



**UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS “CARLOS RAFAEL RODRIGUEZ”
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

**Diseño del Programa de Monitoreo Ambiental para canteras de las
tobas puzolánicas “Carolina”, Cienfuegos.**

Por

Autor(a): Dayana Isabel Tejera Pérez

Tutor/es: MSc.Ing.: José Luis Romero Cabrera

Ing.: Eliané Arias Molina.

[Cienfuegos, 2021]

PENSAMIENTO

*“Si uno ha elegido la carrera en la que más
puede hacer por el bien de la humanidad,
nunca se doblegará bajo las cargas del
oficio...”*

Carlos Marx

DEDICATORIA

A mi padre: que desde el cielo me ha guiado y acompañado en cada paso que doy dándome la fuerza para seguir adelante.

A mi pequeño hijo Chris Alex: por ser mi inspiración cada mañana, mi razón de ser y mi todo.

A mi madre: por ser este uno de sus sueños, por ser lo que más quiero después de mi bebé, por convertirme en lo que soy hoy...gracias por darme la vida.

A mis abuelos Papi y Mimi: por todo su apoyo y amor incondicional.

A mi abuelita María Elena: que a pesar de la distancia siempre ha estado pendiente de todo lo mío.

A mi tía tía Oda y mis primos Wendy y Willy: por siempre estar para mí.

A Christian Rafael: por ver formado parte de estos últimos años de este gran sueño dándome su apoyo.

A Ariel y Sofi: por ser mis segundos papis.

A mi mejor amiga Arletty: por su apoyo incondicional, por estar siempre que la necesito y por ser una hermana para mí.

A mis amigos Dary, Dargge y Daniela: con quienes compartí momentos buenos y malos y sobre todo muchas noches de desvelo estudiando para los exámenes.

Además, a: mis tíos, mis primos y compañeros de aula.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre por su amor y apoyo incondicional, por todos los sacrificios que ha tenido que hacer por este sueño que es más suyo que mío, por estar siempre conmigo en los momentos más difíciles, por ser mi ejemplo. Gracias por ser la mejor madre del mundo mundial.

A mi hijo, mi príncipe, mi razón de ser, la personita que le da sentido a todo en mi vida y por la que hoy quiero ser mejor que ayer.

A mis tutores por su colaboración, dedicación y preocupación.

A Christian Rafael por formar parte de mi vida y apoyarme en este gran sueño.

A Ariel y Sofi por ser unos segundos padres para mí.

A Arletty, Dary, Dargge y Daniela por estar ahí.

A todos mis compañeros de estudio, que siempre hemos estado juntos en los buenos y malos momentos.

A todo el claustro de profesores por contribuir en nuestra formación y hacer de nosotros mejores personas.

A mi tía Oda, mis primos, mis abuelos, en general a toda mi familia.

A todos los que hicieron posible la realización de este sueño.

A todos muchas gracias.

RESUMEN.

La presente investigación será realizada en las instalaciones de Cementos Cienfuegos S.A. con el objetivo de Diseñar un Programa de Monitoreo Ambiental de las variables de concentración de polvo en aire, tasa de deposición y concentración de metales pesados para la cantera de tobas puzolánicas que tenga en cuenta las variables meteorológicas y del término fuente, y utilice los trazadores presentes en el material, para discriminar la influencia no asociadas a las operaciones en dicha cantera y que facilite la valoración de la calidad del aire a partir de índices establecidos en la norma NC ISO 111:2004. La ubicación de los puntos de muestreo será determinada a partir de las áreas de mayor concentración de polvo obtenidas de la ejecución de los programas de dispersión de contaminantes (AERMOD y SCREEN3S) utilizando el término fuente para las fuentes planas principales con alcance territorial. En este trabajo se propone además el control de parámetros de residuales en las aguas de escorrentías contaminadas con metales pesados y aceites y grasas estas últimas asociadas a la operación de los equipos. Como resultado se propone un programa de monitoreo ambiental para esta cantera que será incluido en el monitoreo Ambiental General de Cementos Cienfuegos S.A.

SUMMARY.

This research will be carried out at the facilities of Cementos Cienfuegos S.A. with the objective of Designing an Environmental Monitoring Program of the variables of dust concentration in air, deposition rate and concentration of heavy metals for the pozzolanic tuff quarry that takes into account the meteorological variables and the source term, and uses the tracers present in the material, to discriminate the influence not associated with the operations in said quarry and to facilitate the assessment of air quality from the indices established in the NC ISO 111: 2004 standard. The location of the sampling points will be determined from the areas with the highest concentration of dust obtained from the implementation of the pollutant dispersion programs (AERMOD and SCREEN3S) using the thermal source for the main flat sources with territorial scope. This work also proposes the control of residual parameters in runoff waters contaminated with heavy metals and oils and fats, the latter associated with the operation of the equipment. As a result, an environmental monitoring program is proposed for this quarry that will be included in the General Environmental monitoring of Cementos Cienfuegos S.A.

Contenido

Contenido	7
Introducción.....	8
CAPÍTULO 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	12
1.1 Contaminación Atmosférica.	12
1.2 Contaminantes atmosféricos primarios y secundarios.....	14
1.3 Fuentes de contaminación atmosféricas.	15
1.4 Material particulado como contaminante atmosférico.....	16
1.5 Efectos Bilógicos de la contaminación ambiental por emisiones de polvo.....	19
1.6 Producción u origen de polvos en la minería.....	22
1.7 Calidad del aire en zonas mineras.....	26
1.8 Modelado de dispersión de contaminantes.	27
CAPÍTULO 2: CARACTERIZACIÓN DE LA EMPRESA Y PROCEDIMIENTO A SEGUIR.....	32
2.1 Caracterización de la Cementos Cienfuegos S.A.	32
2.2 Canteras en explotación.	35
2.3 Caracterización del material de canteras.	39
2.4 Determinación del termino fuente.	40
2.5 Selección de trazadores utilizando los metales pesados.	47
2.6 Determinación de los parámetros de control para los residuales.....	47
2.7 Programa de Monitoreo.	47
CAPÍTULO 3: PROGRAMA DE MONITOREO AMBIENTAL.....	50
3.1 Estudio de dispersión de contaminantes material particulado.	50
3.2 Determinación de la emisión por combustión.	58
3.3 Determinación de la exposición a metales pesados.	59
3.4 Diseño del programa de monitoreo.....	61
3.5 Monitoreo de partículas.	65
3.6 Monitoreo de residuales.....	66
3.7 Programa de muestreo.	67
Conclusiones.....	69
Recomendaciones	70
Referencias Bibliográficas.....	71
Anexos.....	75

Introducción.

Antecedentes.

El medio ambiente atmosférico en las áreas de minería a cielo abierto está sometido a una fuerte carga contaminante producida por la remoción de partículas debido a las diferentes operaciones propias de este tipo de minado. Esto puede ocasionar un serio impacto ambiental, especialmente cuando se trata de partículas de un diámetro inferior a 10 μm , lo que permite que ellas puedan ser inhaladas y provocar importantes daños a la salud al introducirse en las vías respiratorias.

La presencia en la atmósfera de este contaminante ocasiona variedad de impactos a la vegetación, materiales y el hombre, entre ellos, la disminución visual en la atmósfera, causada por la absorción y dispersión de la luz (Chen, Ying & Kleeman, 2009). Además, la presencia del material particulado está asociada con el incremento del riesgo de muerte por causas cardiopulmonares en muestras de adultos (Pope, 2004).

El material particulado atmosférico, derivado de las explotaciones de canteras también se considera antropogénico, al intervenir el hombre en su origen. Además, se trata de partículas primarias, ya que son emitidas como sólidos a la atmósfera. En comparación con las zonas industriales dedicadas a la transformación química o petroquímica, las explotaciones de canteras se caracterizan por un importante movimiento de materias primas, caracterizadas por anomalías geoquímicas importantes en elementos de interés. El movimiento de mineral y su tratamiento en plantas de reducción de tamaño de grano provoca una alta concentración de partículas en suspensión derivadas de la resuspensión por el viento, movimiento con vehículos pesados y cintas transportadoras, entre otros.

Durante las operaciones de voladura, extracción, movimiento y tratamiento de mineral se produce una importante contribución de Material Particulado Atmosférico (MPA) en la zona próxima a la mina. El MPA procedente de la resuspensión de partículas finas de escombreras puede influenciar también en la calidad de las zonas tanto urbanas como rurales y en los suelos localizados en las proximidades de la explotación minera.

La caracterización físico-química del MPA derivado de zonas mineras son de gran interés ya que los residuos acumulados en las escombreras pueden ser una fuente principal de MPA que es susceptible de pasar a la atmósfera, y según su tamaño, transportarse a larga distancia. Este material puede impactar la salud de la población y en los ecosistemas de la zona, a la que le puede llegar por las vías normales (inhalación, ingestión y contacto dérmico), y producir según el caso y la solubilidad, tamaño y reactividad de las partículas, distintas patologías.

Cementos Cienfuegos S.A. ha dedicado cuantiosos recursos al mejoramiento de los sistemas de limpieza y tratamiento de residuales instalados, con el objetivo de minimizar dichos impactos ambientales derivados de sus operaciones, que ha alcanzado la cifra cercana a los 50 MMUSD, estas mejoras tecnológicas fueron dirigidas fundamentalmente a la instalación de sistemas

electrostáticos de filtrado de aire, filtros de mangas, ciclones separadores, aumento de la hermeticidad de los sistemas de transporte neumático de material y al cambio de combustible por uno de menor contenido de azufre y metales pesados.

En relación a las canteras actualmente en explotación también se han ejecutado acciones dirigidas a la mitigación de impactos ambientales, dentro de las que se destacan la planificación de voladoras para la fragmentación de rocas, el riego de caminos mineros, los drenajes de canteras, la reforestación de áreas agotadas y limitaciones de velocidad del transporte de materiales. Estas medidas son verificadas por el personal técnico de las canteras y los especialistas ambientales de la Geominera (contratista) y Cementos Cienfuegos S.A. (contratante).

Todas estas acciones están dirigidas a dar cumplimiento a los requisitos de las licencias ambientales otorgadas para la operación de canteras, así como las normas de calidad del aire y las aguas residuales. La verificación del cumplimiento de estas regulaciones puede ser realizada mediante el monitoreo constante de la carga contaminante en puntos de muestreo distribuidos en zonas de mayor probabilidad de deposiciones.

El Programa de Monitoreo Ambiental (PMA), busca asesorar permanentemente a Cementos Cienfuegos SA, sobre las cuestiones que afectan al entorno de sus instalaciones y a la región del emplazamiento, permitiendo una evaluación periódica, integrada y permanente de la dinámica de las variables ambientales, tanto a nivel de medio ambiente natural como medio socioeconómico y cultural, con el fin de suministrar información precisa y actualizada para la toma de decisiones orientadas al control de las emisiones y descargas al medio ambiente.

A partir del año 2004 se ha estado ejecutando un programa de monitoreo por el CEAC (Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos), cuyos resultados no incluye la cantera de tobas puzolánicas, no siendo posible hasta la fecha poder evaluar los posibles impactos ambientales derivados de las operaciones en dicha cantera. Tampoco ha sido realizada una caracterización desde el punto de vista de posibles trazadores de contaminación como los metales pesados ni estudios teóricos preliminares de dispersión atmosféricos de contaminantes considerando los términos fuentes de las emisiones.

Las Licencias Ambientales otorgadas a la empresa incluyen la obligatoriedad de mantener un programa de monitoreo en todas sus instalaciones que permitan evaluar el cumplimiento de los requisitos regulatorios relacionados con el control y minimización de emisiones, este requisito se cumple parcialmente ya que hasta la fecha la cantera de toba puzolánica no se encuentra cubierta por el programa de monitoreo. En años anteriores se realizaron trabajos con la Universidad de Cienfuegos específicamente en tesis de grado relacionados con el diseño del programa general de monitoreo ambiental de la empresa y para las canteras de caliza, marga y perdigón.

Justificación del estudio.

Contar con un programa que facilite la evaluación de los impactos ambientales derivados de las operaciones mineras en la cantera de tobas puzolánicas perteneciente a Cementos Cienfuegos S.A. para cumplir con los requisitos de la Licencia Ambiental otorgadas por el órgano regulador del CITMA.

Aportes.

El programa constituye una herramienta para valorar los posibles impactos ambientales en régimen normal de explotación de la cantera de toba puzolánica propiedad de Cementos Cienfuegos S.A. sobre la base del cumplimiento de las normas de calidad del aire y deposiciones. Este programa constituye un requisito obligatorio de la Licencia Ambiental para las operaciones mineras, emitida por el órgano regulador estatal (CITMA).

Los resultados de este trabajo eliminan las deficiencias técnicas de los programas anteriores, haciendo más objetiva la valoración de los impactos ambientales, ya que permite discriminar los efectos asociados a otros focos contaminantes presentes en el territorio del emplazamiento, utilizando para ello la caracterización de las materias primas en base de los metales pesados.

Problema de Investigación

¿Cómo verificar el cumplimiento de los requisitos de las normas de calidad del aire y los residuales líquidos y la efectividad de las acciones de mitigación de los impactos ambientales ejecutados en la cantera de tobas puzolánicas?

Objetivo General

Diseñar un Programa de Monitoreo Ambiental para la cantera de tobas puzolánicas “Carolina”, Cienfuegos con el fin de verificar el cumplimiento de la norma NC ISO 111:2004.

Objetivos específicos

1. Establecer los fundamentos teóricos-conceptuales esenciales que sustentan la investigación.
2. Determinar y evaluar el término fuente para los estudios de dispersión en la cantera de tobas puzolánicas.
3. Realizar el estudio de dispersión de los contaminantes utilizando la geometría de fuente plana.
4. Caracterizar el material de la cantera sobre la base de los metales pesados.
5. Proponer los puntos y el plan de monitoreo.

Hipótesis de la Investigación

La evaluación de los impactos ambientales derivados de las operaciones mineras en la cantera de toba puzolánicas, pueden ser evaluados utilizando los puntos y el plan de monitoreo propuesto.

Resultados obtenidos.

Se elabora a partir de los estudios de dispersión de contaminantes, un Programa de Monitoreo Atmosférico para determinar las concentraciones y deposiciones de material particulado en diferentes puntos del territorio que se encuentran bajo la influencia de las emisiones de la cantera de tobas puzolánicas. El empleo de los metales pesados presentes en las tobas puzolánicas son utilizados como trazadores para discriminar la contaminación asociada a las operaciones en la cantera. Finalmente se evalúa el índice de calidad del aire.

Se incluye además los parámetros de control de los residuales de las aguas de escorrentías para verificar el cumplimiento de las normas de vertimiento mediante el índice de calidad del residual.

CAPÍTULO 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 Contaminación Atmosférica.

La contaminación atmosférica consiste en la presencia de materias o formas de energía en el aire que pueden suponer un riesgo, daño o molestia de diferente gravedad para los seres vivos. Entre las consecuencias directas de la contaminación atmosférica, se podría destacar el desarrollo de enfermedades y afecciones en los seres humanos y la biodiversidad, así como la pérdida de visibilidad en zonas de grandes concentraciones o la aparición de olores desagradables.

Se entiende por contaminación atmosférica a la presencia en la atmósfera de sustancias en una cantidad que implique molestias o riesgo para la salud de las personas y de los demás seres vivos, vienen de cualquier naturaleza, así como que puedan atacar a distintos materiales, reducir la visibilidad o producir olores desagradables. El nombre de la contaminación atmosférica se aplica por lo general a las alteraciones que tienen efectos perniciosos en los seres vivos y los elementos materiales, y no a otras alteraciones inocuas (Díaz Y, et. al.,2004)

El ambiente es definido, según la Ley No. 81 del Medio Ambiente de Cuba (República de Cuba, Gaceta Oficial 1997), como: “el sistema de elementos abióticos, bióticos y socioeconómicos con que interactúa el hombre, a la vez que se adapta al mismo, lo transforma y lo utiliza para satisfacer sus necesidades. La contaminación atmosférica o contaminación del aire es, por consiguiente, una de las formas principales en que puede ser degradado o afectado parte del ambiente, debido a la emisión al aire de sustancias peligrosas a una tasa que excede la capacidad de los procesos naturales de la atmósfera para transformarlos, precipitarlos y depositarlos o diluirlos por medio del viento y el movimiento del aire.

Según su origen, puede ser clasificada por causas naturales o antropogénicas. Las naturales siempre han existido (material particulado que contiene materias biológicas, esporas, polen y bacterias), mientras que las antropogénicas, como su nombre lo indica, son causadas por las actividades humanas.

Los principales mecanismos de contaminación atmosférica son los procesos industriales que implican combustión, tanto en industrias como en automóviles y calefacciones residenciales, que generan dióxido y monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y azufre, entre otros contaminantes. Igualmente, algunas industrias emiten gases nocivos

en sus procesos productivos, como cloro o hidrocarburos que no han realizado combustión completa. En muchos países, la producción de energía es la fuente principal de la contaminación del aire, aunque no la única. La quema de carbón por parte de centrales eléctricas o aquellas plantas basadas en diésel, son dos de las fuentes de emisión más frecuentes y nocivas. De la misma manera, aunque en menor medida en comparación con las anteriores, los procesos industriales y el uso de solventes en industrias químicas contribuyen a la contaminación del aire y el calentamiento global.

Cerca de 25 % de todas las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía provienen del transporte. Estas emisiones producen aproximadamente cerca de 400 000 muertes prematuras al año por la mala calidad del aire. La mitad de ellas son consecuencia de la emisión de diésel debido a la emisión de óxidos de nitrógeno. No cabe duda que el transporte actual es ineficiente, caro e insostenible al no poderse mantener al mismo ritmo sin comprometer a las generaciones futuras. (Díaz Y, et.al, 2004)

La niebla gris que engloba las grandes ciudades es la forma más común en la que se muestra que la contaminación del aire es un problema real siendo ya visible ante nuestros ojos. El aumento de gases de efecto invernadero está provocando un calentamiento generalizado de nuestro planeta y el deterioro de la capa de ozono. Ambos efectos suponen un peligro tanto para la salud de los seres humanos como para la vida de los ecosistemas que ven alterado su equilibrio ecológico.

