN DE CONTAMINANTES Y CONCENTRACIONES DE FONDO

Para el área de influencia del proyecto se tomaron datos de un monitoreo de calidad del aire contratado para la compañía a personal externo, a fin de determinar el estado de este factor en el área

Tabla 5: Relación de las concentraciones máximas diarias obtenidas en las campañas de monitoreos de calidad del aire.

ESTACIÓN	GEORREFERENCIACIÓN* DMS - EC			CONCENTRACIÓN ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
	Norte	Este	PST	PM10	NO ₂	SO ₂	
E1 Casa Don Orlando Casas	966903	922455	---	41,0	<1,97	<18,15	<1140
E2 Doña Mercedes Robledo	965587	918697	---	79,6	<1,99	<18,94	<1140
E3 Compañía	966332	921901	256,4	---	<1,97	<18,15	<1140

*Datum Magna Sirgas Origen Bogotá.

Del monitoreo mencionado anteriormente se seleccionó la estación uno (1) por ser una estación de fondo al estar ubicada en la dirección predominante proveniente del viento y estar menos influenciada por las actuales actividades de explotación las cuales se centran en cercanías del río Magdalena; esta reporta concentraciones de diferentes contaminantes que servirá como base para establecer el aporte de la actividad minera a través del modelo de dispersión sobre las concentraciones actuales encontradas en el área de estudio.

9. NORMATIVIDAD APLICABLE A LA CALIDAD DEL AIRE

Los resultados obtenidos en la modelación son comparados con las normas vigentes de calidad del aire, las cuales se encuentran referenciadas en la Resolución 610 del 2010 expedida por el MAVDT hoy MADS. (**Tabla 6**).

Tabla 6: Estándares de calidad del aire ambiental.

PARÁMETRO	UNIDAD	RESOLUCION 610 DE 2010*
MATERIAL PARTICULADO (PM₁₀)		
Promedio Diario (24 Horas)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	100
Promedio Aritmético Anual	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	50
ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO_x)		
Promedio Diario (24 Horas)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	150
Promedio Aritmético Anual	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	100
DIÓXIDOS DE AZUFRE (SO₂)		
Promedio Diario (24 horas)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	250
Promedio Aritmético Anual	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	80
MONÓXIDO DE CARBONO (CO)		
Promedio 8 horas	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	10000
Promedio 1 hora	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	40000

* Condiciones de Referencia. (25°C y 760 mmHg).

Fuente: Resolución 610 del 24 de Marzo de 2010, Emitida por el MAVDT hoy MADS.

De acuerdo con la Resolución 610 del 2010 emitida por el MAVDT hoy MADS, se destaca que actualmente en Colombia no existe una norma específica que regule el nivel máximo permisible de los hidrocarburos totales (HCT) o de los compuestos orgánicos volátiles (COV) para la calidad del aire. De igual manera para fines de control ambiental, la Resolución 610 de 2010 establece la concentración a condiciones de referencia y el tiempo de exposición bajo los cuales se debe declarar por parte de las autoridades ambientales competentes los estados excepcionales de Prevención, Alerta y Emergencia,

Tabla 7.

Tabla 7: Concentración y tiempo de exposición de los contaminantes para los niveles de prevención, alerta y emergencia

PARÁMETRO	TIEMPO DE EXPOSICIÓN	ESTADOS EXCEPCIONALES		
		PREVENCIÓN ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ALERTA ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	EMERGENCIA ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
PM10	24 horas	300	400	500
SO ₂	24 horas	500	1000	1600
NO ₂	1 hora	400	800	2000
CO	8 horas	17000	34000	46000

* Condiciones de Referencia. (25°C y 760 mmHg).

Fuente: Resolución 610 del 24 de Marzo de 2010, Emitida por el MAVDT hoy MADS.

10. ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE (ICA)

El Índice de Calidad del Aire -ICA- (AQI – Air Quality Index) es un valor adimensional que oscila entre cero (0) y 500, el cual representa una de las herramientas más efectivas para la simple interpretación del estado en que se encuentra una atmósfera. El comportamiento de un ICA se caracteriza por su relación directa con los niveles de concentración del contaminante y los efectos en la salud. Este indicador fue desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) y en su última publicación de 2009 incluye seis contaminantes: monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), partículas menores de 10 micras (PM₁₀), partículas menores de 2,5 micras (PM_{2,5}) y Ozono (O₃). En Colombia se realiza la aplicación del indicador en tres (3) ciudades: Bogotá, Bucaramanga y Medellín y para el modelo se calcula el ICA partiendo de las concentraciones arrojadas por el mismo.

11. PUNTOS DE CORTE DEL ICA⁹

Teniendo en cuenta que el ICA tiene una correlación directa con los efectos en la salud, los puntos de corte del ICA son los límites correspondientes a efectos entre la salud y la calidad del aire. En este caso, se utiliza la información reportada por la EPA que presenta dichas relaciones. En la **Tabla 8** se presentan los puntos de corte del ICA, de acuerdo con los efectos sobre la salud reportados por estudios de la EPA (2005).

⁹Ministerio de Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial. PROTOCOLO PARA EL MONITOREO Y SEGUIMIENTO DE LA CALIDAD DEL AIRE. Manual de operación de sistemas de vigilancia de la calidad del aire. Bogotá. Agosto de 2009

Tabla 8: Puntos de corte del ICA.

ICA	COLOR	CLASIFICACIÓN	O ₃ 8h ppm	O ₃ 1h ppm ⁽¹⁾	PM ₁₀ 24h µg/m ³	PM _{2.5} 24h µg/m ³	CO 8h ppm	SO ₂ 24h ppm	NO ₂ 1h ppm
0 – 50	Verde	Buena	0,000 0,059	-	0 54	0,0 15,4	0,0 4,4	0,000 0,034	(2)
51 - 100	Amarillo	Moderada	0,060 0,075	-	55 154	15,5 40,4	4,5 9,4	0,035 0,14 4	(2)
101 - 150	Naranja	Dañina a la salud para grupos sensibles	0,076 0,095	0,125 0,164	155 354	40,5 65,4	9,5 12,4	0,145 0,224	(2)

Continuación Tabla 8: Puntos de corte del ICA.

ICA	COLOR	CLASIFICACIÓN	O ₃ 8h ppm	O ₃ 1h ppm ⁽¹⁾	PM ₁₀ 24h µg/m ³	PM _{2.5} 24h µg/m ³	CO 8h ppm	SO ₂ 24h ppm	NO ₂ 1h ppm
151 - 200	Rojo	Dañina a la salud	0,096 0,115	0,165 0,204	255 354	65,5 150,4	12,5 15,4	0,225 0,304	(2)
201 – 300	Morado	Muy dañina a la salud	0,116 0,374 (0,155 0,404) (4)	0,205 0,404	355 424	150,5 250,4	15,5 30,4	0,305 0,604	0,65 1,24
301 – 400	Marrón	Peligrosa	(3)	0,405 0,504	425 504	250,5 350,4	30,5 40,4	0,605 0,804	1,25 1,64
401 – 500	Marrón	Peligrosa	(3)	0,505 0,604	505 604	350,5 500,4	40,5 50,4	0,805 1,004	1,65 2,04

(1) Para O₃ se calculará el índice usando promedios de 8 horas y de 1 hora.

(2) Para NO₂ se tendrán en cuenta valores únicamente por encima de 200 teniendo en cuenta que han sido tomado de valores y parámetros EPA.

(3) Valores de concentraciones de 8 horas de ozono no definen valores más altos de ICA (v301). Los valores de ICA de 301 o mayores serán calculados con concentraciones de 1 hora de ozono.

(4) Los números entre paréntesis se asocian valores de 1 hora que se utilizarán en esta categoría sólo si se superponen.

Fuente: PROTOCOLO PARA EL MONITOREO Y SEGUIMIENTO DE LA CALIDAD DEL AIRE. Manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire. MAVDT.

12. RESULTADOS DE LAS MODELACIÓN Y COMPARACIÓN CON LAS NORMAS AMBIENTALES

La información alimentada al modelo de dispersión debe ser clara y debe adecuarse a los requisitos del programa para poder generar un resultado confiable. A continuación, se muestran los resultados obtenidos para cada factor asociado al modelo de dispersión, las suposiciones, aproximaciones y estimaciones realizadas con el fin de abarcar los parámetros mínimos solicitados para la modelación.

12.1. ESTIMACIÓN DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS

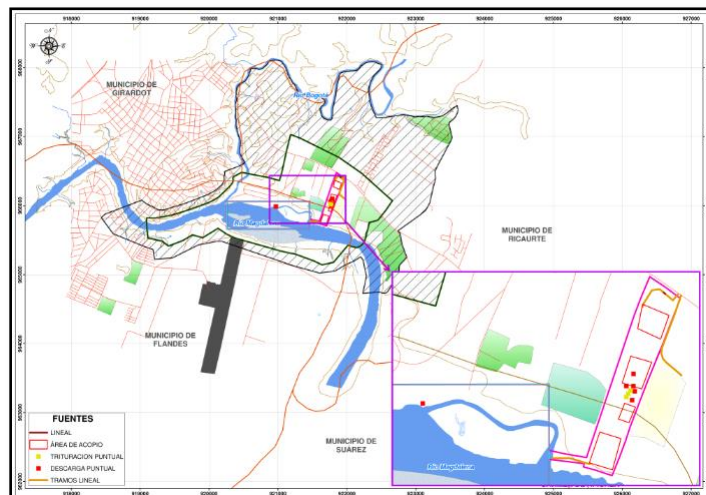
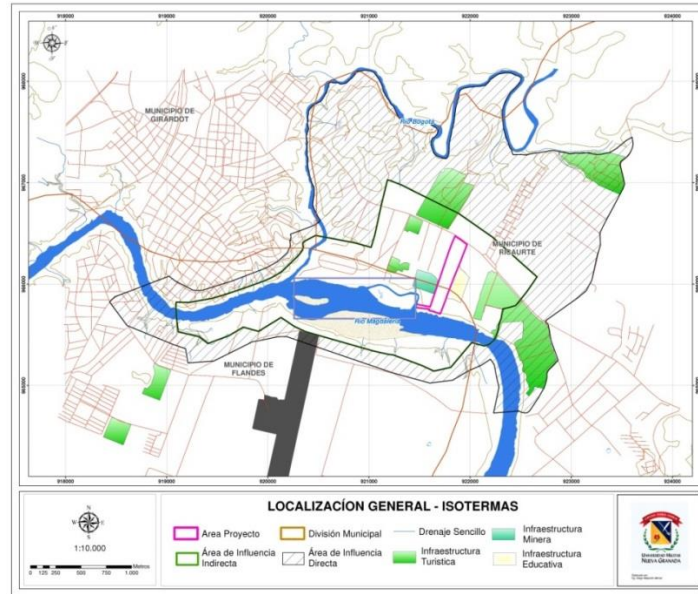
Para definir el escenario de modelación se debe contemplar la ubicación de las fuentes de emisión identificadas para la ejecución del modelo, ya que a partir de este escenario se establecen las geometrías y la emisión neta por geometría