La acción humana es la principal culpable de la contaminación atmosférica. La quema de combustibles fósiles, como el carbón o el petróleo, es una de las principales causas de este problema ambiental que pone en peligro no solo a nuestra naturaleza sino a nuestra propia salud. Según estimaciones, cada año se producen en el mundo unos siete millones de defunciones atribuibles a la contaminación atmosférica. Los datos de la OMS (WHO, 2021) indican que 9 de cada 10 personas respiran aire cuyos altos niveles de contaminantes superan los límites recomendados en las directrices de la OMS; a ese respecto, los países de ingresos bajos y medianos son los más expuestos. La OMS presta apoyo a los países para hacer frente a la contaminación atmosférica.

Desde el smog suspendido sobre las ciudades hasta el humo en los hogares, la contaminación atmosférica plantea una grave amenaza para la salud y el clima. Los efectos combinados de la contaminación atmosférica ambiente (exterior) y la contaminación del aire en los hogares ocasionan cada año unos siete millones de defunciones prematuras, como consecuencia, en gran medida, del aumento de la

mortalidad por accidente cerebrovascular, cardiopatía coronaria, neumopatía obstructiva crónica, cáncer de pulmón e infecciones respiratorias agudas

La contaminación del aire desde el ámbito doméstico es nociva en dos maneras. Por un lado, porque es el aire que las personas respiran en sus hogares de manera directa, produciendo a medio y largo plazo enfermedades respiratorias; por otro lado, porque repercute en el aire exterior. La fuente de esta contaminación proviene de la quema de madera y combustibles fósiles para actividades como cocinar, calentar o iluminar los hogares.

En el sector de la agricultura hay dos fuentes principales que producen el 24 % de todos los gases de efecto invernadero. Por un lado, la quema de residuos agrícolas y, por otro, el metano y amoníaco que genera la ganadería. Las emisiones de metano son especialmente destacables, puesto que afectan al ozono a ras de suelo. Esta contaminación del aire es causante de enfermedades respiratorias y aumenta el asma. El metano, es además un gas de efecto invernadero (aunque no siempre se refuerce esta idea) que tiene un impacto mayor que el CO_2 a largo plazo (por ejemplo, en períodos de 100 años).

La contaminación atmosférica puede tener carácter local, cuando los efectos ligados al foco se sufren en las inmediaciones del mismo, o planetario, cuando por las características del contaminante, se ve afectado el equilibrio del planeta y zonas alejadas a las que contienen los focos emisores.

1.2 Contaminantes atmosféricos primarios y secundarios.

Los contaminantes primarios son los que se emiten directamente a la atmósfera como el dióxido de azufre SO_2 , que daña directamente la vegetación y es irritante para los pulmones. Los contaminantes secundarios por su parte son aquellos que se forman mediante procesos químicos atmosféricos que actúan sobre los contaminantes primarios o sobre especies no contaminantes en la atmósfera. Son importantes contaminantes secundarios el ácido sulfúrico, H_2SO_4 , que se forma por la oxidación del SO_2 , el dióxido de nitrógeno NO_2 , que se forma al oxidarse el contaminante primario NO y el ozono, O_3 , que se forma a partir del oxígeno O_2 . (Stanley E., 2007)

Ambos contaminantes, primarios y secundarios pueden depositarse en la superficie de la tierra por precipitación. El nitrometano es un compuesto orgánico de fórmula química CH_3NO_2 . Es el nitrocompuesto o nitroderivado más simple. Similar en muchos aspectos al nitroetano, el nitrometano es un líquido ligeramente viscoso, altamente polar,

utilizado comúnmente como disolvente en muchas aplicaciones industriales, como en las extracciones, como medio de reacción, y como disolvente de limpieza. Como producto intermedio en la síntesis orgánica, se utiliza ampliamente en la fabricación de productos farmacéuticos, plaguicidas, explosivos, fibras, y recubrimientos. También se utiliza como combustible de carreras de coches modificados para sufrir grandes aceleraciones (dragsters), y en motores de combustión interna usados para coches en miniatura, por ejemplo, en los modelos de radio-control. deposición seca o húmeda e impactar en determinados receptores, como personas, animales, ecosistemas acuáticos, bosques, cosechas y materiales. En todos los países existen unos límites impuestos a determinados contaminantes que pueden incidir sobre la salud de la población y su bienestar. (Martinez E., 2004)

1.3 Fuentes de contaminación atmosféricas.

La contaminación del aire incluye elementos de origen natural y emisiones resultantes de actividades humanas. Los contaminantes atmosféricos pueden ser compuestos gaseosos, aerosoles o material particulado. El material particulado se caracteriza, a su vez, por partículas suspendidas totales, partículas suspendidas menores a diez micras y partículas suspendidas con diámetro menor a 2,5 micras. Entre las diferentes fuentes de emisiones a la atmósfera podemos distinguir dos grandes tipos: las fuentes fijas y las móviles, las cuales se describen a continuación.

1.3.1 Fuentes fijas.

Existen tres tipos de fuentes fijas generadoras de emisiones:

Fuentes puntuales. Derivadas de la generación de energía eléctrica y de actividades industriales como son: la química, textil, alimentaria, maderera, metalúrgica, metálica, manufacturera y procesadora de productos vegetales y animales, entre otras. Las emisiones derivadas de la combustión utilizada para la generación de energía o vapor, dependen de la calidad de los combustibles y de la eficiencia de los quemadores, mantenimiento del equipo y de la presencia de equipo de control al final del proceso (filtros, precipitadores y lavadores, entre otros).

Fuentes de área. Incluyen la generación de aquellas emisiones inherentes a actividades y procesos, tales como el consumo de solventes, limpieza de superficies y equipos, recubrimiento de superficies arquitectónicas, industriales, lavado en seco, artes gráficas, panaderías, distribución y almacenamiento de gas LP, principalmente. Esta fuente

también incluye las emisiones de actividades como son: el tratamiento de aguas residuales, plantas de composteo, rellenos sanitarios, entre otros. En este tipo de emisión se encuentra un gran número de contaminantes, de muy variado nivel de impacto en la salud.

Fuentes naturales. Se refiere a la generación de emisiones producidas por volcanes, océanos, plantas, suspensión de suelos, emisiones por digestión anaerobia y aerobia de sistemas naturales. En particular a todo aquello emitido por la vegetación y la actividad microbiana en suelos y océanos, que se les denomina emisiones biogénicas, cuyo papel es importante en la química de la troposfera al participar directamente en la formación de ozono. Las emisiones biogénicas incluyen óxido de nitrógeno, hidrocarburos no metanogénicos, metano, dióxido y monóxido de carbono y compuestos nitrogenados y azufrados. (Velasco, 2001)

1.3.2 Fuentes móviles.

Ejemplos de fuentes móviles son los aviones, helicópteros, ferrocarriles, tranvías, tractocamiones, autobuses, camiones, automóviles, motocicletas, embarcaciones, equipo y maquinarias no fijas con motores de combustión y similares, que por su operación generen o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera. Si bien la definición de fuente móvil incluye prácticamente a todos los vehículos automotores. Los motores de los vehículos son los responsables de las emisiones de CO, de compuestos orgánicos volátiles, SO₂, y NO_x, producidos durante la combustión.

1.4 Material particulado como contaminante atmosférico.

Se denomina material particulado a una mezcla de partículas líquidas y sólidas, de sustancias orgánicas e inorgánicas, que se encuentran en suspensión en el aire. El material particulado forma parte de la contaminación del aire. Su composición es muy variada y podemos encontrar, entre sus principales componentes, sulfatos, nitratos, el amoníaco, el cloruro sódico, el carbón, el polvo de minerales, cenizas metálicas y agua. Dichas partículas además producen reacciones químicas en el aire.

El material particulado (particulate matter, PM) consiste de una compleja mezcla de partículas líquidas y sólidas de sustancias orgánicas e inorgánicas suspendidas en el aire y se lo clasifica en función de su diámetro aerodinámico en partículas no inhalables y partículas inhalables (Daniels et al., 2000). Las primeras son retenidas y/o expulsadas

por los mecanismos propios del sistema respiratorio, mientras que las segundas tienen la capacidad de penetrarlo (Cantoni y Ronchetti, 2001).

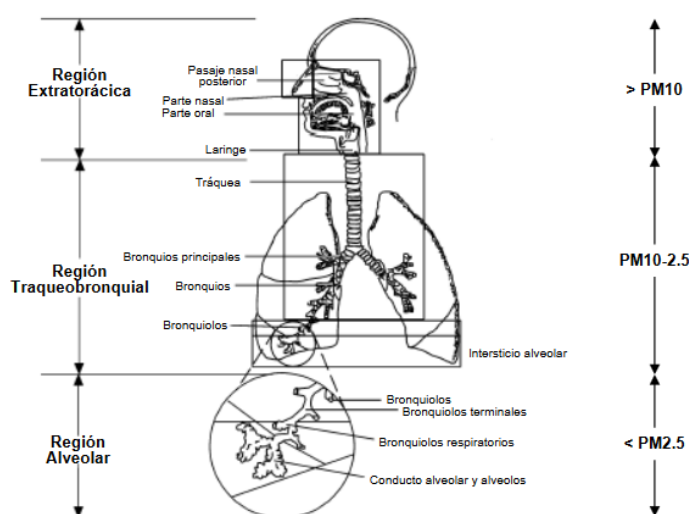
Se cataloga en función de su tamaño y, en el ámbito de la calidad del aire, hablamos de partículas PM₁₀, que serían las de mayor tamaño, cuyo diámetro aerodinámico teórico sería de 10 µm y las partículas finas conocidas como PM_{2,5} cuyo diámetro sería de 2,5 µm.

El efecto en la salud de las partículas se producen a los niveles de exposición normal de la mayoría de la población urbana y rural de países desarrollados o en vías de desarrollo. No hay que realizar una actividad especial ni estar en un entorno especial. La exposición crónica aumenta el riesgo de enfermedades cardiovasculares, respiratorias y cáncer de pulmón.

El material particulado afecta a más personas que cualquier otro contaminante atmosférico (OMS, 2005), y es considerado como uno de los contaminantes más importantes en términos de sus efectos sobre la salud. Aproximadamente 1 400 millones de residentes urbanos, principalmente en los países en desarrollo, están expuestos a niveles de concentraciones de PM superiores a los valores aceptables. (AEAT, 1999 y ALA, 1998)

A partir de numerosos estudios epidemiológicos llevados a cabo en las décadas de 1980 y 1990 se han obtenido suficientes datos para afirmar que existe una correlación significativa entre la exposición al material particulado atmosférico y diversos efectos adversos sobre la salud (Künzli *et al.*, 2010). En estos estudios los niveles de material particulado han sido caracterizados de diferentes formas, incluyendo la concentración en masa total (Partículas en Suspensión Totales, PST), la concentración de algunas de sus fracciones (PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁), la composición química o la concentración de black carbon (BC). Según sus resultados, a modo de ejemplo, en Austria, Suiza y Francia el 6 % de las muertes anuales (aproximadamente 40 000 muertes/año) son atribuibles a la contaminación por partículas atmosféricas (Künzli *et al.*, 2010). Los efectos de la exposición al material particulado atmosférico se observan tanto en episodios de contaminación crónicos como agudos (WHO, 2012). Ambos tipos de episodio conllevan aumentos en los ingresos hospitalarios por enfermedades respiratorias y cardiovasculares, siendo estas las principales causas de los incrementos en la mortalidad.

Figura 1.1 Representación de las diversas regiones del aparato respiratorio humano.



Fuente: EPA, 2002.

El PM_{10} , o material particulado de diámetro aerodinámico igual o inferior a $10\ \mu m$, es uno de los seis contaminantes criterio regulado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) y de acuerdo con el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP), es el contaminante de mayor importancia en las ciudades más pobladas del mundo (Baroutian et al., 2006). Este contaminante tiene la capacidad, una vez que ha ingresado hasta los pulmones, de provocar la irritación de las vías respiratorias y el deterioro de la función pulmonar en el corto plazo, y el desarrollo de enfermedades crónicas, el cáncer o la muerte prematura a largo plazo.

Para ello, las industrias realizan periódicamente diferentes actividades de revisión objetiva, sistemática y documentada de todas sus prácticas y procedimientos, con el fin de verificar el cumplimiento de las normas ambientales, identificar los responsables y hacer cumplir uno de sus objetivos: *Reducir al máximo el impacto de las prácticas inadecuadas sobre el medio ambiente.*

Tabla 1.1 Niveles guía para riesgos a la salud establecidos por la OMS (2006).

Riesgo	Nivel Guía [g/m^3]	Promedio
Crónico	20	1
Agudo	50	24

Fuente: OMS (2006).

Este tipo de partículas son emitidas principalmente por procesos industriales (minería, manufactura de cemento, construcción, producción de cerámica y ladrillos, etc.), el tráfico de vehículos y los procesos de combustión (combustión doméstica de carbón,

incineradores industriales, centrales térmicas, etc.) (Kiely, 2019). En cuanto a las actividades relacionadas a la producción del cemento, el PM es generado principalmente durante los procesos de perforación, voladura y el transporte (en cantera) y la trituración y molienda (en planta). El PM emitido en este tipo de actividad es generalmente caracterizado como un polvo de color gris de diámetro aerodinámico que varía entre 0,05 y 5 μm . (Yang et al., 2013).

1.5 Efectos Bilógicos de la contaminación ambiental por emisiones de polvo.

El polvo puede ser definido a la dispersión de partículas sólidas en el ambiente. Cuando estas partículas son más largas que anchas, hablamos de fibras. La exposición a polvo en el lugar de trabajo es un problema que afecta a muchos y muy diversos sectores (minería, fundición, canteras, textil, panaderías, agricultura.).

Según el tipo de partículas, los efectos sobre la salud pueden ser más o menos graves. No obstante, no hay polvos inocuos; cualquier exposición a polvo supone un riesgo. En general, el polvo provoca irritación de las vías respiratorias y, tras exposiciones repetidas, puede dar lugar a bronquitis crónica. Otros tipos de polvo provocan enfermedades específicas (amianto, sílice, plomo). Hay tipos de polvo que, además, pueden ser explosivos en ambientes confinados (carbón, caucho, aluminio).

Para conocer el tipo de polvo, a veces, es suficiente con saber la composición del material que lo origina. Otras veces, hay que recurrir al análisis químico de muestras de aire. Las partículas más pequeñas son las más peligrosas: permanecen más tiempo en el aire y pueden penetrar hasta los lugares más profundos de los bronquios. El mayor riesgo está, pues, en el polvo que no se ve. Por esto suele medirse no el total de polvo atmosférico, sino sólo el llamado «polvo respirable».

El «polvo respirable» es la fracción de polvo que puede penetrar hasta los alvéolos pulmonares. En la tabla 1.1 se muestra la capacidad de penetración pulmonar del polvo respirable en función del tamaño de las partículas.

Tabla 1.2 Capacidad de penetración pulmonar del polvo respirable.

Tamaño de las partículas	Capacidad de penetración pulmonar
> 50 micras	No pueden inhalarse
10-50 micras	Retención en nariz y garganta
< 5 micras	Penetran hasta el alvéolo pulmonar

Fuente: OMS (2006).

Algunos problemas pueden identificarse sin necesidad de mediciones: nubes visibles de polvo, escapes de polvo de máquinas o instalaciones, acumulación de polvo en suelos o paredes, incorrecto funcionamiento de extractores, etc. Sin embargo, la forma de saber con exactitud cuánto hay, es pesar el polvo recogido en una muestra de aire mediante filtros apropiados o el depositado en una superficie de área conocida. En el primer caso, se separa la fracción respirable y se mide su masa (en mg/m^3) por un método denominado gravimetría, en el segundo caso se pesa la cantidad depositada en la superficie y se determina la tasa de deposición ($\text{mg}/\text{m}^2 \text{ h}$).

Tradicionalmente, las neumoconiosis (enfermedades por exposición a polvos) han sido consideradas como profesionales. Hoy en día representan la quinta parte del total de enfermedades profesionales reconocidas en España. Estos producen muchos otros casos de enfermedades respiratorias (asma, bronquitis crónica, enfisema pulmonar) en las que la exposición laboral a polvo juega un papel importante y, sin embargo, se consideran enfermedades comunes.

Hay una serie de enfermedades específicas relacionadas con los distintos tipos de polvos. En países de la Comunidad Económica Europea han sido aprobado protocolos para la Vigilancia de la Salud de las Enfermedades Respiratorias de mecanismo alérgico (asma, alveolitis y rinitis alérgica), que deberá tenerse en cuenta por los profesionales sanitarios de los Servicios de Prevención.

Entre los efectos nocivos del polvo hay que tener en cuenta:

Efectos respiratorios.

- ✓ Neumoconiosis: silicosis, asbestosis, neumoconiosis de los mineros del carbón, siderosis, aluminosis, beriliosis, etc.
- ✓ Cáncer pulmonar: polvo conteniendo arsénico, cromatos, níquel, amianto, partículas radiactivas, etc.
- ✓ Cáncer nasal: polvo de madera en la fabricación de muebles y polvo de cuero en industrias de calzado.
- ✓ Irritación respiratoria: traqueítis, bronquitis, neumonitis, enfisema y edema pulmonar.
- ✓ Alergia: asma profesional y alveolitis alérgica extrínseca (polveros vegetales y ciertos metales).
- ✓ Bisinosis: enfermedad pulmonar por polvos de algodón, lino o cáñamo.
- ✓ Infección respiratoria: polvos conteniendo hongos, virus o bacterias.

Efectos generales:

- ✓ Intoxicación: el manganeso, plomo o cadmio pueden pasar a sangre una vez inhalados como partículas.

Otros efectos:

- ✓ Lesiones de piel: irritación cutánea y dermatosis (berilio, arsénico, ácido crómico, plásticos, etc.).
- ✓ Conjuntivitis: contacto con ciertos polvos.
- ✓ Riesgo de explosión: las materias orgánicas y metales sólidos pulverulentos, dispersados en el aire en forma de nube, pueden arder con violencia explosiva. Tal es el caso de fábricas de harina, azúcar, piensos, pulido de metales, etc.