evaluada sobre una imagen puntual. A partir de este escenario se realiza la modelación con los datos meteorológicos ingresados, es otras palabras, debido a que no es un modelo dinámico en el cual se establecen cambios en las concentraciones, en las geometrías o de la ubicación de las fuentes en el tiempo, es necesario establecer un escenario único de emisión de contaminantes que en lo posible debe ser la que genere las mayores concentraciones con el fin de establecer la modelación en un escenario crítico, es decir que a partir de los resultados no puedan esperarse concentraciones superiores a las modeladas (sin tener en cuenta las concentraciones de fondo).

La ubicación estimada para las fuentes identificadas se especifica en la **Tabla 10** y en la **Figura 4**. Cabe resaltar que para fines de modelación, las coordenadas se mostrarán en las tablas en UTM (Universal Trasverse Mercator) Zona 18N sin embargo, la cartografía presentada de isopletas definitivas se encuentra proyectada en Datum Magna Sirgas Origen Bogotá.

Tabla 10 Ubicación estimada y/o supuesta de las fuentes de emisión en el escenario actual.

IDENTIFICACIÓN DE LA FUENTE	DESCRIPCIÓN	IDENTIFICACIÓN	DELIMITACIÓN DE LA FUENTE	GEORREFERENCIACIÓN WGS 1984 UTM Zona 18N	
				ESTE	NORTE
Vías de acceso*	Fuentes de emisión lineales difusas generadas por el paso de vehículos sobre vías destapadas a la mina	Tramo 1	Inicio Fin	524301,983	474424,422
				524308,504	474418,924
Clasificación en las zaranda inicial con humectación Trituración	Fuente de emisión dispersa puntual sobre el proceso de tamizado en la zaranda que separa el material grueso de la arena natural.	Punto 1	Punto fijo	524157,725	474020,043
	Fuente de emisión dispersa puntual en la trituradora con impactor generalmente empleada para la trituración de material grueso a clasificar.	Punto 2	Punto fijo	524165,404	474032,951
Clasificación en las zaranda final con humectación	Fuente de emisión dispersa puntual sobre el proceso de tamizado en la zaranda que separa el material grueso de la arena natural.	Punto 3	Punto fijo	524173,988	474045,181
Descarga de material sobre las volquetas desde el cargador Dragado	Fuente de emisión dispersas puntuales sobre las volquetas por acción del viento sobre el material descargado.	Punto 11	Punto fijo	524157,832	474062,341
	Actividad realizada por la Dragadora Eléctrica Shark Dredge.	Punto	Punto fijo		
Descarga de material con la volqueta sobre el Dumper	Actividad realizada con la retroexcavadora y el Dumper en el área.	Punto 5	Punto fijo		
Descarga de material sobre la pila del pulmón con volqueta	Fuente de emisión dispersa puntual sobre la pila de material en el pulmón generadas por acción del viento (aplica para el escenario proyectado)	Punto 6	Punto fijo		
Áreas de acopio (erosión eólica)	Fuentes de emisión de área difusas generadas por el almacenamiento de material crudo.	Área 1 (polígono)	Vértice 1	524175,076	474177,886
			Vértice 2	524255,967	474154,751
			Vértice 3	524217,470	474051,212
			Vértice 4	524141,709	474074,052
		Área 2 (polígono)	Vértice 1	524151,157	473995,916
			Vértice 2	524193,115	473980,881
			Vértice 3	524167,842	473920,806
			Vértice 4	524127,394	473934,637
		Área 2 (polígono)	Vértice 1	524055,040	473884,464
			Vértice 2	524137,140	473859,217
			Vértice 3	524103,794	473738,486
			Vértice 4	524014,450	473765,836
		Área 2 (polígono)	Vértice 1	524220,596	474378,601
			Vértice 2	524323,235	474335,578
			Vértice 3	524290,457	474243,813
			Vértice 4	524202,002	474284,741
Descarga de material sobre las pilas desde las bandas transportadoras	Fuente de emisión dipersas puntuales sobre las pilas de material generadas por acción del viento sobre el material	Punto 7	Puntos fijos	524180,025	474007,654
		Punto 8		524190,443	474042,265
		Punto 9		524185,189	474061,971
		Punto 10		524157,832	474062,341
		Punto 11		524185,535	474109,041



Fuente: Información Cartográfica IGAC, Interpretación de imagen e satélite Rapid Eye de 60 cm de resolución espacial.

Figura 4: Localización general de las fuentes de emisión previstas en el área de estudio.

Escenario de modelación

Para el caso de estudio y las actividades identificadas, a partir de los cuales se generan las emisiones se generan los siguientes escenarios:

Producción actual: La producción actual es de 64 m³/hora en promedio de material procesado con un flujo vehicular de 13 volquetas pequeñas (0-8 m³) y 1 mediana (8-16m²) cada hora en promedio.

A partir de los factores de emisión presentados en la metodología se procede a calcular las emisiones de cada unidad identificada antes de ingresarlos al modelo

de dispersión. En la **Tabla 11** se observan las dimensiones y la emisión estimada de cada fuente identificada

Tabla 11: Emisión estimada y/o supuesta de las fuentes de emisión para el escenario actual.

IDENTIFICACIÓN DE LA FUENTE	ELEMENTO DE EMISIÓN	DIMENSIONES DE LAS FUENTES	OBSERVACIONES	EMISIÓN PM10/CO/NO ₂ /SO ₂	UNIDADES
Vías de acceso	Resuspensión de material en la vía por acción del paso de volquetas	Vías destapadas	Emisiones sobre los tramos de vía	1,17x10 ⁻⁴ /NA/NA/NA*	g/(s.m ²)
	Emisión del vehículo durante el transporte	Volqueta		1,85x10 ⁻⁴ /9,26x10 ⁻⁴ /3,06x10 ⁻³ /7,55x10 ⁻⁴	
Descarga de material	Resuspensión de material por acción del viento	Fuentes puntuales	Del cargador a la volqueta	9,82x10 ⁻⁶ /NA/NA/NA	g/s
	Emisiones del cargador		Emisiones	0,009/0,044/0,200/0,032 0,007/0,035/0,115/0,028	
Descarga de la retroexcavadora en la zona de extracción	Resuspensión de material por acción del viento		Pila de arena natural Pila de arena Pila de triturado Pila de triturado	8,15x10 ⁻⁶ /NA/NA/NA 1,33x10 ⁻⁶ /NA/NA/NA 2,16x10 ⁻⁶ /NA/NA/NA 1,17x10 ⁻⁶ /NA/NA/NA	
	Resuspensión de material por acción del viento		La retroexcavadora descarga material al Dumper encendido.	5,15x10 ⁻⁶ /NA/NA/NA	
	Emisiones de la retroexcavadora			0,019/0,096/0,268/0,078	
	Emisiones del Dumper			0,023/0,113/0,315/0,079	
Clasificación en las zaranda inicial	Emisiones generadas por el movimiento de la zaranda		Se realiza control en la zaranda con humectación por aspersión	1,09x10 ⁻⁵ /NA/NA/NA	
Trituración	Emisiones generadas por el proceso de triturado		Sale material triturado con diámetros inferiores a 50 mm	2,03x10 ⁻⁴ /NA/NA/NA	
Clasificación en las zaranda final	Emisiones generadas por el movimiento de la zaranda		Se realiza control en la zaranda con humectación por aspersión	2,98x10 ⁻⁵ /NA/NA/NA	
Áreas expuestas (erosión eólica)	Resuspensión de material por acción del viento	Áreas de acopio material Vías destapadas	---	1,35x10 ⁻⁶ /NA/NA/NA	g/(s.m ²)

* NA: No aplica. ** Se considera una carga de 7,4 ton de material. +15 ton del peso vacío de la volqueta

- **Calculo para vías sin pavimentar**

Para las vías sin pavimentar se emplea la siguiente ecuación:

$$FE = K \left(\frac{s}{12} \right)^a \left(\frac{W}{3} \right)^b ; \frac{lb}{VMT}$$

Donde lb/VMT son libras por milla transitada. En la **Tabla 12** se muestran los parámetros contemplados para la anterior ecuación a partir de las características de la vía en la zona de estudio.

Tabla 12: Parámetros para calcular la emisión de partículas en las vías

Parámetro*	Vías sin pavimentar	
	Area industrial PM10	Unidad
Ancho de vía	4,50	m
s	26	%
W	22,4**	Ton
K	1,5	adimensional
a	0,9	
b	0,45	

* s: Contenido de limos (%). W: Peso promedio del vehículo. K, a y b: Constantes establecidas por EPA AP-42 (Tabla 13.2.2-2) ** Se supone que la volqueta carga en promedio 7,4 toneladas.