Aunque, como ya se ha planteado, ninguna exposición a polvo se puede calificar de sana o segura, grupos de expertos han fijado unos límites técnicos. Estos límites determinan, para diferentes tipos de polvo, qué valores de la fracción respirable se consideran «demasiado polvo». Algunos de estos límites vienen recogidos en la legislación, con lo que se convierten en una obligación para las industrias. Otros pueden usarse como valores de referencia que no deben ser superados. Sin embargo, en general, cualquier límite que no garantice suficientemente la salud de los trabajadores y trabajadoras puede y debe ser rebajado mediante la negociación colectiva. No es aceptable utilizar los límites de exposición a polvo como una línea divisoria entre situaciones absolutamente seguras e inseguras y, menos aún, servirse de los límites como excusa para no mejorar las condiciones de trabajo o para negar la relación entre exposición y enfermedad.

En general, se considera que ninguna persona debe estar expuesta a polvo (conjunto de partículas insolubles en agua que no contienen amianto y su concentración en sílice cristalina es menor del 1 %) en concentraciones superiores a 10 mg/m^3 de polvo total (polvo total = conjunto de partículas que se inspiran de todo el conjunto de materias en suspensión presentes en el aire) o a 3 mg/m^3 de fracción respirable (fracción respirable = parte del polvo total que llega hasta los alvéolos pulmonares), para 8 horas de trabajo. Con respecto a algunos tipos de polvo específicos, a continuación se citan los límites de exposición fijados por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.

- | | | |
|----------------------------|--------------|---|
| ✓ Para el Cemento portland | | $10,0 \text{ mg/m}^3$ (polvo total). |
| ✓ Sílice cristalina (*) | Cristobalita | $0,05 \text{ g/m}^3$ (fracción respiratoria.) |
| ✓ Cuarzo | | $0,1 \text{ mg/m}^3$ (fracción respirable.) |

Para las empresas de áridos, la prevención y el control del nivel de polvo en sus explotaciones, además de ser una obligación legal de seguridad y de medio ambiente, proporciona importantes ventajas:

- ✓ Reduce la afección al entorno de la explotación.
- ✓ Disminuye el riesgo de que los trabajadores contraigan enfermedades respiratorias.
- ✓ Aumenta la vida útil de las instalaciones y de los equipos de trabajo.
- ✓ Ayuda a obtener productos de calidad.
- ✓ Contribuye a la mejora de la imagen de la empresa ante la opinión pública.

Esta situación induce a la necesidad de disponer de estimaciones confiables de las concentraciones del contaminante en los receptores, ya que los costos asociados y dificultades técnicas de diversa índole, hacen que las mediciones de campo no sean viables. Es por ello que surgen como alternativa los modelos de dispersión de contaminantes, que junto a los programas de monitoreo, se convierten en una herramienta fundamental para la toma de decisiones que puedan afectar a la calidad de aire (Seinfeld, 1986).

1.6 Producción u origen de polvos en la minería.

Tanto la minería a cielo abierto como la subterránea originan impactos, no obstante, la primera tiene mayor repercusión directa sobre el medio ambiente ya que afecta a una superficie más extensa y está en contacto directo con otras capas (atmósfera, hidrosfera y biosfera). La minería produce una serie de emisiones a la atmósfera, en diferentes formas, tanto sólidas (polvo, fundamentalmente durante las voladuras, pero también durante la carga y el transporte), gases (piro metalurgia, escapes de vehículos, gases liberados durante algunos procesos concretos), ruidos (voladuras, maquinaria, lanza térmica), y onda aérea.

El polvo emitido por la minería tiene su origen en la disgregación de las rocas durante su preparación, o en el levantamiento de partículas de los caminos durante los procesos de transporte (camiones pesados). En el primer caso, el origen del polvo a su vez puede variado:

- ✓ Puede ser producido durante una voladura. A su vez, si procede de minería subterránea, se emitirá a la atmósfera a partir de uno o varios puntos definidos: las chimeneas de ventilación y los pozos de circulación de aire. Si procede de explotaciones a cielo abierto, provendrá de todo un frente de explotación, más o

menos extenso (decenas de metros de longitud). En cualquier caso, es prácticamente imposible evitar su emisión, puesto que afectará, por principio básico, a roca seca, sin posibilidad de un humedecimiento rápido que evite la dispersión. Solo en la minería subterránea podría evitarse su salida, mediante filtros en los puntos de salida. Desafortunadamente tales filtros tienden a ser evitados para favorecer la rapidez de la limpieza del polvo generado en el interior de la mina durante la voladura. La composición de este polvo será la misma que la de la roca volada, con lo que a menudo se tratará de roca con componentes minerales "problemáticos", conteniendo minerales oxidables, con metales pesados, etc.

- ✓ Polvo generado durante el proceso de carga. En este caso puede ser más sencillo su retención, simplemente mediante el regado de los frentes de carga durante el proceso. La composición es la misma que en el caso anterior, es decir, la correspondiente a la de la mineralización y/o su roca de caja.

Otra posibilidad corresponde al polvo generado durante el proceso de transporte, en su doble vertiente de polvo que pueda escaparse del elemento de transporte (camión o cinta transportadora, fundamentalmente) y polvo levantado por el medio de transporte (solo en el caso de los camiones). En el caso de los camiones, se produce una mezcla entre partículas procedentes del yacimiento y las procedentes de la pista, aunque en ambos casos es relativamente sencillo evitar parcialmente el problema, cubriendo adecuadamente la caja del camión (problemático en los de mayores dimensiones), o regando la carga, así como mediante el riego continuo de la pista de rodadura. En el caso de las cintas, hay que trabajar también con material humedecido, o recurrir a instalaciones de mayor coste, cerradas para evitar los escapes de polvo.

Otra fuente muy importante de polvo son los procesos de molienda. Aquí es fundamental disponer de una instalación adecuada que evite en lo posible los escapes de polvo, puesto que no suele ser posible trabajar con material húmedo, al menos en las instalaciones convencionales.

1.6.1 Efectos patológicos del polvo en la minería.

Las partículas que llegan a la atmósfera constituyen lo que denominamos vulgarmente polvo en suspensión. Su efecto principal es el de oscurecimiento de la atmósfera, pero tiene o puede tener, en función de distintos parámetros, efectos notables sobre la salud de los que lo inhalan. Hay dos cuestiones especialmente relevantes en este sentido: la granulometría de las partículas, y su composición.

ASPECTO GRANOLUMÉTRICO.- En lo que se refiere a la granulometría, las partículas de polvo pueden tener tamaños muy variables, en función de la energía que las sustenta. Esta energía puede ser un fuerte viento, o la fuerza de una erupción volcánica, o una voladura de rocas. En cualquier caso, las partículas de tamaños menores se mantienen sistemáticamente durante periodos de tiempo más largos que las mayores. Las más pequeñas tienen mayores "tiempos de residencia" en la atmósfera, aunque todas tienden a sedimentarse en cuanto la energía de sustentación disminuye lo suficiente o cesa.

En concreto, las de tamaño inferior a $2,5\ \mu\text{m}$ presentan los mayores tiempos de residencia, con diferencia respecto a las de mayor tamaño. Esto hace que a menudo se estudie la distribución de estas partículas, que pueden tener procedencias remotas. Otra cuestión, que afecta especialmente a la salud, es que las partículas de tamaño inferior a $10\ \mu\text{m}$ son capaces de alcanzar las zonas más profundas del sistema respiratorio (pulmones), mientras que las de tamaño mayor suelen quedar retenidas en el tracto respiratorio. Las menores, por tanto son susceptibles de causar mayores daños orgánicos.

Por otra parte, las partículas de estos tamaños menores se suelen originar casi exclusivamente por efecto de procesos de combustión, por lo que suelen ser partículas asociadas a contaminación industrial o urbana.

Las partículas de tamaños mayores tienen a depositarse con mayor facilidad, y se denominan partículas sedimentables. El principal problema que plantean es de suciedad, que puede combinarse con otros fenómenos, como puede ser su alteración en contacto con el agua, generando compuestos de mayor o menor toxicidad ambiental.

Los tamaños de las partículas que contaminan el aire son su mejor descriptor y varios de los equipos de control se seleccionan por esta característica. La cuestión composicional tiene también una gran importancia, puesto que algunas partículas pueden producir efectos muy nocivos. Determinados asbestos pueden producir asbestosis y la sílice, silicosis. En otros casos, contienen metales pesados susceptibles de producir enfermedades concretas: el plomo (a través de combustión de gasolinas) produce saturnismo, el mercurio produce hidrargirismo.

1.6.2 Caracterización de las partículas totales suspendidas y PM10 generados en la minería.

La minería a cielo abierto genera mayores impactos al medio ambiente que la minería subterránea. En particular, causa deterioro a la calidad del aire debido al MP y a los contaminantes gaseosos emitidos a la atmósfera (Ghose, 2007). No solo afecta el interior de las minas, sino también a las áreas de influencia externas. En la minería a cielo abierto, una gran cantidad de estéril es removido para destapar los depósitos minerales. Esto requiere excavadoras, vehículos de transporte, cargadores, bandas transportadoras, etc. Usualmente la explotación a cielo abierto involucra las siguientes actividades generales:

- ✓ manejo de suelos (descapote, transporte y almacenamiento),
- ✓ Perforación y voladura de material estéril,
- ✓ Manejo de estéril (cargue, transporte y descarga) del estéril a zona de botaderos,
- ✓ Manejo de material (Cargue, transporte y descargue a zona de acopio)
- ✓ Otras operaciones (erosión eólica, mantenimiento de vías y tráfico de vehículos).

Los países con altas inversiones en la industria minera son conscientes del peligro potencial que las emisiones de material particulado (MP) pueden causar a corto y largo plazo, dando lugar a la introducción de nuevas directrices, planes, reglamentos y normas (Petavratzi et. al, 2005).

El principal problema de contaminación atmosférica en una zona minera se debe a la presencia de partículas, las cuales pueden ser de carbón, suelo o estéril (Ghose y Majee, 2000). Estas partículas son emitidas a la atmósfera por acción del viento, las fuentes de combustión, los puntos de transferencia de material u otras fuentes en el sitio de la mina. Las fuentes de contaminación del aire pueden dividirse en dos categorías, fuentes puntuales y fuentes fugitivas. Las fuentes puntuales típicamente incluyen chimeneas estacionarias (Ghose y Majee, 2000). En contraste, las fuentes fugitivas son abiertas, tales como los suelos y las pilas de carbón expuestos a la erosión del viento (Ghose y Majee 2000).

Diferentes autores han llevado a cabo estudios de las fuentes de emisión, con el propósito de determinar la tasa de emisión de varias actividades mineras (Chaulya et al., 2002) determinaron fórmulas empíricas para la establecer las tasas de emisión en actividades mineras. Thompson y Visser (2001) describieron las emisiones de material particulado fugitivo y la exposición de las características asociadas con camiones de transporte pesado que transitan en minas a cielo abierto. Describieron modelos para

evaluar la exposición al material particulado dependiendo del material de la vía en función de la carga de la superficie, el tipo de tráfico y volumen transportado y los parámetros de diversos materiales.

Las tasas de emisión en una mina pueden ser diferentes a los estimados con base en los factores de emisión recomendados en la literatura, debido a las diferencias en la naturaleza de la minería, sitios y prácticas de medidas de mitigación, geología y condiciones meteorológicas.

Por lo tanto se hace necesario desarrollar estudios experimentales que tengan en cuenta estas variaciones. En este sentido (*Ghose y Majee, 2007*) determinaron el poder nocivo del material MP aerotransportado alrededor de un área de minería a cielo abierto en la India, tomando como referencia investigaciones previas, en las cuales se demostró que el tráfico vehicular en minas mecanizadas a cielo abierto, puede contribuir a emitir material particulado hasta en un 80 %. De igual forma se estimó que alrededor del 50 % del material minero es lanzado durante el tiempo de viaje en una vía de acarreo destapada, mientras que el 25 % es lanzado durante el cargue y descargue. La perforación es la siguiente fuente más importante de polvo fugitivo. Finalmente, otra fuente importante de polvo fugitivo es debido a la erosión del viento sobre pilas de material.

1.7 Calidad del aire en zonas mineras.

Desde hace mucho tiempo, se sabe que respirar el MP que se produce en las minas es perjudicial para la salud. La exposición de los trabajadores en las minas a cielo abierto varía de 3-5 mg/m³ en frentes de arranque del material y 1-2 mg/m³ en fases de arranque de estéril. Después de las vías de acarreo, la perforación es tal vez la próxima fuente más importante de polvo fugitivo. Durante la perforación de los bancos la concentración de polvo varía entre 1-30 mg/m³. (*Ruj, 2003*)

De acuerdo con otros trabajos, se ha determinado que en áreas de operación minera a cielo abierto las máximas concentraciones de material particulado generalmente se presentan durante el verano y se minimizan en las áreas con estaciones lluviosas. (*Chaulya, 2004, Majee, 2000; Tiwary, 2001; Reddy y Ruj, 2003*). Hasta la fecha, la mayor parte de los trabajos de investigación realizados en calidad del aire, se centran en estudiar la contaminación atmosférica generada por fuentes móviles y fuentes fijas en zonas urbanas. Sin embargo, son pocos los trabajos relacionados con fuentes fugitivas. En el mundo existen múltiples países con importantes áreas de explotación minera a

cielo abierto, las cuales son fuente de gran riqueza y a la vez fuentes fugitivas de material particulado con un gran impacto ambiental sobre las poblaciones aledañas. Los países donde se han realizado el mayor número de trabajos que buscan cuantificar y caracterizar el MP generado por la minería a cielo abierto son India, Reino Unido y USA.

La cuantificación de las emisiones de MP generado en zonas mineras a cielo abierto se realiza por medio de factores de emisión para cada actividad involucrada en el proceso de explotación minera. Existe una gran disparidad en las actividades consideradas en el inventario de emisiones.

La mayoría de los trabajos usan los factores de emisión elaborados por la US-EPA y que esta entidad ha publicado para alguna de las actividades mineras. En pocos casos se han desarrollado factores de emisión propios que tengan en cuenta las condiciones atmosféricas y meteorológicas de cada zona minera en particular.

Se ha encontrado que la composición del MP generado por la minería a cielo abierto, están influenciada por la geología local y el progreso de las operaciones mineras, con consideraciones adicionales que incluyen la topografía del tajo. Sin embargo, se requiere mayor investigación en la determinación en la distribución de tamaño de partícula y descripción de la morfología de las mismas.

Con el propósito de cuantificar la concentración de MP dentro y fuera de las minas, se han puesto en operación redes de monitoreo de calidad del aire. Así como también, se han usado diferentes modelos de calidad del aire. Existe la oportunidad de aplicar los modelos de receptor para determinar los aportes de las fuentes de MP a la contaminación del aire en poblaciones alrededor de los proyectos mineros. La aplicación de estos modelos, debe estar acompañada de una metodología detallada y unificada de inventario de emisiones.

1.8 Modelado de dispersión de contaminantes.

Desde el punto de vista de la dispersión de contaminantes, la modelación se utiliza para saber, entre otras cosas, cómo cambia en el tiempo y el espacio la concentración o la razón de mezcla de una sustancia o traza habitualmente identificada como un contaminante criterio, a objeto de predecir y analizar la calidad del aire y de esta forma colaborar en las decisiones políticas y de planificación respecto a la gestión, mediante el desarrollo de planes, programas, proyectos y normas de emisión o calidad del aire. Este cambio, puede ser descrito por la ecuación de continuidad (modelo conceptual) que

expresa el balance entre las variaciones de la concentración de una traza y el efecto de flujos de transporte, fuentes y sumideros.

La dispersión de los contaminantes en la atmósfera depende de las condiciones meteorológicas de la capa límite atmosférico. En este sentido, la turbulencia y las variaciones direccionales del viento controlan el proceso de dispersión. La estabilidad atmosférica, la topografía de la zona, y la rugosidad superficial del terreno tienen gran influencia sobre la extensión necesaria para que la dilución de las emisiones alcance los niveles deseados. En la zona más cercana a una fuente de emisión es conveniente que la velocidad de salida permita evitar el ingreso de los gases en la estela de la edificación o de la propia chimenea. En la región más alejada, la altura efectiva de emisión debe permitir que los gases alcancen el suelo con el grado de dilución adecuado. Los niveles máximos de concentración de gases emitidos pueden ocurrir, a veces, en condiciones de atmósfera muy estable, y otras veces, con vientos de alta velocidad.

El modelamiento de la dispersión de los contaminantes atmosféricos es una técnica que utiliza modelos matemáticos complejos que tienen por finalidad orientar, en base a los resultados obtenidos, en el diseño de plantas industriales, la planeación de comunidades, la identificación de fuentes significativas y la predicción de concentraciones de contaminantes en receptores seleccionados.

Los resultados de modelos de dispersión gaussianos son comúnmente la representación de mapas con la concentración de los contaminantes a lo largo del área inmediata que rodea a la fuente. En el mapa se plotean las concentraciones calculadas en lugar y se grafican las de isolíneas de concentraciones.

Los modelos de contaminación del aire requieren de la alimentación de datos tales como el tipo, carácter y distribución de las fuentes, así como los contaminantes emitidos, las variables meteorológicas que determinan el transporte, la dispersión y las reacciones químicas de los contaminantes en la atmósfera.

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

a) Datos de la fuente: ubicación de chimeneas y otras fuentes (coordenadas), altura física de la chimenea y su diámetro interno, velocidad de salida del gas desde la chimenea, temperatura y tasa de emisión del contaminante. Este último normalmente se expresa en valores promedio temporales (por 1 hora, 24 horas o 1 año). Algunos modelos de dispersión pueden requerir de datos de entrada adicionales tales como la elevación de la fuente y el terreno, dimensiones de edificaciones próximas (por ejemplo,

el ancho promedio del edificio y el espacio entre los edificios), distribución del tamaño de la partícula y sus correspondientes tasas de deposición y coeficientes de reflexión superficial.

b) Datos meteorológicos: La mayoría de los modelos gaussianos acepta datos meteorológicos de superficie que consideran la clasificación de estabilidad a cada hora, dirección y rapidez del viento, la temperatura atmosférica y la altura de la capa de mezcla. Es deseable que como mínimo se disponga de un año de datos meteorológicos. Sin embargo, en aquellos casos donde algunos datos de largo plazo están disponibles sólo para la región (típicamente, lecturas tomadas en un aeropuerto), las observaciones locales para el sitio bajo examen pueden ser obtenidas a partir de éstas, previa revisión de los datos de largo plazo obtenidos en la región. Cuando sea necesario, una estación meteorológica local debiese ser instalada y operada por al menos un año.

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

La capacidad de dispersión de la atmósfera respecto de los contaminantes vertidos en la misma depende de las condiciones meteorológicas, en especial de la velocidad del viento y de la turbulencia atmosférica. La velocidad del viento condiciona la rapidez con la cual el contaminante se separa de la fuente que lo ha originado, mientras que la turbulencia atmosférica posibilita los efectos de mezcla y dispersión del contaminante. En general, se requiere el conocimiento de la dirección y velocidad del viento, así como la turbulencia atmosférica. Los parámetros dirección y velocidad del viento se pueden conocer directamente por mediciones anemométricas a una cierta altura o por los registros rutinarios en observatorios meteorológicos, pero la turbulencia atmosférica no es susceptible de medición directa.

La turbulencia se relaciona con otro parámetro más fácil de determinar ¿cómo es la estratificación atmosférica, la cual puede ser estable, inestable o neutra? La estratificación atmosférica se divide en categorías de estabilidad, correspondiendo a cada una de estas categorías un grado de desarrollo de la turbulencia. Son las categorías de estabilidad, junto con la velocidad del viento, las que se tienen en cuenta en los cálculos de concentración de contaminantes a nivel del suelo.

El propósito fundamental de los cálculos de dispersión atmosférica es evaluar las concentraciones de uno o más contaminantes, en el espacio y en el tiempo, relacionadas con una serie de variables independientes tales como emisiones a la atmósfera,

condiciones meteorológicas, características del terreno y parámetros que describen los procesos de transformación y eliminación.

El modelamiento de la dispersión de los contaminantes atmosféricos es una técnica que utiliza modelos matemáticos complejos que tienen por finalidad orientar, en base a los resultados obtenidos, en el diseño de plantas industriales, la planeación de comunidades, la identificación de fuentes significativas y la predicción de concentraciones de contaminantes en receptores seleccionados.

Los modelos de contaminación del aire requieren de la alimentación de datos tales como el tipo, carácter y distribución de las fuentes, así como los contaminantes emitidos, las variables meteorológicas que determinan el transporte, la dispersión y las reacciones químicas de los contaminantes en la atmósfera. Los modelos de cálculo se pueden agrupar de la siguiente manera:

- ✓ Formulación analítica explícita (modelos Gaussianos).
- ✓ Modelos numéricos, basados en la formulación de ecuaciones diferenciales.
- ✓ Modelos estadísticos.

En los modelos analíticos o numéricos, las concentraciones se calculan a partir del inventario de emisiones, de las condiciones meteorológicas, de las características del terreno, y en algunos casos considerando también la eliminación de contaminantes por deposición o reacciones químicas. Estos cálculos se llevan a cabo resolviendo la ecuación del transporte bajo diferentes hipótesis simplificadoras. Se utilizan para calcular concentraciones promedio para intervalos de tiempo cortos o largos.

Los modelos estadísticos permiten conocer la concentración de contaminantes a partir de los parámetros meteorológicos, y después de haber obtenido unas relaciones empíricas por medio de las series históricas de mediciones de contaminación. En estos casos no es necesario disponer de un inventario de focos de emisión. Se utilizan para hacer predicciones a corto intervalo de tiempo.

Para el modelado de la dispersión de PM se utilizara una implementación del modelo Gaussiano desarrollado a partir de investigaciones sucesivas de Turner (1964, 1970), Gifford (1960) y Pasquill (1974) entre otros, llegando a su derivación matemática con las siguientes suposiciones:

- ✓ emisión continua y sin variación en el tiempo,
- ✓ conservación de masa durante el transporte del contaminante,
- ✓ condiciones meteorológicas constantes durante el transporte, y
- ✓ distribución gaussiana vertical y lateral de la concentración.

Los modelos de dispersión de contaminantes tienen la capacidad de modelar fuentes puntuales (elevadas o a nivel del suelo), fuentes de área (por ejemplo zonas de actividad minera), fuentes volumétricas (varias fuentes puntuales de distintas alturas de emisión), y minas a cielo abierto (*Ghenai y Lin, 2006*).

Los programas informáticos de modelación de plumas Gaussianas en estado estable, pueden ser utilizados para estudiar la concentración de contaminantes de una amplia variedad de fuentes asociadas a la industria. El programa informático SREEN3 cumple con las especificaciones para modelos de calidad de aire establecidas por la USEPA, puede predecir la dispersión de la emisión de fuentes puntuales, tipo área, lineales y volumétricas, la deposición de partículas y la elevación de una pluma en función del viento, con diversas fuentes y dentro de un área limitada.

La base para modelar es la ecuación de la pluma Gaussiana recta en estado estable; es decir que al modelar la emisión se representa su comportamiento mediante ecuaciones matemáticas. La teoría Gaussiana que fundamenta los modelos de dispersión sostiene que una pluma emitida por una fuente viaja a favor del viento y se dispersa siguiendo un patrón Gaussiano.

Siendo así, el SREEN3 permite considerar áreas de modelado consistentes en mallas de tipo Lagrangiano en las cuales puede considerarse la topografía de la zona, el modelo se basa en la resolución de las ecuaciones de difusión atmosférica con las condiciones de contorno apropiadas a cada situación particular de meteorología. La Suposición fundamental está dada en que la concentración de contaminantes en la dirección del viento puede ser descrita utilizando una distribución normal o de gauss.

CAPÍTULO 2: CARACTERIZACIÓN DE LA EMPRESA Y PROCEDIMIENTO A SEGUIR.

En el presente capítulo se realiza una caracterización de la empresa mixta Cementos Cienfuegos S.A, se realiza la descripción de la cantera objeto de estudio y se describe al procedimiento a emplear para el diseño del programa ambiental.

2.1 Caracterización de la Cementos Cienfuegos S.A.

En el mes de Junio de 1975, se confeccionó el expediente de Tarea de Inversión para la Fábrica de Cemento Karl Marx, donde se define la microlocalización para la construcción de las instalaciones, la red de comunicación vial necesaria a construir, las fuentes de abasto de agua y las soluciones necesarias a gestionar para la fábrica. En esta etapa fueron analizados los indicadores tales como los requerimientos de abastecimiento de materias primas y factores socio - económicos para la ejecución y puesta en marcha de la industria.

El 8 de marzo de 1980 comienza la explotación del primero de los tres hornos, lo cual permitió un aumento considerable en la producción nacional de este renglón. La Fábrica de Cementos “Karl Marx”, finalmente fue inaugurada por nuestro Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz y el presidente de la RDA “Eric Honeker”. Con tecnología de producción de vía seca, la Fábrica está conformada tres líneas paralelas de producción con una capacidad instalada de 1 500 000 t/a de clínker (tres hornos rotatorios de 500 000 t/a de clínker).

Después de 21 años de explotación., en el año 2001 se decide la constitución de las Empresa Mixta Cementos Cienfuegos S.A. que comienza con un proceso de mantenimiento general a la línea 1, continuando con la rehabilitación y modernización de la línea 3, para restablecer su capacidad productiva y alcanzar su capacidad de diseño. En noviembre del 2004 se realiza la puesta en servicio de la línea 3.

El comportamiento productivo de la Fábrica ha ido en ascenso, el año 2007 cerró con una producción superior al Millón de toneladas de clínker y se implantaron nuevos record históricos de producción para un mes. En el año 2009 se alcanzó la mayor producción registrada desde su restructuración llegando al millón ciento seis mil toneladas de clínker.

Principales Clientes: la producción de cemento y clinker es destinada íntegramente a la Unidad de Base Empresarial Comercializadora de Cemento (UBECOCEM); aunque

está prevista en un futuro la exportación de clinker y cemento directamente por Cementos Cienfuegos S.A.

Los Principales Proveedores son: Geominera; Empresa de Asistencia y Servicio Cienfuegos; Empresa de Mantenimiento Cemento Vidrio; Acueducto y Alcantarillado Cienfuegos; Unidad Básica Empresarial Eléctrica Cienfuegos; CUBALUB, REFRACTECNIC, UDECAM, CUBIZA, IZAJE, SEPSA; CEDAI; COMETAL; MIMVEX; TRASMETRO; Ferrocarriles; Cubana de Aviación; Cuba Control; SERVITALLE; MAMBISA; AGR y Centro Nacional para la Certificación Industrial (CNCI).

2.1.1 Ubicación, extensión y límites.

La Empresa Mixta Cementos Cienfuegos S.A. se ubica en el Municipio Cienfuegos, extendida sobre áreas de la Llanura de Cienfuegos con coordenadas 220 09' 20" de Latitud Norte y los 800 15' 19" de Longitud Oeste. Se encuentra entre las empresas que con sus inversiones han mejorado sustancialmente las condiciones medioambientales en el territorio.

Esta importante instalación industrial, la mayor en Cuba y una de las más grandes de Latinoamérica, se encuentra muy cercana a asentamientos poblacionales tanto urbanos como rurales, entre los que se destacan:

- ✓ Al Norte, viviendas rurales dispersas.
- ✓ Al Este, los asentamientos, Dolores, Codicia y Cumanayagua.
- ✓ Al Sur, los asentamientos, Guaos, Pepito Tey y las instalaciones del Jardín Botánico.
- ✓ Al Oeste, los asentamientos, Lagunillas, La Josefa y la ciudad de Cienfuegos, encontrándose ésta aproximadamente a 14 km de la fábrica.

2.1.2. Descripción del entorno medio ambiental y socioeconómico. (Información obtenida del examen previo realizado en el 2015).

Geología y geomorfología. El relieve del territorio del emplazamiento está formado por una extensa llanura de origen fluvial, denudativa erosiva, asociada al río Caunao, con manifestaciones acumulativas y ondulaciones de alturas variables desde 60 hasta 100 m sobre el nivel medio del mar. En esta zona no se aprecian manifestaciones cársticas evidentes.

Hidrología. La instalación se localiza en los límites de las cuencas subterráneas CF 6, Cienfuegos y CF 7, Cumanayagua, estas cuencas tienen una profundidad de yacencia de las aguas entre 5 a 10 m, pudiendo oscilar hasta 2 m con el ciclo hidrogeológico. En ambas cuencas existen reservas de aguas subterráneas. Sobre áreas de la cuenca hidrográfica Caunao, se encuentra la mayor cantidad de instalaciones de producción y apoyo a la producción de la fábrica, constituyendo esta cuenca con mayor probabilidad de impacto ambiental.

Clima. Desde el punto de vista climático, el emplazamiento está confinado en una zona tropical poco húmeda de valle, que se caracteriza por ser caliente y lluviosa, más seca en los meses de Noviembre a Abril y húmeda de Mayo a Octubre. La región es afectada por los sistemas de vientos locales: las brisas de valle y una débil influencia de la brisa marina. Los vientos de mayor persistencia son los Alisios con componente ENE, predominante, en el área de interés.

Los factores climatológicos inciden en el comportamiento de la distribución del contaminante, en particular por las emisiones de gases y partículas de polvo que se generan en el proceso. Para la determinación de la ubicación de los puntos de muestreo se tiene en cuenta el factor eólico, incluyendo dentro de sus parámetros la velocidad media anual del viento por rumbos y la frecuencia promedio anual del viento por rumbos. La calidad del aire en toda la zona y fundamentalmente en las direcciones OS, está sujeta a posibles impactos ambientales asociadas al aporte de contaminación generada por la propia fábrica por la emisión a la atmósfera de sólidos sedimentables y en suspensión.

Caracterización biótica. La flora del territorio está compuesta por residuos de bosque semicaducifolio sobre caliza degradado, cultivos agrícolas, áreas de pastos y residuos de palmares, siendo, además, característico, que aparezcan árboles frutales y maderables en grupos o individuos aislados en casi todo el territorio.

Entre las especies faunísticas autóctonas más importantes están los peces Lisa (Mujil curema), Biajaca (*Cychlasoma tetracantha*) y Mapo (*Dormitator maculatus*); los reptiles Majá de Sta. María (*Epicrates angulifer*) y Jubo Criollo (*Alsophis cantherigerus*); las aves Pedorrera (*Todus multicolor*), Zunzún (*Chlorostilbon ricordii*) y Gavilán de Monte (*Buteo jamaicensis*); y los mamíferos Venado (*Odocoileus virginianus*) y Murciélago Frutero (*Artibeus jamaicensis*).

2.2 Canteras en explotación.

Las materias primas empleadas para la elaboración del cemento son fundamentalmente de origen calcáreo: piedra caliza, margas y yeso; además de toba puzolánica y perdigón. Cerca de la fábrica, se encuentran la mayoría de estos yacimientos.

2.2.1 Cantera de caliza.

El yacimiento Cantabria, constituido por calizas margosas y margas calcáreas, aporta óxido de calcio a la mezcla de cemento y se utiliza en un 70 %; se encuentra localizado al este de la ciudad de Cienfuegos a 15 km de la misma y 2 km de la Empresa Cementos Cienfuegos S.A., las coordenadas del centro del yacimiento son: X=460 455.30 y Y=145 863,44. Este yacimiento posee una reserva de 226,61 millones de toneladas y se encuentra en una zona donde el relieve está formado por medianas alturas de hasta 120 m sobre el nivel medio del mar. El material es trasladado hasta la fábrica por camiones y esteras transportadoras.

En la foto de la figura 2.1 se muestran una vista satelital del yacimiento, donde se pueden observar las estructuras de la cantera y una sección del vial sin pavimentar que se utiliza para el traslado del material.

Figura 2.1 Yacimiento de calizas “Lomas Cantabrias”.



Fuente: Google map.

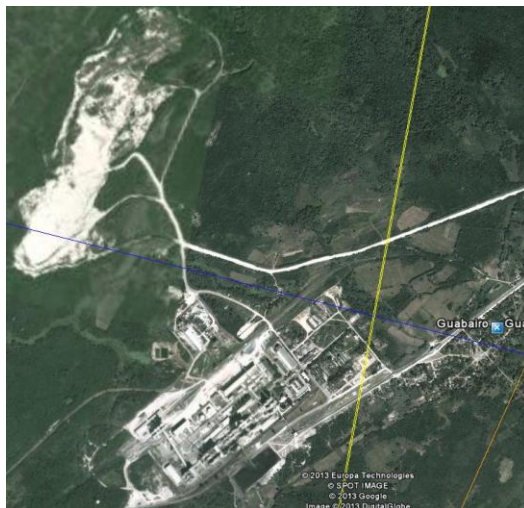
2.2.2 Cantera de marga.

El yacimiento de marga “Las Pailas” está situado en la provincia de Cienfuegos en el municipio del mismo nombre a unos 15 Km al este de esta ciudad y a 0.8 Km al Oeste de la Empresa Cementos Cienfuegos S.A. Las coordenadas del centro del yacimiento según el sistema Lambert son: x= 569 400; y= 258 786. El yacimiento está siendo

explotado mediante canteras desde el año 1974. El yacimiento ocupa un ancho de 1 060 m 1 800 m de largo.

El yacimiento “Las Pailas” pertenece a la formación Vaquería y tiene edad Eoceno Superior. La formación productiva del yacimiento esta desarrolladas por margas calcáreas, margas arcillosas y margas intemperizadas. En la foto de la figura 2.2 se muestran una vista satelital del yacimiento.

Figura 2.2 Yacimiento de marga “Las Pailas”.



Fuente: Google map.

2.2.3 Cantera de zeolita.

El yacimiento Tobas Carolinas se encuentra situado aproximadamente 900 km del poblado Carolina, a 12 Km al Noroeste de la ciudad de Cienfuegos con coordenadas Lambert: $X_1:550\ 000$ y $Y_1:264\ 600$; $X_2:551\ 200$ y $Y_2:265\ 800$. El yacimiento se enmarca dentro de llanuras denudativas, planas y onduladas con alturas entre 5 y 40 metros de edad las alturas disminuyen de norte a sur. En el anexo 1 y 2 se muestran vistas satelitales del yacimiento.

Esta zona se caracteriza por presentar temperaturas entre $9\ ^\circ\text{C}$ Y $36\ ^\circ\text{C}$. Las temperaturas medias mensuales oscilan entre $22\ ^\circ\text{C}$ Y $27\ ^\circ\text{C}$. Las precipitaciones fluctúan entre 1 200-1 400 mm. En el período lluvioso (mayo-octubre) de 1 100 a 1 200 mm y menor de 250 mm en el período seco (noviembre-abril).

La evaporación media anual varía entre 1 700 mm y 1 800 mm, predominan los vientos del ON. El promedio de velocidad del viento es 1.2 m/s. La red hidrográfica existente en el área, la constituyen los afluentes de los ríos Damují y Saladito, los cuales rodean el área por el Oeste y Este-Sureste respectivamente.

Las poblaciones más cercanas son carolina a 1,5 Km y la ciudad de Cienfuegos.

Existen comunicaciones por carretera de Cienfuegos a Rodas y de ésta a Carolinas.

El yacimiento Tobas Carolinas pertenece a la zona estructuro facial Zaza. Esta corresponde al miembro Carolinas siendo una unidad litoestratigráfica que se encuentra por debajo de la formación Cantabrias. Las tobas yacen en forma de capa subhorizontal con inclinación de 5 °- 6 °. Humedad oscila entre 27,6 % hasta 35,9 % con un promedio de 30 %. La masa volumétrica 1,43 g/cm³.

Tobas: son las rocas compuestas por los productos de las erupciones volcánicas, es decir por cenizas, fragmentos de rocas volcánicas alteradas y lanzadas por la fuerza de la erupción fuera del flujo de lava.