- **Cálculo para fuentes móviles**

Dicho calculo parte de la potencia de los motores y de los factores de emisión establecidos por US EPA Exhaust Emission Factors for Nonroad Engine Modeling-Compression-Ignition Report No. NR-009^a

$$FE = \frac{Hp * FE_{(PM10, NO2 y SO2)}}{3600}$$

Donde Hp: potencia del motor en caballos fuerza, FE: factor de emisión de la EPA en g/(Hp.h). 3600: factor de conversión de horas a segundos. Para las volquetas pequeñas (0-8m³) el factor de emisión para PM10 por ejemplo sería:

$$FE_{PM10} = \frac{125hP * \frac{0,2g}{hP \cdot h}}{3600s/h} = 0,007 g/s$$

- **Calculo para descargue de material**

De acuerdo con el factor de emisión para el descargue de material en pilas establecido por US EPA AP-42 Cap. 13.2.4 y el factor de producción establecido para los frentes de trabajo se procedió así:

$$FE = K(0,0016) \frac{\left(\frac{U}{2,2}\right)^{1,3}}{\left(\frac{M}{2}\right)^{1,4}} ; \frac{kg}{Mg}$$

Donde k toma un valor de 0,35 para PM10, U es la velocidad promedio del viento y M la humedad del material descargado.

13.2 ANALISIS DE LA INFORMACIÓN CLIMÁTICA Y METEOROLÓGICA

“El clima es un factor importante del ambiente global, siendo un conjunto fluctuante de las condiciones atmosféricas, caracterizado por los estados y evoluciones del tiempo durante un período y un lugar y controlado por diferentes factores como: formación de los continentes, formación de montañas, circulación oceánica, actividad volcánica, altitud, latitud, cobertura vegetal, glaciares, lagos, ríos, actividad humana e interacción entre los diferentes componentes del Sistema climático (atmósfera, hidrósfera, litósfera, criosfera, biosfera y antropósfera)”¹⁰. El análisis climatológico dentro del contexto del presente estudio está orientado a conocer la dinámica general de los parámetros climáticos en la zona de estudio a fin de suministrar criterios que permitan evaluar los efectos sobre el área del proyecto.

Para el presente análisis climático de la zona de estudio, se solicitó el modelamiento de los datos meteorológicos a través del modelo MM5. En la **Tabla**

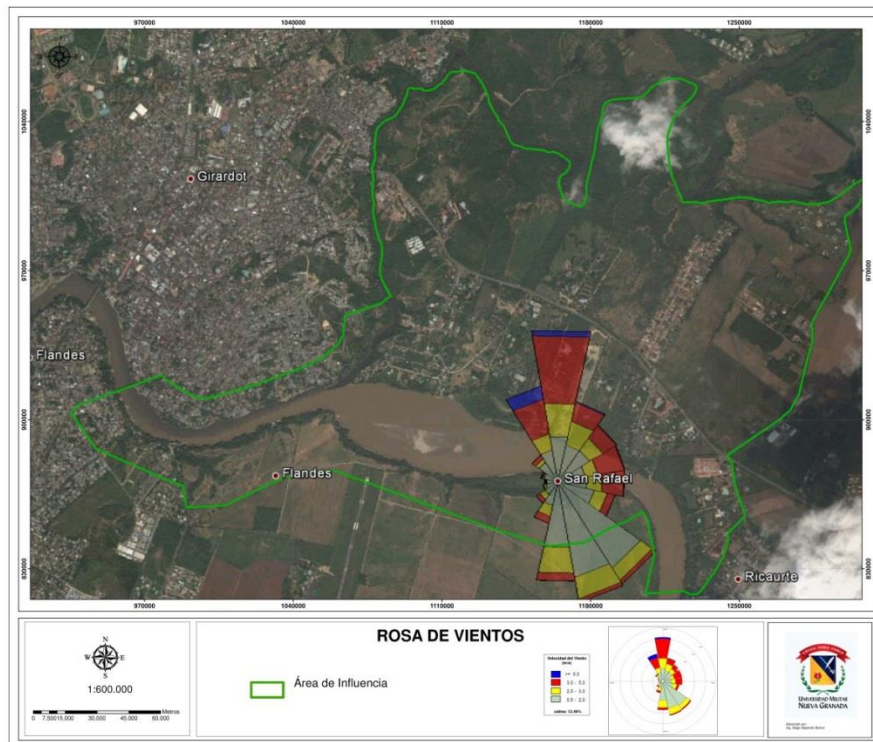
¹⁰ IDEAM - INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. El Medio Ambiente en Colombia. Segunda Edición, 2001. [En línea: 7 de mayo de 2012]. Disponible en: <<http://www.siac.gov.co/contenido/contenido.aspx?catID=368&conID=525>>

13 se presenta la información de dicha estación modelada utilizada para el modelo de dispersión en la zona de estudio y en la **Figura 5** su ubicación.

Tabla 13: Resumen de la estación meteorológica modelada empleada para el presente estudio.