Tabla 2.1 Composición Química de la Materia Prima.

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	Mn (%)	P ₂ O ₅ (%)
53,21	11,19	4,72	10,97	1,28	1,29	1,12	0,09	0,25

Fuente: Laboratorio de control calidad de Cementos Cienfuegos S.A.

La longitud máxima del yacimiento desde el Sur al Norte es de 910 m y desde el Oeste al Este es de 910 m. El área es de alrededor de 0.8 Km². (*Mudrik Vladimir; Santisteban Isidoro; Almenares Victoriano; et al 1984 Informe exploración orientativa y detallada tobas "Carolinas"*)

El mineral de Tobas Carolina, es utilizado como fuente aportadora de álcalis que intervienen en la fabricación de Clinker y como aditivo activo en el proceso de producción de cemento en la Empresa Mixta Cementos Cienfuegos S.A.

El incremento de la producción de Clinker por Cementos Cienfuegos ha demandado también un incremento en los volúmenes de puzolana utilizados en la fabricación de cemento. Durante los últimos 5 años se han realizado las producciones de cementos puzolánicos (tipo PP 25) con adición de hasta un 18 % de puzolana. Este plan contempla un incremento de la cifra de puzolana demandada en las producciones de cementos puzolánicos que están proyectadas para el 2014, por lo que habrá un incremento en los volúmenes a extraer.

2.2.3.1 Programación de la Producción.

Anualmente la fábrica necesita aproximadamente 242 764 t de esta materia prima para producir 1,2 millones de toneladas de Clinker. El yacimiento como fuente aportadora de

álcalis que intervienen en la fabricación de Clinker, se planifican volúmenes a extraer. Desde el punto de vista geológico, el depósito está formado por rocas de la formación Cantabria, representados por tobas, tufitas, areniscas, calizas, tobas aleurolíticas y arcillas, del miembro Carolina, perteneciente a dicha formación, estas rocas pertenecen a las formaciones efusivo-sedimentario piro clásticas, compuestas en general por materiales efusivos precipitados directamente como resultado de las erupciones volcánicas. Todas ellas pertenecen a la edad Maestrichtiano. Las rocas encajantes están formadas por calizas de origen organógeno, rocas arcillosas originadas por los residuales o descomposición química de las rocas primarias y areniscas tufíticas que por su origen se aproximan a las tufitas pero con predominio visible del componente sedimentario. La secuencia útil, yace en forma de capa sub horizontal con inclinación de 5-6 grados. Afloran en algunas zonas del yacimiento.

En cuanto a la calidad del depósito, este yacimiento está compuesto por dos tipos fundamentales de mineral (tobas y tufitas) en un 83 y 17 % respectivamente. Las tobas, presentes en sus variedades vitroclásticas y litovitroclásticas, están ubicadas en la parte superior del yacimiento y muestran un grado de intemperización bastante avanzado. Ambos tipos, tanto las tobas como las tufitas tienen un comportamiento tecnológico acorde con los requerimientos para aditivos minerales activos.

Los camiones de carga realizaran un viaje cada 2 horas. Los caminos diseñados para camiones de carga de 30 t, tendrán una pendiente máxima de 3 % y un ancho de 10 m, incluyendo el canal de desagüe y las bermas de seguridad. Teniendo en cuenta el método de minado, el avance tendrá lugar por medio de bancos de 5 m de altura, el avance contempla el acceso a cada banco. Durante todo este año, la extracción estará concentrada en dos frentes, el +10 y +5. Las plataformas de trabajo, igualmente, están concebida con un ancho mínimo de aproximadamente 23 m teniendo en cuenta los cálculos teóricos, suficiente para garantizar las operaciones de carga, transporte y maniobrabilidad del equipamiento.

2.2.3.2 Programación de la Producción.

El programa de producción concebido para este yacimiento está estructurado por campañas, es decir, se preparan condiciones en el yacimiento, se reapila el material en cantidad suficiente para poder cargar sin interrupción un número alto de camiones durante varios días cubriendo 24 horas en 2 turnos y después se recesa en transporte

para cubrir otras operaciones mineras hasta la próxima ocasión (7 camiones Astra de 30 t).

2.2.3.3 Caracterización socio-demográfica del entorno de la cantera. Población expuesta.

El entorno socioeconómico del entorno de las canteras se caracteriza por la presencia de un sistema de asentamientos de núcleos, tanto rurales como urbanos, así como la existencia, de pequeños núcleos de población dispersa. La población residente, posee en la zona varias fuentes de empleo, destacándose las actividades, agrícolas, pecuarias, industriales, científico - educativas, turísticas y sociales.

La tenencia de la tierra está muy relacionada con su uso, cultivos varios, frutales, viandas y hortalizas, otras con presencia de ganado, uso industrial con instalaciones como refinería de petróleo, talleres de mantenimiento, y otras áreas, donde se conjugan las actividades de investigación de la ecología y la biodiversidad, con objetivos educativos, turísticos y de interés para la comunidad.

Las partículas de polvo que se producen durante las voladuras, alcanzan altas temperaturas y pueden flotar en el aire mucho más por el día, debido a las corrientes ascendentes, con una mayor su dispersión. La mayor deposición por área se produce en horas de la noche, debido a la disminución de las temperaturas y el aumento de la humedad.

2.3 Caracterización del material de canteras.

El inicio del estudio debe centrarse en la caracterización del material de canteras en relación a la concentración de los metales pesados, los que serán utilizados posteriormente como elementos trazadores para discriminar a partir de la relación entre el material de zeolita de la cantera y el material depositado en el punto de interés la concentración asociada a las operaciones de la cantera. de la contaminación global.

Para una adecuada la selección del trazador se utilizarán dos criterios fundamentales:

1^{er} Criterio: El metal pesado se encuentra en la muestra de la materia prima de la cantera en una proporción superior al 70 % respecto a una muestra colectada en fuera de ella. Este valor se establece ya que las tobas del yacimiento son muy ricas en metales muy específicos pero muy pobres en Hg, Pb, Zn, Cu, Cd, Co, Fe.

2^{do} Criterio: El metal pesado se encuentra en la muestra del material colectado fuera de la cantera en una proporción superior al 60 %, este valor está dado en que existen metales como los descritos en el criterio anterior que existen en el territorio fuera de la cantera.

La caracterización debe ser realizada a partir de muestras de la cantera de toba suministradas por Cementos Cienfuegos S.A., por el método de espectrometría de absorción atómica en un laboratorio acreditado para estos ensayos, con el objetivo de garantizar que los resultados sean los más exactos y representativos. Para ello se propone que estos ensayos sean realizados en el Laboratorio Ambiental de Cienfuegos.

2.4 Determinación del termino fuente.

El termino fuente no es más que la caracterización de un evento de una instalación, cantidad de material que escapa al medio ambiente; suelen especificarse, además de las actividades, las formas químicas, la composición y los estados de agregación de los productos liberados. Para ello se tomará como base lo que se establece en la NC 1049: 2014 Guía de Datos Tecnológicos para el Inventario de Emisiones de los Contaminantes Atmosféricos desde Fuentes Industriales Estacionarias. En el caso de las canteras de toba se incluirán los parámetros de entrada de los softwares de dispersión que serán utilizados para modelar la dispersión de contaminantes:

- ✓ Tipo de emisor. Por tipo de emisión se adoptará la geometría de fuente plana para la cantera y lineal para el caso de los viales, incluyendo los caminos mineros, a partir de los cuales podrá aplicarse las ecuaciones para estimar las emisiones de contaminantes.
- ✓ Altura de emisión. La altura de la emisión se tomará a nivel del suelo o sea el nivel de la plataforma de la cantera, y esta a su vez ubicada a una altura h sobre el nivel del mar
- ✓ Condiciones ambientales: Temperatura, humedad, precipitación, altura de capa de inversión; se tomarán de los datos disponibles en la entidad a partir de las investigaciones meteorológicas realizadas en la región de ubicación de las canteras.

2.4.1 Características meteorológicas de la zona de dispersión de la emisión.

- ✓ Estabilidad atmosférica. Las categorías de estabilidad empleadas en la modelación de la dispersión para facilitar la estimación de los parámetros de la dispersión lateral y vertical son los usados en los modelos Gaussianos. Para el esquema de

clasificación de la estabilidad se aplicó el método de Turner (1964), que se detalla en la siguiente tabla.

Tabla 2.2 Método de Turner para estimar la estabilidad atmosférica.

Velocidad del viento U (m/s)	Día: Insolación				Cielo cubierto: Nubosidad 10/10, Altura < 2133.6 m	Noche: Nubosidad	
	Fuente, $\alpha > 60^\circ$	Moderada, $35 < \alpha < 60^\circ$	Ligera, $\alpha < 35^\circ$	Débil, $\alpha < 15^\circ$		> 4/10	$\leq 4/10$
0-0.77	A	A	B	C	D	F	F
0.77-1.80	A	B	B	C	D	F	F
1.80-2.83	A	B	C	D	D	E	F
2.83-3.34	B	B	C	D	D	E	F
3.34-3.86	B	B	C	D	D	D	E
3.86-4.89	B	C	C	D	D	D	E
4.89-5.40	C	C	D	D	D	D	E
5.40-5.92	C	C	D	D	D	D	D
≥ 5.92	C	D	D	D	D	D	D

Fuente: Turner (1964)

Los parámetros básicos considerados para clasificar la estabilidad según este método son los siguientes: velocidad del viento, medida a 10 m sobre el nivel del terreno y la estimación de la insolación diurna, en base al ángulo de elevación solar y la nubosidad (% de cielo cubierto y altura de la base de las nubes) durante el día.

- ✓ Velocidad del viento [m/s]. Las velocidades del viento son medidas con anemómetro.
- ✓ Dirección hacia la que sopla el viento (de 0 a 360 grados). Debe ser considerada las rosas de los vientos, pero para efecto conservador se recomienda tomar como dirección predominante la dirigida hacia los puntos con mayor población
- ✓ Temperatura del aire [°K]. La temperatura del aire debe ser tomada como la media mensual en el lugar.
- ✓ Altura de la capa de inversión desde el nivel del mar. Una inversión térmica es una derivación del cambio normal de las propiedades de la atmósfera con el aumento de la altitud. En efecto, el aire no puede elevarse en una zona de inversión, puesto que es más frío y, por tanto, más denso en la zona inferior. Puede llevar a que la contaminación aérea, quede atrapada cerca del suelo, con efectos nocivos para la salud. Una inversión también puede detener el fenómeno de convección, actuando como una capa aislante.

La altura de la capa de inversión es un parámetro básico en la modelación de la dispersión de los contaminantes atmosféricos por cuanto es la zona inferior de la atmósfera donde ocurre fundamentalmente el transporte turbulento de masa y energía y donde los contaminantes se trasladan e interaccionan. Para el cálculo existen varias

alternativas que pueden ser empleadas en dependencia de los datos de que se dispone, en este caso las alturas de la capa de inversión se obtienen a partir de las categorías de estabilidad atmosférica obtenidas en la siguiente tabla.

- ✓ Tipo de zona Se analizará para una zona rural
- ✓ Rugosidad del terreno. La rugosidad del terreno se refiere a la tipología del terreno que pudiera influir en la dispersión del contaminante en la atmosfera (elevaciones, vegetación, edificaciones, etc.).

En este caso se deben determinar el término fuente por separado para las canteras de caliza y de marga ya que las características de ambas canteras no son semejantes.

2.4.2 Cálculo del factor de emisión.

Un factor de emisión es una relación entre la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera y una unidad de actividad. En general, los factores de emisión se clasifican en dos tipos: los basados en procesos y los basados en censos. Por lo común los primeros se usan para hacer estimaciones de las emisiones de fuentes puntuales, y a menudo se combinan con los datos de actividad recopilados con encuestas o con balances de materiales. Por otra parte, los factores de emisión basados en censos, se usan mucho para hacer estimaciones de las emisiones de fuentes de área.

La publicación AP-42 Compilation of Air Pollutant Emission Factors [U.S. EPA, 1995^a] es la fuente más completa de factores de emisión. Otra forma de calcular el factor de emisión es mediante datos de emisión de la fuente, determinado mediante mediciones directa, pero en este trabajo no contamos con el equipamiento necesario para ello, por lo que se propone como método alternativo para una estimación futura.

Para la determinación de la emisión durante la perforación en la cantera se empleará la siguiente expresión (EPA-42).

$$E = k * N * 0,4536 \quad (1)$$

Dónde:

N: número de perforaciones al año.

k: Factor de corrección $k_{PM_{10}} = 0,68$

Para la determinación de la emisión (kg/voladura) durante la voladura:

$$E = 0,00022(A)^{1.5} \quad PTS \quad (2)$$

$$E = 0,000114(A)^{1.5} \quad PM_{10} \quad (3)$$

Dónde:

A: Área removida por voladura m^2 .

PST: Tabla 11.9-2 de la sección 11.9 “Western Surface Coal Mining” del AP-42 de la

EPA. Octubre 1998

PM₁₀: Tabla 2 de la Guía “Emission Estimation Technique Manual for Mining” (NPI

Australia). Enero 2012

Carga de material apilado.

Las ecuaciones asociadas al manejo de material pulverulento son válidas para cualquier tipo de minería y se expresa de la manera siguiente:

$$EA = K * 0.0016 (U/2.2)^{1.3} / (m/2)^{1.4} \quad (4)$$

Ecuación del apartado 13.2.4.3. Capítulo 13.2.4 “Agregated Handling and Storage Piles” EPA AP-42. Noviembre 2006

Dónde:

EA= emisiones de partículas por material apilado

K= factor adimensional en función del tamaño aerodinámico de las partículas. Toma los valores de 0,35 en PM₁₀ y 0,74 en PST.

U= Velocidad media anual del viento. Se puede solicitar al instituto de meteorología.

m= Humedad de los materiales (%). Se recomienda el uso de datos de humedad obtenidos de campañas de muestreo.

Durante el acarreo de material desde la cantera se producen emisiones de material particulado debido a la resuspensión de este en caminos pavimentados y no pavimentados, por tal motivo, se debe determinar las emisiones de cada uno de los tramos en los que se dividen los viales teniendo en cuenta que cada tramo tendrá un factor de emisión propio. Asimismo, se debe determinar los factores de emisión en función de si se trata de viales industriales pavimentados o no pavimentados, para ello:

- ✓ Calcular los FE, emisiones en kg/(vehículo-km) para cada tramo
- ✓ Calcular la carga contaminante anual emitida (kg) en cada tramo a partir de los km totales recorridos por
- ✓ todos los vehículos que pasan por ese tramo y el FE. anterior
- ✓ Sumar las emisiones anuales de cada tramo para el cálculo de las emisiones totales
- ✓ Aplicar los factores de corrección correspondientes derivados de los efectos de la precipitación o riego

Caminos sin Pavimentar.

$$E = k_{rv} \times EF \quad (5)$$

Dónde:

E: tasa de emisión promedio anual como masa, kg/año

k_{rv} : kilómetros recorridos por el vehículo, km/año

EF: factor de emisión, kg/km (rv).

$$EFi = k \left[\frac{cs}{12} \right]^a \left[\frac{pv}{3} \right]^b \quad (6)$$

Dónde:

i: Cada uno de los tramos en los que se dividen los viales pavimentados

k: Factor de corrección en función del tamaño de las partículas.

a y b: constantes empíricas que toman valores de la tabla II.4.3-1.

cs: contenido de partículas sedimentables (materiales de tamaño inferior a 75 μm) en los viales en %. Se recomienda tomar el valor derivado de campañas de muestreo. En su defecto pueden emplearse los siguientes valores. Viales = 2,4 - 16 media=10.

Tabla 2.3 Valores de K, a y b para el cálculo del F.E.i.

Parámetro en (g/vehículo-km)	PST(*)	PM10
K	1 381,31	422,85
a	0,7	0,9
b	0,45	0,45

Fuente: Tabla 13.2.2-2 del capítulo 13.2.2 “Unpaved Roads” de EPA AP-42. Enero de 2011.

Caminos Pavimentados.

$$EFi = k[cs]^{0.91} * [pv]^{1.02} \quad (7)$$

Dónde:

k: Factor de emisión de base para el intervalo de tamaño de partícula (g/km(rv)). 3,23 (PTS); 0,62 (PM₁₀).

[Tabla 13.2.1.-1 del capítulo 13.2.1 “Paved Roads” de EPA AP-42. Enero de 2011].

cs: Carga de sedimentos de superficie del camino (g/m²).
2,4 – 14 valor medio 8,2.

[Tabla 13.2.1.-3 del capítulo 13.2.1 “Paved Roads” de EPA AP-42. Enero de 2011]

pv: Peso promedio (t) de los vehículos que transitan por el camino.

Cálculo de las emisiones por tramo.

Una vez calculados los FE (kg/vehículo-km) la carga anual por tramo se corresponde con la siguiente ecuación:

$$\text{Emisión tramo } i \text{ [kg/a]} = FE_{\text{tramo } i} * km(v) \quad (8)$$

Dónde:

FE_{tramo i}: Factor de emisión para el tramo i en kg/(vehículo-km)

km (v): kilómetros recorridos por vehículos en el tramo i en un año. Se determina multiplicando la longitud del tramo en kilómetros por el número de circulaciones de vehículos por el tramo i en un año teniendo en cuenta que si se hace un recorrido de ida y vuelta contabiliza como dos circulaciones.

Otras emisiones.

Las emisiones de CO, CO₂, CH₄, NO_x, SO_x, y metales, están asociadas principalmente a gases de combustión producidos por la maquinaria de explotación, camiones y secado del material. En la siguiente tabla se adjuntan los FE. derivados del empleo de alguna maquinaria característica de este tipo de instalaciones que utilizan diesel como combustible:

Tabla 2.4 Factores de Emisión para varias clases de equipos propios del sector minero, kg/l combustible.

Tipo de maquinaria	PM₁₀	CO	NO_x	(SO_x como SO₂)
Excavadora	0,00176	0,015	0,0349	0,000024
Niveladora	0,00268	0,00659	0,0306	0,000024
Camión	0,00209	0,0146	0,0338	0,000024
Cargador tipo rueda	0,00356	0,012	0,0389	0,0000247

Fuente: Tablas 26-35: Guía “Combustión Engines Version 3.0 June 2008” (NPI Australia). Junio 2008.