ORDEN	MET133375	DEPARTAMENTO	Cundinamarca
TIPO DE DATOS	AERMET-Preparado (Datos superficiales y de altura)	COORDENADAS GEOGRÁFICAS	4,288417 N
PERÍODO DE MODELACIÓN	Enero 01 de 2011 a Diciembre 31 de 2012	UTM	74,782222 W
PARÁMETROS GENERADOS	Calor sensible (W/m^2), Velocidad de fricción superficial (m/s), Velocidad convectiva (m/s), Gradiente de Temperatura vertical potencial sobre la capa límite planetaria, Altura de convección generada sobre la capa límite (m), Altura mecánica generada en la capa límite (m), Longitud de Monin Obukhov (m), Longitud de rugosidad superficial (m), Bowen ratio, Albedo, Velocidad del viento (m/s), Dirección del viento ($^\circ$), Temperatura (K), Velocidad de precipitación (mm/hr), Humedad relativa (%), Presión barométrica (mb), Cobertura de nubes (décimas)	ELEVACIÓN (m.s.n.m.)	319

Fuente: Lakes Environmental, 2013.



Fuente: Trabajo de Grado Universidad Militar Nueva Granada, 2013

Figura 5: Localización de la estación meteorológica modelada para el presente estudio

12.3 ALTURA DE CAPA DE MEZCLA Y ESTABILIDAD ATMOSFÉRICA

En la atmósfera, la interacción de diferentes factores climáticos como la dirección y velocidad del viento, el brillo solar, la temperatura y la nubosidad permiten crear condiciones en las cuales puede o no favorecer la dispersión de los contaminantes en el mismo, lo cual se conoce como estabilidad atmosférica y a la altura en la cual se presenta la dispersión se conoce como altura de mezcla.

En las **Tablas 14** y **15** se muestran los resultados de la altura de capa de mezcla para las diferentes horas del día para los años 2011 y 2012.

Tabla 14: Datos horarios de altura de capa de mezcla durante el período evaluado (metros). Año 2011.

HORA	MÍNIMO	MÁXIMO	PROMEDIO	HORA	MÍNIMO	MÁXIMO	PROMEDIO
1	17	2552	413	13	182	1036	395
2	17	3790	337	14	178	1809	405
3	17	2302	277	15	172	2281	422
4	17	1540	259	16	159	2490	466
5	17	1029	228	17	131	2443	490
6	17	991	217	18	17	2128	461
7	17	1127	295	19	17	2557	556
8	129	1215	382	20	17	2834	740
9	156	1746	398	21	17	3124	817
10	131	2036	366	22	17	3422	722
11	178	1621	374	23	17	2896	606
12	182	1079	392	24	17	2285	505

Fuente: Estación Modelada Lakes Environmental. 2013.

Tabla 15: Datos horarios de altura de capa de mezcla durante el período evaluado (metros). Año 2012.

HORA	MÍNIMO	MÁXIMO	PROMEDIO	HORA	MÍNIMO	MÁXIMO	PROMEDIO
1	17	1535	327	13	182	1402	443
2	17	1758	284	14	179	1395	438
3	17	2012	268	15	173	1186	435
4	17	2283	255	16	159	1312	473
5	17	1536	230	17	130	1662	510
6	17	998	215	18	17	2347	471
7	17	953	290	19	17	2561	489
8	115	1246	370	20	17	2561	619
9	121	1313	398	21	17	2012	682
10	171	1368	376	22	17	3434	631
11	171	1398	404	23	17	2653	499
12	183	1396	436	24	17	2284	401

Fuente: Estación Modelada Lakes Environmental. 2013.

Promedios mensuales de altura de capa de mezcla (metros).

HORA	MÍNIMO	MÁXIMO	PROMEDIO
Enero	17	2162	153
Febrero	17	1734	117
Marzo	17	2556	329
Abril	17	2561	318
Mayo	17	3069	430
Junio	17	2559	448
Julio	17	2415	512
Agosto	17	2857	483
Septiembre	17	2021	400
Octubre	17	2853	329

Noviembre	17	1935	158
Diciembre	17	1886	158

Fuente: Estación Modelada Lakes Environmental. 2013.

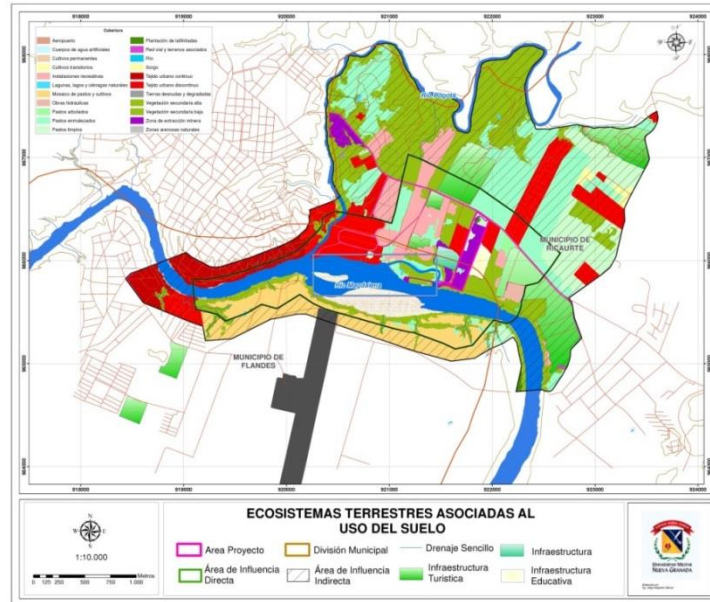
12.4 USO DE SUELO Y PARÁMETROS SECUNDARIOS

En la **Figura 6** y la **Table 16** se presenta las coberturas vegetales basadas en los usos de suelos con el fin poder determinar los parámetros secundarios y alimentar al programa de modelación.

Tabla 16: Áreas y porcentaje de coberturas vegetales asociadas al uso de suelo

Coberturas Extracción minera Isla del Sol	Clasificación general CORINE	Área (ha ²)	%	Convención
Tejido urbano continuo	1.1.1 Tejido urbano continuo	34,91	4,15	
Tejido urbano discontinuo	1.1.2 Tejido urbano discontinuo	86,33	10,27	
Red vial y terrenos asociados	1.2 Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación.	12,07	1,44	
Aeropuerto		2,08	0,25	
Obras hidráulicas		3,41	0,41	
Zona de extracción minera	1.3 Zonas de extracción minera y escombreras	19,68	2,34	
Instalaciones recreativas	1.4 Zonas verdes artificiales, no agrícolas	114,49	13,62	
Cultivos transitorios	2.1 Cultivos transitorios	1,68	0,20	
Sorgo	2.2 Cultivos permanentes	2,23	0,27	
Cultivos permanentes		0,11	0,01	
Pastos limpios	2.3 Pastos	58,83	7,00	
Pastos arbolados		2,29	0,27	
Pastos enmalezados		125,10	14,88	
Mosaico de pastos y cultivos	2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	69,02	8,21	
Plantación de latifoliadas	3.1.5 Plantación forestal	0,833	0,10	
Vegetación secundaria alta	3.2.3.1 Vegetación secundaria alta	100,53	11,96	
Vegetación secundaria baja	3.2.3.2 Vegetación secundaria baja	104,69	12,46	
Zonas arenosas naturales	3.3.1 Zonas arenosas naturales	22,16	2,64	
Tierras desnudas y degradadas	3.3.3 Tierras desnudas o degradadas	0,23	0,03	
Ríos	5.1. Aguas continentales	79,05	9,40	
Lagunas, lagos y ciénagas naturales		0,63	0,08	
Cuerpos de agua artificiales		0,09	0,01	
Total		840,54	100	

Fuente: Corine Land Cover



Fuente: Trabajo de Grado Universidad Militar Nueva Granada, 2013
Figura 6: Coberturas vegetales asociadas al uso del suelo.

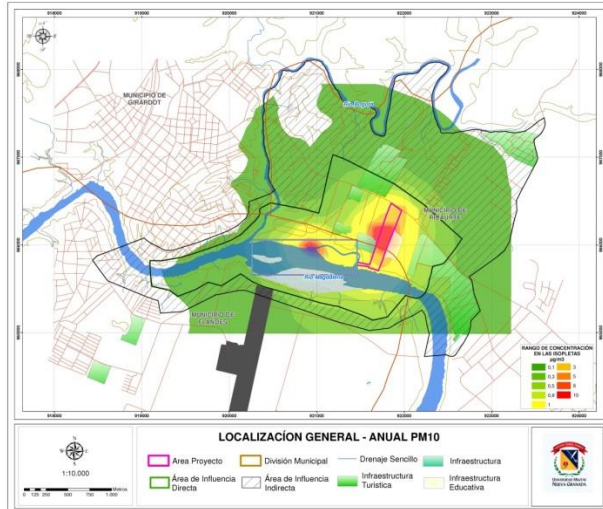
13. DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES.

A partir del procesamiento de la información meteorológica, la recopilación de las fuentes de emisión y el procesamiento de la cartografía del área de estudio se procedió a generar las modelaciones de los contaminantes material particulado respirable (PM10), dióxido de nitrógeno (NO₂) y dióxido de azufre (SO₂) a partir de los tiempos de ponderación de 24 horas y anual para SO₂ y PM10 y tiempos de ponderación de 1 hora, 24 horas y anual para NO₂ con el fin de comparar posteriormente con la normatividad asociada (Resolución 610 de 12010 del MVDT hoy MADS) y los resultados de la campaña de monitoreo de calidad de aire más cercana.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada contaminante.

- **DISPERSIÓN DE PARTÍCULAS RESPIRABLES PM10**

Se realizó la modelación de partículas respirables PM10 y en la **Figuras 7** se muestran las isopletras sobre el área de estudio. Cabe resaltar que en la figura, la concentración presentada en el rango de colores representa el máximo valor de concentración de cada isolínea.