2.4.4 Estimaciones teóricas de concentración de polvo.

Una vez determinado los factores de emisión y las emisiones para la cantera, se elaboran los bancos de datos con los valores de las variables de entrada para los softwares y las emisiones por actividad, procediéndose a obtener los valores de concentración en aire para diferentes distancias teniendo como referencia el punto de emisión. Las distancias a considerar estarán en función de la ubicación de centros poblacionales o de interés económico del territorio.

Para la estimación de concentración de contaminantes se puede emplear los modelos AERMOD, DISPER y SCREEN3). Estos modelos tienen la capacidad de simular la dispersión de gases o partículas desde varias fuentes simultáneamente, las cuales pueden tener niveles de emisión variable según la hora, día, mes o temporada; además poseen la capacidad de simular la dispersión en terreno complejo, utilizar información meteorológica real, entre otras características. Por estas razones, se considera adecuada la aplicación de estos modelos al entorno a las operaciones de la cantera de toba puzolánica.

El modelamiento de dispersión de partículas emplea técnicas numéricas y matemáticas para simular los procesos físicos y químicos que afectan a las partículas en el aire, al dispersarse y reaccionar con la atmósfera. Se basa en información meteorológica y topográfica la cual funciona como datos de entrada al modelo, además de información sobre las fuentes de emisión como cantidad de gases o material particulado emitido. El modelo a utilizar está diseñado para caracterizar el traslado y dispersión de las partículas liberadas directamente hacia la atmósfera.

Estos modelos de dispersión son ampliamente utilizados por agencias de protección ambiental en países como Estados Unidos, Canadá y Australia; con la finalidad de controlar la polución ambiental mediante la identificación de la contribución a problemas relacionados con la calidad de fuentes específicas y asistir en el diseño de estrategias efectivas para reducir las emisiones. Además pueden ser utilizados con fines regulatorios para verificar que como consecuencia de la instalación de nuevas fuentes, los estándares de calidad de aire no se excederán o, de ser necesario, determinar medidas de control apropiadas.

Para el uso de estos modelos se establecen las operaciones principales en la cantera y a partir de estas elaborar los escenarios para el modelamiento de dispersión:

- ✓ Voladuras en la cantera.

- ✓ Manipulación y carga de material.
- ✓ Tránsito de camiones desde la cantera hasta la fábrica.

Una vez obtenidas las concentraciones de contaminantes en función de las distancias y de la probabilidad de la dirección de los vientos se procede a determinar el coeficiente de correlación respecto al límite permisible según la norma de calidad del aire. En los casos en que esta relación será superior al 60% se tomará ese punto como posible posta de control en el programa de monitoreo.

Al concluir el estudio de dispersión se obtiene.

1. Concentración máxima [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].
2. Coordenada X, Y del punto de concentración máxima [m].

2.5 Selección de trazadores utilizando los metales pesados.

La determinación de la concentración de los metales pesados en las materias primas de la cantera, facilitan su identificación tipológica que permitirán la discriminación dentro del resto de los aerosoles presentes en el medio ambiente global.

2.6 Determinación de los parámetros de control para los residuales.

La contaminación de los residuales líquidos está asociada a la dilución de material de toba puzolánicas en las aguas de escorrentías y a la presencia de trazas de grasas y aceites de escapes de los equipos de canteras que se encuentran operando. En este caso el objetivo del monitoreo estará dirigido a determinar la calidad del residual a partir del grado de cumplimiento de los parámetros del residual con respecto a los valores límites de la norma para el vertimiento de agua a ríos y embalses ya que este es el destino final de estos residuales.

Como parámetro de control se establece:

- ✓ pH.
- ✓ Sólidos totales en suspensión.
- ✓ Concentración de grasas y aceites.
- ✓ Concentración de metales pesados.

2.7 Programa de Monitoreo.

El Programa de Monitoreo Ambiental (PMA) busca asesorar permanentemente a Cementos Cienfuegos SA, sobre las cuestiones que afectan al entorno de sus instalaciones y a la región del emplazamiento y se diseña con los siguientes objetivos:

1. Verificar el cumplimiento de la normativa internacional vigente en cuanto a niveles de emisión y emisiones fugitivas en áreas de la Fábrica Cementos Cienfuegos S.A., en este caso de la cantera de toba.
2. Verificar el cumplimiento de la legislación nacional vigente en cuanto a la contaminación producida por Cementos SA fuera de los límites de la Fábrica.
3. Verificar la posible influencia de las emisiones de la Fábrica sobre objetos del medio ambiente de interés ubicados en las cercanías de la misma, considerando aspectos biofísicos y sociales.

El programa de monitoreo se diseña para las actividades que se realiza en la cantera cuya concesión de explotación le ha sido otorgada. El alcance del mismo debe permitir la evaluación periódica, integrada y permanente de la dinámica de las variables ambientales con el fin de suministrar información precisa y actualizada para la toma de decisiones orientadas al control de las emisiones y descargas al medio ambiente, así como la verificación del cumplimiento de las medidas de mitigación propuestas.

Los resultados constituyen el documento técnico de control de calidad ambiental básico, donde quedan definidos los sistemas de medida y control de cada parámetro ambiental, así como los niveles de calidad ambiental al que se pretende llegar en la cantera de toba puzolánica. Los mismos serán procesados y analizados mensualmente, trimestralmente y anualmente. Adicionalmente deberá ser complementada esta información, con los informes de las corridas del programa de dispersión según las condiciones de operación de las canteras de caliza y marga.

2.7.1 Bases de diseño.

El diseño del Programa de Monitoreo debe tomar como base los siguientes elementos:

- ✓ Base normativa nacional vigente.
- ✓ Características de las materias primas de canteras.
- ✓ El Término Fuente de Expulsión (tipo de contaminante que se emite, cantidad de contaminante que se emite en el tiempo, forma física de los contaminantes, geometría de las expulsiones: ubicación, altura de la expulsión, forma y dimensiones del ducto).
- ✓ Residuales descargados al medio hídrico.
- ✓ Demografía (ubicación de los grupos poblacionales, densidad de población).
- ✓ Usos relevantes de la tierra en el emplazamiento: zonas de valor patrimonial.
- ✓ Zonas o instituciones de relevancia social.

- ✓ Condiciones climáticas del emplazamiento, el régimen de vientos.
- ✓ Zona de Protección Sanitaria alrededor de la Fábrica.
- ✓ Exigencias especificadas por el Órgano Regulador (Unidad de Supervisión).
- ✓ Posibilidad de ubicación de estaciones de muestreo (accesibilidad, seguridad).
- ✓ Optimización de costos.

Base Normativa a utilizar.

El diseño del programa de monitoreo fuera de las áreas de la Fábrica parte de la determinación de la Zona de Protección Sanitaria alrededor de las industrias, establecida en la Norma Cubana 39:1999. Requisitos Higiénicos Sanitarios. Para la valoración de los resultados del monitoreo se utilizará la Norma Cubana: Calidad del Aire. Reglas para la Vigilancia de la Calidad del Aire en Asentamientos Humanos. La valoración de los requisitos normativos de las descargas de residuales se debe realizar sobre la base de la Norma Cubana: Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y alcantarillado. Especificaciones.

Teniendo en cuenta que el polvo es el contaminante de mayor peso en la calidad del aire por los niveles que reporta y la amplia distribución de fuentes en el emplazamiento de Cementos Cienfuegos S.A, se prestará especial atención al control de las emisiones desde las fuentes con mayores tasas de emisión y con mayor probabilidad de impacto ubicadas.

CAPÍTULO 3: PROGRAMA DE MONITOREO AMBIENTAL.

En este capítulo se realiza el diseño del Programa de Monitoreo Ambiental a partir de los resultados de los pronósticos de contaminación derivadas de las emisiones de material particulado y residuales líquidos asociados a la operación de la cantera, de tobas puzolánicas, utilizando los resultados de concentración de contaminantes en función de las condiciones atmosférica, niveles de emisión y los términos fuentes, en los modelos de dispersión AERMOD, DISPER y SCREEN 3S.

3.1 Estudio de dispersión de contaminantes material particulado.

La concentración de material particulado en la región cercana al emplazamiento de las cantera de tobas puzolánicas es considerado como indicador de contaminación del aire, y se determina a partir de los resultados de la modelación de contaminantes atmosféricos considerando los datos meteorológicos, y emisión para cada operación en específico. Las categorías de la contaminación de la atmósfera (Calidad del Aire) serán caracterizadas por la concentración del contaminante en espacio y tiempo, dadas en mg.m^{-3} a temperatura y presión normalizadas y la tasa de deposición $\text{mg.m}^{-2}.\text{h}$

3.1.1 Determinación de las variables meteorológica de las canteras.

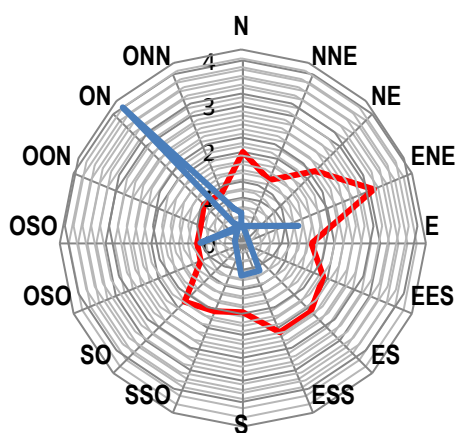
Las variables meteorológica de la cantera se determinan de los datos aportado por la estación de Cantarrana en Cienfuegos, los que se encuentran documentados en el informe del examen previo de Cementos Cienfuegos S.A., en la tabla 3.1 se muestran los valores de la velocidad y dirección de los vientos. Como se observa de la tabla, la mayor probabilidad de velocidad de los vientos está en el orden de los 1,2 m/s en la dirección ON, y el nivel de insolación más probable, reportada para la región es de $35^{\circ} < \alpha < 65^{\circ}$, por lo que la estabilidad atmosférica que será considerada en los programas de dispersión utilizando el Método de Turner será la categoría B. la capa de inversión 1 200 m fue determinada utilizando la tabla 2.2.

Tabla 3.1 Datos meteorológicos de los vientos en la cantera de tobas puzolánicas.

Dirección	FR	V
		ms^{-1}
N	0,03	2
NNE	0,0015	1,5
NE	0,001	2,24
ENE	0,0001	3,1
E	0,13	1,5
EES	0,0013	1,9
ES	0,01	2,1
ESS	0,11	2,1
S	0,113	1,5
SSO	0,037	1,6
SO	0,011	1,8
OSO	0,1	1
OSO	0,003	1
OON	0,021	1
ON	0,38	1,2

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.1 Rosa de los vientos cantera de tobas puzolánicas.



Fuente: Elaboración propia.

El valor de temperatura promedio para la cantera es de 22 a 27 °C con una humedad relativa media de 60 %. Para los valores de precipitación anual promedio en ambas canteras se toman 1 300 mm.

Los puntos de interés donde se realizarán las corridas de los programas de dispersión se determinaron a partir de las categorías de estabilidad atmosférica, distancia hasta la cantera de tobas puzolánicas, la rosa de los vientos y los niveles de insolación. En la figura 3.2 se muestra una imagen satelital con la ubicación de estos puntos.

Figura 3.2 Ubicación de los puntos de posible influencia de la contaminación procedente de la cantera de tobas puzolánicas.



Fuente: Google map.

Tabla 3.2 Datos de los puntos de posible influencia de la contaminación procedente de la cantera de tobas puzolánicas.

Hasta	Distancia [m]	Características meteorológicas		Categoría ESTABILIDAD ATMOSFERICA
		Velocidad viento	Patrón nuboso	
		m/s		
Caserío Carolina	600	1,2	moderada	B
Talleres de mantenimiento de refinería	914	1,5	ligera	B
Refinería Camilo Cienfuegos	2 400	1,5	ligera	C
Molino de Trigo	3 930	2,1	débil	D
Puerto Cienfuegos	5 500	2,1	débil	D
Caserío Paraíso	4 830	1,5	moderada	B
Petrocasas	5 890	2,1	ligera	C
Pastorita	7 670	2,1	ligera	C

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 Determinación de las emisiones de material particulado.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de los cálculos de la emisión de material particulado para las operaciones de perforación, voladura y carga y apilado del material en la cantera.

Tabla 3.3 Resultados de los cálculos de la emisión de material particulado en las operaciones de perforación, voladura y acarreo del material en la cantera.

Perforación			
Número de perforaciones		1 266	
Factor de corrección		0,68	
Emisión	390	kg/a	
	1,51E-05	g/s	
Referencia		APA-42	
Voladura			
Área removida		1 162	m ²
Factor de corrección			0,52
Material removido año		151 550	t
Cantidad de voladuras			365
Emisión	PTS	8,71	g/s
	PM ₁₀	4,52	g/s
Carga de material			
k		PTS	0,74
		PM ₁₀	0,35
Velocidad del viento (U)		1,2	m/s
Humedad de materiales (M)			0,3
Emisión	PTS	4,79	g/s
	PM ₁₀	2,27	g/s

Fuente: Elaboración propia.

Para la determinación de las emisiones difusas en las carreteras se utilizaron las expresiones para vías con y sin pavimentar. Finalmente los resultados se muestran en la tabla 3.4 y 3.5. En el anexo 2 se muestran los caminos sin pavimentar alrededor de la cantera.

Tabla 3.4 Resultados del cálculo de la emisión para el vial sin pavimentar.

Número de Fuente		1	
Categoría de Fuente		Carreteras	
Descripción de la Fuente		Caminos sin pavimentar	
Datos de la actividad /Carretera			
Capacidad del vehículo		30	t
Cantidad total de material trasladado		151 550	t
Peso promedio de vehículos (pv)		3	t
Contenido de finos de la carretera (cs)		10	%
Longitud de la carretera		1 900	m
Factor de emisión	PTS	0,03	g/s
	PM ₁₀	0,011	g/s
Ecuación de emisión		E=k*(cs/12) ^a (pv/3) ^b	
Referencia		APA-42	
Parámetros del factor de emisión		PTS	PM ₁₀
k		1,381	0,422
a		0,7	0,9
b		0,45	0,45

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.5 Resultados del cálculo de la emisión para el vial pavimentado.

Número de Fuente		1	
Categoría de Fuente		Carreteras	
Descripción de la Fuente		Caminos de acarreo	
Datos de la actividad /Carretera			
Capacidad del vehículo		30	t
Cantidad total de material trasladado		151 550	t
Peso promedio de vehículos (pv)		3	t
Contenido de finos de la carretera (cs)		3	%
Longitud de la carretera		2 230	m
Factor de emisión	PTS	0,001	g/s
	PM ₁₀	0,0004	g/s
Ecuación de emisión		E=k*(cs/12)a*(pv/3)b	
Referencia		APA-42	
Parámetros del factor de emisión		PTS	PM ₁₀
k		1,381	0,422
a		0,7	0,9
b		0,45	0,45

Fuente: Elaboración propia.

En resumen, los valores de tasa de emisión obtenidos y que serán utilizados en la modelación la contaminación, se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.6 Resumen de emisiones en las canteras. [g/s]

Actividad	Cantera de Toba	
	PM ₁₀	PTS
perforación	-	1,51E-05
voladura	4,52	8,71
Acarreo en cantera	2,27	4,79
Viales	0,011	0,03

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla anterior se puede determinar que las mayores emisiones son debidas a las voladuras seguidas de las emisiones por acarreo, para la cantera, debido a los siguientes factores:

- ✓ Las voladuras a pesar de ser de fragmentación de la roca, le imprime una gran energía al material particulado.
- ✓ La mayor distancia desde la cantera de toba hasta la fábrica es vial pavimentado por lo que solo se determinará la influencia de los viales para el poblado de carolina y el taller de mantenimiento donde se sitúa el vial sin pavimentar con una emisión significativa. En el anexo 3 se muestra el trazado del vial pavimentado.

3.1.3 Resultados de los programas de dispersión.

La determinación de las concentraciones de contaminantes atmosféricos en los alrededores de la región de ubicación de la cantera se realizaron utilizando los software AERMOD y SCREEN 3S. La simulación parte de considerar la zona de la cantera como una fuente de geometría plana de emisión, con altura de emisión a nivel del terreno, para el caso de los viales se considera de geometría lineal.

Las distancias tomadas para calcular las concentraciones a nivel de 1,6 m (altura promedio de la personas) fueron determinadas linealmente, considerando la ubicación de los principales centros de interés poblacional, económico o agrícola. Para ello fueron seleccionados los lugares y distancias que aparecen en la siguiente tabla 3.2.

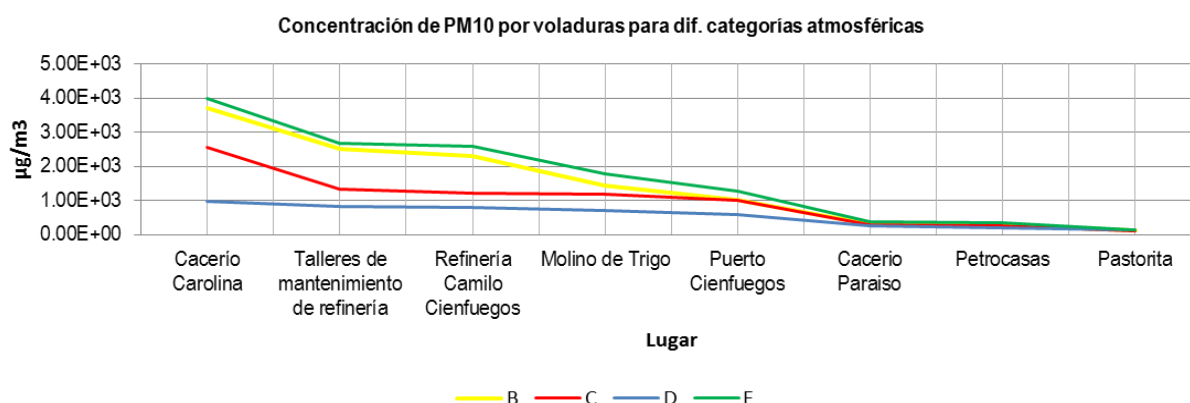
En la tabla y gráfico siguiente se muestran los resultados para la variante voladura, para diferentes categorías atmosféricas y velocidades del viento.