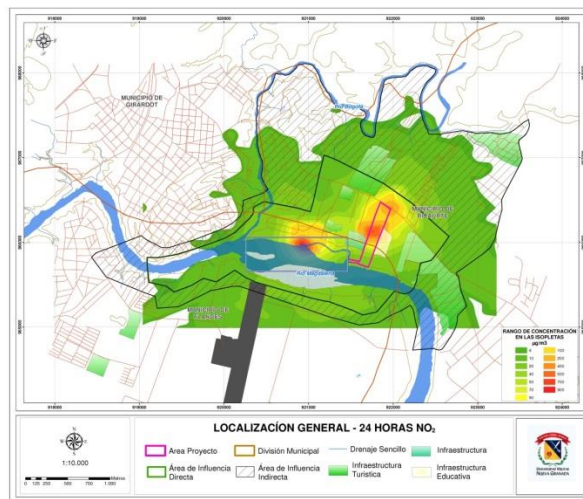


Fuente: Trabajo de Grado Universidad Militar Nueva Granada, 2013
Figura 7: Imagen isopletas material particulado respirable PM10 sobre el área de influencia para un tiempo de ponderación anual.

Para la gráfica, el pico de concentración máxima de material particulado se encuentra dentro del Bloque donde los valores obtenidos no exceden el límite normativo establecido en la Resolución 601 de 2006 del MAVDT

- **SPERSIÓN DE DIOXIDO DE NITRÓGENO NO₂**

Se realizó la modelación de dióxido de nitrógeno (NO₂) y en la **Figuras 8** se muestran las isopletas sobre el área de estudio. Cabe resaltar que en la figura, la concentración presentada en el rango de colores representa el máximo valor de concentración de cada isolínea.

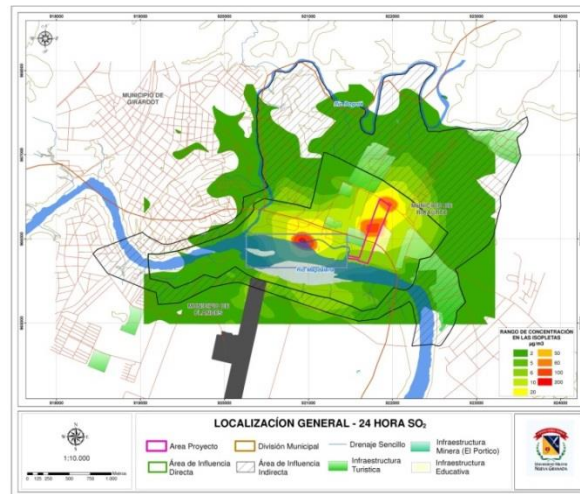


Fuente: Trabajo de Grado Universidad Militar Nueva Granada, 2013
Figura 8: Imagen isopletas dióxido de nitrógeno NO₂ sobre el área de influencia para un tiempo de ponderación horario.

Para la gráfica, el pico de concentración máxima los valores obtenidos exceden el límite normativo establecido en la Resolución 601 de 2006 del MAVDT. Al observar el mapa de dispersión se puede ver que la concentración sobre el área de influencia es alta comparada con la normatividad, y la concentración por encima del estándar normativo no trasciende hasta los receptores cercanos para ambos tiempos de exposición.

- **DISPERSIÓN DE DIOXIDO DE AZUFRE SO₂**

Se realizó la modelación de dióxido de azufre SO₂ y en la **Figuras 9** se muestran las isopletras sobre el área de estudio. Cabe resaltar que en la figura, la concentración presentada en el rango de colores representa el máximo valor de concentración de cada isolínea.



Fuente: Trabajo de Grado Universidad Militar Nueva Granada, 2013

Figura 9: Imagen isopletras dióxido de azufre (SO₂) sobre el área de influencia para un tiempo de ponderación de 24 horas.

En este estudio, el pico de concentración máxima de dióxido de azufre para los dos escenarios, se encuentra dentro del área de estudio y los valores obtenidos exceden el límite normativo establecido en la Resolución 601 de 2006 del MAVDT. Al observar el mapa de dispersión se puede ver que la concentración sobre las zonas de explotación es alta comparada con la normatividad.

15 ANÁLISIS DE RESULTADOS DISPERSIÓN

Los escenarios de modelación antes descritos son generados a partir de la suposición de que todos los equipos operan simultáneamente y se agruparon aleatoriamente.

En el caso de los gases dióxido de nitrógeno (NO₂) y dióxido de azufre (SO₂) de igual manera se presentan elevadas concentraciones sobre los bloques de

explotación y en cercanías a estos debido a las actividades de transporte y el uso de maquinaria para la explotación.

A partir de los resultados de los datos meteorológicos, la zona de estudio presenta una estabilidad E (ligeramente estable) lo cual dificulta la dispersión vertical o ascenso de los contaminantes sobre la columna de aire, esto genera que la nube de contaminantes se mantenga a nivel de la superficie y se presenten elevadas concentraciones en los alrededores de los focos de emisión, tal como se observa en las planchas de isoplefas.