Tabla 3.7 Concentración del contaminante asociada a la voladura en la cantera de para diferentes categorías atmosféricas.

Velocidad	[m/s]	1,2 -1,5		1,5 -2,1		2,1		1	
Categoría Atmosférica		B		C		D		F	
Tipo partícula		PM ₁₀	PTS	PM ₁₀	PTS	PM ₁₀	PTS	PM ₁₀	PTS
emisión	[g/s]	4,72	8,71	4,72	8,71	4,72	8,71	4,72	8,71
Lugar	Distancia	Concentración		Concentración		Concentración		Concentración	
	[m]	[µg/m³]							
Caserío Carolina	600	1,61E+03	1,10E+04	1,56E+03	1,02E+04	9,79E+03	8,58E+03	1,98E+03	1,49E+04
Talleres de mantenimiento de refinería	914	2,41E+03	1,45E+03	2,34E+03	1,35E+03	1,29E+03	1,13E+03	2,97E+03	1,96E+03
Refinería Camilo Cienfuegos	2 400	3 312	1 115	3,21E+03	1,04E+03	9,92E+02	8,70E+02	4,07E+03	1,51E+03
Molino de Trigo	3 930	1 438	1 023	1,39E+03	9,51E+02	9,10E+02	7,98E+02	1,77E+03	1,38E+03
Puerto Cienfuegos	5 500	1 027	872	9,96E+02	8,11E+02	7,76E+02	6,80E+02	1,26E+03	1,18E+03
Caserío Paraíso	4 830	302,5	302	2,93E+02	2,81E+02	2,69E+02	2,36E+02	3,72E+02	4,08E+02
Petrocasas	5 890	278,9	239	2,71E+02	2,22E+02	2,13E+02	1,86E+02	3,43E+02	3,23E+02
Pastorita	7 670	123,1	167	1,19E+02	1,55E+02	1,49E+02	1,30E+02	1,51E+02	2,25E+02

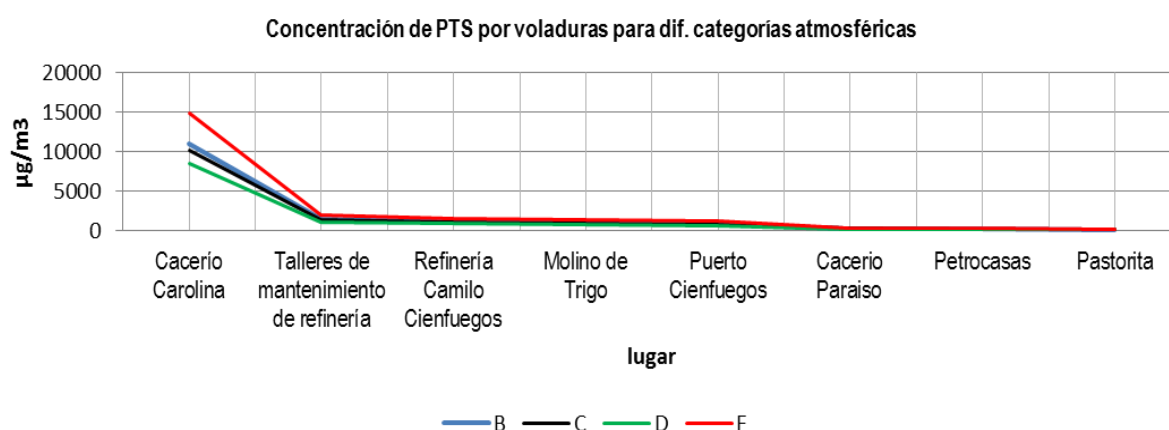
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.3 Concentración de PM₁₀ en los puntos de interés para diferentes categorías atmosféricas.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.4 Concentración de PTS en los puntos de interés para diferentes categorías atmosféricas.



Fuente: Elaboración propia.

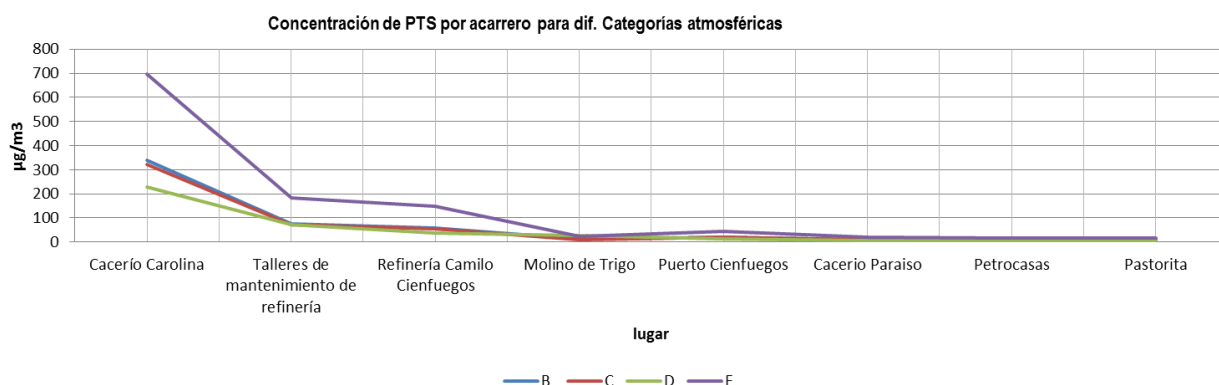
Según muestran los gráficos, el Caserío de Carolina se expone a la mayor concentración en ambos tipos de material particulado con un valor de $3,71E+03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PTS y $1,10E+04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM₁₀ para la categoría más probable en esa zona, lo que reafirma que este poblado se encuentra dentro de la zona de protección sanitaria.

Los resultados de las simulaciones para diferentes categorías atmosféricas y velocidades de vientos, muestran un comportamiento similar: el Caserío de Carolina se encuentra bajo la influencia de las mayores concentraciones para ambos tipos de partículas y cualquier categoría atmosférica, alcanzándose los mayores valores para la categoría F ya que prácticamente no existe dispersión, y todo el poblado se somete a la nube inicial.

A medida que aumenta la distancia a la cantera, las concentraciones tanto para los PTS como PM₁₀ disminuyen significativamente al recorrer una distancia de menos de 2 km,

esto se debe a que como la emisión ocurre a nivel del terreno el relieve del lugar y la vegetación circundante producen un apantallamiento en la nube, favoreciendo la deposición su deposición o fall out de las partículas. Los PM_{10} tienen un mayor alcance que el resto de las partículas ya que poseen mayor flotabilidad. En la figura 3.5 y 3.6 se muestran el comportamiento de la concentración del contaminante PM_{10} y PTS asociada al acarreo de material de cantera.

Figura 3.5 Concentración de PTS en los puntos de interés para diferentes categorías atmosféricas para el acarreo de material.



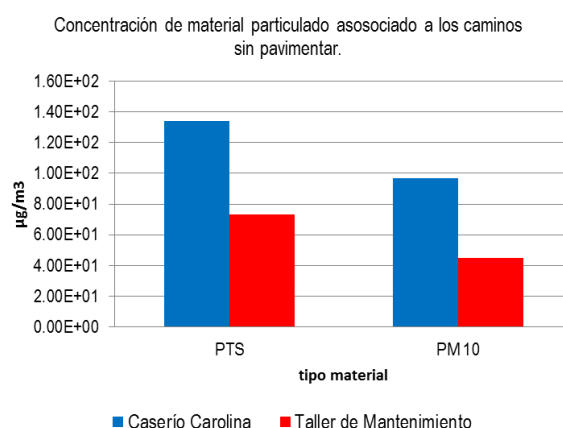
Fuente: Elaboración propia.

El grafico anterior demuestra que el poblado de carolina recibe la mayor concentración de PTS para diferentes categorías atmosféricas evaluadas con una sensible disminución a partir de 1 km de distancia, siendo prácticamente nula a distancias superiores a 5 km. En el anexo 4 se muestra la posición y rosa de los vientos para la zona cercana a la cantera que demuestra la ubicación del Caserío de Carolina.

El acarreo en cantera es la segunda fuente potencial de contaminación de material particulado, por el volumen de material que se genera y la frecuencia con que se produce, en este caso la elevación del material durante la carga en los camiones le imprime una significativa energía potencial.

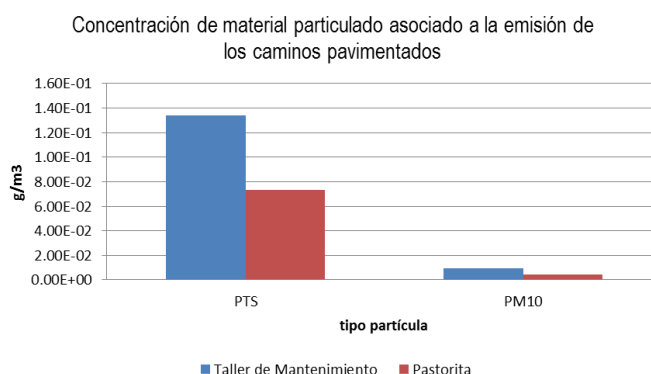
Para determinar la concentración de material particulado asociado a las emisiones de los viales sin pavimentar se tuvieron en cuenta una emisión promedio de los tramos, la concentración final en el punto analizado se determina sumando las emisiones aportada por cada tramo. Los resultados se muestran en los siguientes gráficos.

Figura 3.6 Concentración de material particulado asociados a camino sin pavimentar.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.7 Concentración de material particulado asociados a camino pavimentado.



Fuente: Elaboración propia.

De los gráficos anteriores se demuestra que la incidencia del material particulado tiene poco alcance debido a que las emisiones ocurren con poca energía de las partículas, En ambos casos el Caserío de Carolina recibe las mayores concentraciones debido a que predominan los viales sin pavimentar. Para el resto de los lugares no es significativa ya que la totalidad de los viales son pavimentados.

3.2 Determinación de la emisión por combustión.

Las emisiones por combustión y metales pesados producidos por la maquinaria de explotación y camiones, se determinan utilizando los factores de emisión de la tabla 2.4 y el consumo de combustible promedio anual por equipos, los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.9 Concentración del contaminante asociada al transporte de acarreo de cantera caliza para la Categoría F de emisión.

Lugar	PM ₁₀	CO	NO _x	SO _x
	[µg/m ³]			
Poblado de carolina	4,08E-07	4,85E-07	1,16E-07	7,60E-07
Taller de mantenimiento	2,65E-06	1,16E-06	3,24E-08	1,95E-07
Petrocasas	1,75E-06	5,36E-07	8,26E-09	1,79E-07
Pastorita	4,03E-09	2,38E-09	5,33E-10	3,82E-09

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Determinación de la exposición a metales pesados.

La exposición a los metales pesados en los puntos seleccionados fue determinada utilizando la expresión (5), las concentraciones promedio de estos en el material de la tobas puzolánicas fueron los obtenidos mediante el análisis de muestras enviadas al Laboratorio del Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (tabla 3.10); El valor de concentración de polvo es el resultado de la suma de las contribuciones de PTS y PM 10 para voladura y acarreo, ya que los viales y las perforaciones tienen un aporte poco significativo debido a su bajo alcance tabla 3.11.

Tabla 3.10 Valores de concentración de metales pesados en las muestras de Toba Puzolánica de la cantera [mg/kg].

Cu	Zn	Pb	Cd	Ni	Co	Mn	Hg	V	Ca	Si	Al	Fe	S	Mg	Na	K
0,86	15,1	<13,9	<2,07	1,49	<1,64	20,33	0,005	0	39,24	265,56	46,33	16,85	0,09	14,48	4,81	6,38

Fuente: Mediciones de muestras de cantera por el método de espectrometría de absorción atómica en el Laboratorio del Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos.

Tabla 3.11 Concentración total de partículas en los lugares seleccionados para la categoría atmosférica más probable.

Lugar	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Caserío Carolina	2,41E+04
Talleres de mantenimiento de refinería	3,97E+03
Refinería Camilo Cienfuegos	4,50E+03
Molino de Trigo	2,51E+03
Puerto Cienfuegos	1,92E+03
Caserío Paraíso	6,22E+02
Petrocasas	5,21E+02
Pastorita	2,92E+02

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.12 Concentración total de partículas en los lugares seleccionados para la categoría atmosférica más probable.

Metal pesado	Caserío Carolina	Talleres Mtto	Refinería Camilo Cienfuegos	Molino de Trigo	Puerto Cienfuegos	Caserío Paraíso	Petrocasas	Pastorita
Cu	2,08E-02	8,26E-05	3,72E-07	9,33E-10	1,79E-12	1,12E-15	5,81E-19	1,70E-22
Zn	3,65E-01	1,45E-03	6,53E-06	1,64E-08	3,15E-11	1,96E-14	1,02E-17	2,98E-21
Pb	<0,334	<0,001	<5,97E-06	<1,49E-08	<2,88E-11	<1,79E-14	<9,33E-18	<2,72E-21
Cd	<0,049	<0,0001	<0,89E-8	<2,23E-09	<4,29E-12	<2,66E-15	<1,39E-18	<4,06E-22
Ni	3,59E-02	1,42E-04	6,41E-07	1,61E-09	3,09E-12	1,92E-15	1,00E-18	2,93E-22
Co	<0,039	<0,0001	<7,05E-07	<1,76E-09	<3,40E-12	<2,11E-15	<1,10E-18	<3,21E-22
Mn	4,89E-01	1,94E-03	8,74E-06	2,19E-08	4,22E-11	2,62E-14	1,37E-17	3,99E-21
Hg	1,31E-04	5,19E-07	2,33E-09	5,85E-12	1,13E-14	7,00E-18	3,65E-21	1,07E-24
V	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Ca	9,44E-01	3,75E-03	1,69E-05	4,23E-08	8,14E-11	5,06E-14	2,64E-17	7,70E-21
Si	6,39E+00	2,54E-02	1,14E-04	2,86E-07	5,51E-10	3,42E-13	1,78E-16	5,21E-20
Al	1,11E+00	4,43E-03	1,99E-05	5,00E-08	9,61E-11	5,97E-14	3,11E-17	9,09E-21
Fe	4,05E-01	1,61E-03	7,25E-06	1,82E-08	3,50E-11	2,17E-14	1,13E-17	3,31E-21
S	2,17E-03	8,60E-06	3,87E-08	9,71E-11	1,87E-13	1,16E-16	6,05E-20	1,77E-23
Mg	3,48E-01	1,38E-03	6,23E-06	1,56E-08	3,00E-11	1,87E-14	9,73E-18	2,84E-21
Na	1,16E-01	4,60E-04	2,07E-06	5,19E-09	9,98E-12	6,20E-15	3,23E-18	9,44E-22
K	1,54E-01	6,10E-04	2,74E-06	6,88E-09	1,32E-11	8,23E-15	4,29E-18	1,25E-21

Fuente: Elaboración propia.

A partir de estos valores de concentración del material se determinaron las concentraciones esperadas de metales pesados, los resultados se muestran en la tabla 3.12, aquí se puede observar que la concentración de metales pesados en general está por debajo de sus valores normativos. Para los metales Hg, Cd, Co, V las

concentraciones medidas en las materias primas están por debajo del límite de detección por lo que es de esperar que sus concentraciones en los lugares seleccionados tengan el mismo comportamiento. En relación al Cu, Zn y Ni, sus concentraciones son inferiores al 44 % del valor límite para la zona de protección sanitaria que abarca el caserío de carolina.

3.4 Diseño del programa de monitoreo.

El programa de monitoreo constituye una herramienta que en base a los resultados de las mediciones de concentración de material particulado y tasa de deposición facilita la evaluación del índice de calidad para ambas variables con el objetivo de verificar el cumplimiento de los requisitos de la norma de calidad del aire. Para ello se selecciona los puntos a monitorear que incluirán aquellos que tengan la mayor representatividad de un área o región, para así evaluar toda la carga contaminante asociada a operaciones tecnológicas en dicha región. Finalmente debe permitir además discriminar la contaminación asociada a las operaciones tecnológicas identificadas del resto de la contaminación global.

En correspondencia con lo establecido en el punto 8.2.1 de la NC 111:2004, el grado de contaminación del aire en los puntos de la red de monitoreo propuesta será evaluada mediante el ICA, el cual incluye una escala de seis categorías: 1) Buena, 2) Aceptable, 3) Deficiente, 4) Mala, 5) Pésima, 6) Crítica. El ICA se determina utilizando como criterio el valor resultante del cociente de las concentraciones estimadas del contaminante entre la Concentración Máxima Admisible (CMA) empleando la siguiente ecuación:

$$ICA = \sum_{i=1}^k \frac{C_{canti}}{CMA_i} * 100 \quad (9)$$

Dónde:

ICA	Índice de calidad del aire	%
$C_{cant\ i}$	Concentración estimada del contaminante i.	[mg/kg]
CMA_i	Concentración Máxima Admisible del contaminante i	[mg/kg]

Para las deposiciones de material particulado en las superficies también se establece un indicador de calidad. Aunque las normas no establecen valores límites para este tipo de variable, en este trabajo consideramos como valores limites los determinados antes del inicio de las operaciones de la cantera.

$$ICD = \sum_{i=1}^k \frac{D_{canti}}{DN_i} * 100 \quad (10)$$

Dónde:

ICD Índice de calidad de las deposiciones %
 D_{canti} Deposiciones del contaminante i [mg/m²d]
 asociados a la cantera

La concentración DN_i Deposiciones normales del contaminante i [mg/m²d]
 de los metales pesados en el material particulado del aire en el punto de muestreo
 constituye otro indicador que debe ser considerado en el programa a partir de los valores
 máximos admisibles establecidos en las normas obligatorias de nuestro país y que se
 muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.13 Valores normativos

No.	Contaminantes	Concentración máxima admisible		Clase de peligrosidad
		[mg/m ³]	[mg/kg] ¹	
Metales pesados				
1	Cobalto	0.001	-	1
2	Níquel	0.0002	300-400	1
3	Vanadio	0.002	-	1
4	Cromo	0.0015	1000-1500	1
5	Plomo	0.0003	750-1200	1
6	Zinc	0.05	2500-4000	3
7	Cobre	0.002	1000-1750	2
8	Cadmio		20-40	
Aerosoles				
9	Polvos con contenido de SiO ₂ (hasta 50%)	0.1	-	3

¹ Valores tomados de la norma Española 1990

Fuente: NC 39:1999 Norma de calidad del aire. Requisitos Higiénicos Sanitarios.

En el caso de la concentración másica de metales pesados se tomó como referencia la Norma Española de 1990, ya que el país solo norma la concentración volumétrica, por lo que se dificulta el análisis para el caso de los materiales de proceso ya que las mediciones realizadas por el laboratorio son de concentraciones másicas. Para discriminar la influencia de las emisiones asociadas a las operaciones de la cantera del resto de la contaminación global, los valores medidos de concentración y tasa de deposición medidas en los puntos de la red de monitoreo serán ponderados por el valor de la relación de concentración de los metales pesados utilizados como trazadores en los materiales de proceso y las muestras de la red de monitoreo (ω), utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\vartheta^{MP} = \frac{\sum_{i=1}^k C^{MP} i}{m} \quad (11)$$

Donde:

ϑ^{MP} Valor medio del contenido de los trazadores en la muestra del punto de muestreo j.
 $(cmp)_i^{mp}$ Concentración del trazador i en el material de la muestra del punto de muestreo [mg]
m: Masa de la muestra [kg]

Previamente se debe tener el valor de concentración de los metales pesados utilizados como trazadores en la toba puzolánica ϑ^{tb} , utilizando la ecuación anterior.

$$\omega = \frac{\vartheta^{MP} tb}{\vartheta^{MP} amb} \quad (12)$$

Dónde:

ω : Factor de relación

ϑ^{tb} : Valor medio del contenido de los metales pesados identificados como trazadores en la muestra de Toba Puzolánica. [mg]

ϑ^{MP} : Valor medio del contenido de los metales pesados identificados como trazadores en la muestra ambiental. [mg]

Las estimaciones de la concentración de polvo en los puntos de monitoreo se determina a partir de los valores de concentración de los metales pesados medidos en las muestras colectadas en el punto de muestreo y el valor de ω utilizando las siguientes expresiones.

Si:

$$\omega < 1 \quad C_{cant} = C_{med} \cdot \omega \quad (13)$$

$$\omega < 1 \quad C_{cant} = C_{med} \cdot (1 - \omega^{-1}) \quad (14)$$

$$\omega = 1 \quad C_{cant} = C_{med} / 2 \quad (15)$$

Dónde:

C_{cant} : Concentración de polvo asociado a la operación de la cantera [mg/kg]

C_{med} : Concentración de polvo medido en el punto de monitoreo [mg/kg]

Este mismo método será utilizado para la evaluación de la tasa de deposición en el punto de monitoreo tomando como tasa de deposición normal del polvo de 0,1 [g/m²d].

La evaluación del cumplimiento de los límites normados para los contaminantes asociados a la cantera, se realiza sobre la base del valor del ICA (Índice de Calidad del Aire) e ICD (Índice de Calidad de las Deposiciones) según se establece en la NC 111:2004.

Tabla 3.14: Relación entre el Índice de Calidad y posibles implicaciones sanitarias relacionadas con cada Categoría de Calidad.

Índice	Categoría	Comentarios
0 - 79	Buena	No sobrepasa el 79 % del valor de la CMA prescrito en la NC. 39. Óptima calidad sanitaria del aire. Supuesta protección de toda la población (aunque no puede asegurarse que no sobrepase el umbral de respuesta de efectos adversos en individuos aislados).
80 - 99	Aceptable	No supera el 99 % de la CMA. Comienza el deterioro de la calidad del aire. Posible aparición de efectos leves en individuos o grupos de alta susceptibilidad (variabilidad individual de umbral de respuesta a los efectos) de muy difícil detección aún por investigaciones
100 - 199	Deficiente	Sobrepasa entre 100 - 199 % el valor de la CMA prescrito en la NC 39. Ligero incremento en la frecuencia y severidad de los efectos adversos agudos y crónicos en la población general y principalmente en personas con enfermedades cardiovasculares, respiratorias y alérgicas y en otras de elevada susceptibilidad, solo detectables mediante investigaciones muy específicas y sensibles
200 - 299	Mala	Supera entre 2 y 3 veces (200 – 300 %) el valor de la CMA. Aumento de la frecuencia y gravedad de los efectos adversos en grupos de alta susceptibilidad y en la población general, ya medibles mediante investigaciones específicas a escala individual y ecológica, basadas en registros morbilidad. Da lugar a una SITUACIÓN DE ATENCIÓN
300 - 499	Pésima	Supera entre 3 y 5 veces el valor de la CMA. En dependencia del incremento de la concentración del contaminante y el tiempo de exposición continua el aumento de la frecuencia y gravedad de efectos adversos en los grupos de alta susceptibilidad y en la población general. Da lugar a una SITUACIÓN DE ALERTA.
≥ 500	Crítica	Se supera el límite de 5 veces la CMA, dando lugar a un incremento aún mayor del riesgo o probabilidad de ocurrencia de los efectos adversos sobre la salud de la población general y en grupos de riesgo, que se traduce en un evidente incremento agudo de la morbilidad y mortalidad que sobrecarga los servicios asistenciales; da lugar a una SITUACIÓN DE EMERGENCIA AMBIENTAL.

Fuente: NC: 111/2004: calidad del aire-Reglas para la vigilancia de la Calidad del aire en asentamientos humanos.

Para la evaluación de la calidad de los residuales será utilizado el Índice de Calidad del Residual (ICR), que considera el cumplimiento de todos los parámetros básicos de la NC 27:2012 Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado. Requisitos (ICR<0).

El límite máximo permisible promedio para las concentraciones en las descargas de aguas residuales aplicables a las instalaciones de Cementos Cienfuegos S.A.,

corresponden a la clasificación de cuerpo receptor clase B (según epígrafe 5.1 de la NC 27:2012) -Ríos, embalses y zonas hidrogeológicas donde se captan aguas para el riego agrícola en especial donde existan cultivos que se consuman crudos, se desarrolla la acuicultura y se realizan actividades recreativas en contacto con el agua-.

$$ICR = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{VMA_i} \quad (16)$$

Dónde:

R_i Valor del parámetro medido i. [según la unidad]

VMA Valor Máximo Admisible del parámetro i. [según la unidad]

3.5 Monitoreo de partículas.

Los puntos de muestreo de la red se establecen para determinar la posible influencia de las emisiones directas de los procesos de cantera a partir de la evaluación de las concentraciones en el aire y las tasas de deposiciones de material particulado. Para el monitoreo de material particulado se estimaron las zonas de mayor impacto esperado por los valores de concentración de PM_{10} y PTS, para las peores condiciones de emisión y dispersión. En este caso el Caserío de Carolina es el punto de mayor significación, por las siguientes razones;

1. Se encuentra dentro de la zona de protección sanitaria (<1 000m), demostrado en los resultados de las simulaciones, tanto para PTS, PM_{10} y metales pesados.
2. Se encuentra dentro del cono de mayor probabilidad de la rosa de los vientos.
3. Los factores de apantallamiento son poco significativos ya que se encuentra en la misma cota del nivel de explotación de la cantera de tobas puzolánicas.

Por este motivo el Caserío de Carolina se propone como punto de monitoreo principal y el Taller de Mantenimiento como secundario, independientemente de que las concentraciones estimadas por los modelos de dispersión utilizados y bajo las peores condiciones de dispersión Categoría F y velocidad del viento 1 m/s) son inferiores al límite a la concentración máxima (6 mg/m^3) según la norma calidad del aire y el ICA es inferior al 20 %. En dicho punto deberá determinarse entonces la concentración y la tasa

de deposición al menos una vez al mes, y tiene que ser ubicado lo más cercano posible a la cantera.

Alternativamente podrá ubicarse otro punto en las Petrocasas o en Universidad de Cienfuegos aunque los valores determinados en los modelos de dispersión son muy pequeños, pasado un tiempo en los que se pudiera contrastar estos resultados, podrían ser eliminados del programa.

No se proponen otros puntos ya que la influencia de las emisiones no es significativa debido a que existe apantallamiento de la pluma de emisión por las características del terreno y la poca altura a que se produce. Para el resto de los puntos del territorio la influencia de las emisiones de otros focos contaminantes son más significativas, por lo que la ubicación de los puntos de monitoreo están asociados a esas fuentes.

3.6 Monitoreo de residuales.

El programa debe poder evaluar además la carga contaminante asociada a los residuales líquidos en cuya composición se encuentre disuelto algún contaminante cuya concentración en el residual se encuentre regulada en la norma de vertimiento de aguas residuales a fuentes superficiales. El monitoreo de residuales se debe realizar directamente a los sistemas de drenajes de las plataformas de cantera, con el objetivo de determinar la carga contaminante aportada a las aguas superficiales y de ahí al Río el Salado. Para ello se determinarán mediante mediciones al menos 1 vez al año los parámetros de calidad del residual que se establecen en la norma de vertimiento de aguas residuales (NC 27) y que se relaciona a continuación. Anexo 1 y 6.

Tabla 3.15 Indicadores de calidad del residual.

pH	CE	S. sed	STS	Grasa y aceites
	$\mu\Omega/cm$	mg/l	mg/l	mg/l

Fuente: NC 27.

Finalmente, la evaluación se realizará mediante el indicador de ICR tal como se establece en la ecuación (17). La determinación de la carga aportada en metales pesados por los sedimentos del agua de escorrentía de la cantera se determina partir de la suma de los Sólidos Totales en Suspensión (STS) y los Sólidos Sedimentables (Sólidos Sedimentables).

$$CSA = STS + SS \quad (17)$$

Dónde:

CSA: Carga de sólidos aportada [mg/l]

STS: Sólidos Totales Sedimentables. [mg/l]

SS: sólidos sedimentables [mg/l]

$$CA^{metales} = \sum_{i=1}^n C_i^{metal} / v^{muestra} \quad (18)$$

Dónde:

$CA^{metales}$: Carga total por metales en la muestra [mg/l]

C_i^{metal} : Peso del metal i en la muestra [mg]

$v^{muestra}$: Volumen de la muestra estudiada [l]

Para determinar la carga total aportada al medio acuático, se determina a partir del volumen de lluvia [mm] y el área de la cantera el volumen de agua aportada utilizando la siguiente expresión:

$$V^{aportado} = A_{plataforma} * I^{lluvia} * 10^6 \quad (19)$$

Dónde:

$V^{aportada}$: Volumen de agua de escorrentías de la cantera [l]

$A_{plataforma}$: Área de la plataforma de trabajo de la cantera [m²]

I^{lluvia} : cantidad de lluvia caída [mm]

La carga total aportada al medio acuático se calcula finalmente por la siguiente ecuación,

$$CTA^{metales} = CA^{metales} * V^{aportado} \quad (20)$$

Dónde:

$CTA^{metales}$: Carga total por metales [mg]

3.7 Programa de muestreo.

Para la ejecución de programa es necesaria la creación de facilidades temporales para la ubicación de los puntos de colección de deposiciones atmosféricas con la debida protección contra daños físicos y la construcción de un colector para muestras de aguas residuales a la salida de los canales de drenajes de la plataforma de la cantera hacia el Rio el Salado. Todo lo referido al programa se recoge en las siguientes tablas.

Tabla 3.16 Programa de monitoreo de Cantera de tobas puzolánicas.

Lugar de Muestreo	Tipo de muestra	Punto de muestreo o Ubicación	Ensayos a realizar	Frecuencia de muestreo
Cantera Tobas Carolina	Sedimentos	Canales de drenajes de la cantera	Concentración de metales pesados Zn, Ni, Cu, Pb, Co, Cr, V, Cd, Hg, Mn, Fe	Trimestral
	Residuales		pH, Conductividad eléctrica, Grasas y Aceites, Sólidos sedimentables totales,	Anual
Caserío Carolina	Deposiciones atmosféricas	Escuela	Tasa de Deposición Total	Mensual
			Concentración de metales pesados	Anual
	Polvo atmosférico	Escuela	Concentración de material particulado	Anual
Taller Mantenimiento	Deposiciones atmosféricas	Costado por camino de carolina	Tasa de Deposición Total	Trimestral

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.17 Descripción del ensayo

Tipo de Muestra	Nº de Muestras anuales	Ensayos
Agua Residual	1	pH Conductividad eléctrica Grasas y Aceites Sólidos sedimentables totales
Tipo de Muestra	Nº de Muestras	Ensayos
Sedimentos	4	Concentración de metales pesados Ni, Pb, Co, Cr, V, Cd, Mn, Fe
Tipo de Muestra	Nº de Muestras	Ensayos
Deposiciones atmosféricas	16	Tasa de Deposición Total Concentración de metales pesados (4 muestras que es la unión de las muestras mensuales de cada uno de los 4 puntos) Zn, Ni, Cu, Pb, Co, Cr, V, Cd, Hg, Mn, Fe
Tipo de Muestra	Nº de Muestras	Ensayos
Deposiciones atmosféricas	2	Zn, Ni, Cu, Pb, Co, Cr, V, Cd, Hg, Mn, Fe

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

1. La dispersión de los contaminantes en la atmósfera depende de las condiciones meteorológicas de la capa límite atmosférico; el modelamiento de la dispersión de estos contaminantes es una técnica que utiliza modelos matemáticos complejos que tienen por finalidad orientar, en base a los resultados obtenidos, la identificación de fuentes significativas y la predicción de concentraciones de contaminantes en receptores seleccionados.
2. La caracterización de los términos fuentes facilitaron las estimaciones de dispersión de contaminantes y la determinación de la concentración del material particulado PM_{10} y PTS en las zonas cercanas a la cantera fueron la base para establecer los puntos de muestreo.
3. La geometría plana de la fuente de emisión es la más adecuada para el estudio de dispersión ya que la cantera constituye plataforma plana donde se realizan la totalidad de las operaciones.
4. El empleo de metales pesados como trazadores permite discriminar la contaminación asociadas a las operaciones de cantera del resto de la contaminación global por la marcada diferencia entre la concentración de los mismos en el material de la Toba Puzolánica y el resto de las formaciones de la región.
5. Se realizó el análisis de dispersión en el Caserío de Carolina donde se obtiene que se encuentra en los límites de la zona de protección sanitaria con potencial de sobre paso de los límites admisibles de concentración de polvo en caso de desviaciones del régimen normal de explotación de la cantera.
6. El diseño y posterior ejecución del Programa de Monitoreo Ambiental propuesto permite verificar el cumplimiento de los requisitos regulatorios de calidad del aire y los residuales emitidos en la cantera de Tobas Puzolánica propiedad de Cementos Cienfuegos S.A., sí como la efectividad de las acciones tomadas para disminuir los impactos ambientales asociados a las operaciones que allí se realizan.
7. Los bajos niveles de concentración del material particulado emitido durante las operaciones de la cantera estimados a partir de las simulaciones empleando los modelos de dispersión Gaussianos introducen valores pequeños en los Índices de Calidad del Aire y del Residual lo demuestran que las cargas contaminantes son inferiores a los niveles establecidos en la legislación ambiental nacional.

Recomendaciones

1. Aplicar el Programa de Monitoreo Ambiental aquí descrito a instalaciones similares del país, para estimar los impactos ambientales de sus operaciones, que le permitan tomar acciones para evitar las emisiones y descargas no controladas.
2. Una vez transcurrido un periodo de seis meses a partir de la implementación deberá realizarse una evaluación de los valores obtenidos en las muestras de los puntos de monitoreo y los estimados por los resultados de las corridas de los programas de dispersión, con el objetivo de establecer las posibles correcciones de dichos puntos.

Referencias Bibliográficas.

- Cuba. Agencia de Medio Ambiente. Estrategia Ambiental Nacional. (2007). Anexo Único Resolución No 40 /2007. CITMA.
- Bustillos Ortiz, A. A. y Velasteguí Sánchez, J. R. (2015). Simulación de la dispersión de contaminantes en el aire de la ciudad de Ambato emitidos por fuentes fijas y por la actividad del volcán Tungurahua, mediante la utilización de los software ambientales especializados. DISPER VERSIÓN 5.2 Y SCREEN VIEW”
- Álvarez, R., Luciano, M., & Aenlle, L. (2002). Estudio de la estabilidad atmosférica en algunas regiones de la provincia de Cienfuegos, IX, 13.
- Arzate, E. (2006). *Realización de software educativo para simular la dispersión de contaminantes atmosféricos*. Universidad de las Américas.
- Baroutian, S.; Mohebbi, A.; Soltani Goharrizi, A.(2006). Measuring and modeling particulate dispersion: A case study of a Kerman Cement Plant. Journal of Hazardous Materials A136, 468–474.
- Barraza, M. (2006). Modelos de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos. Comparación de desempeño en zona de ventanas.
- Bindhulal y Gopal Pathak, A. (2007). Neural Model for SPM Concentration Prediction in Coal Mines. Department of Civil Engineering, Birla Institute of Technology, Mesra, Ranchi - 835 215
- Bustos, C. (2004). *Aplicación de modelos de dispersión atmosférica en la evaluación de impacto ambiental: Análisis del proceso*.
- Cañete, C.; Krebs, S.; Marmos, L.; Ponce, N.; Milián, E. & Barrios, E. (2008). Estudio de la degradación ambiental provocada por la minería en la región de Santa Lucía en el Occidente de Cuba. Informe del Proyecto de Colaboración Cuba-Cañete, C.; Krebs, S.; Marmos, L.; Ponce, N.; Milián, E. & Barrios, E. (2011). Estudio de. 2011: Riesgos ambientales provocados por el Pasivo Ambiental Minero Santa Lucía, Pinar del Río. En: IV Congreso Cubano de Minería Geociencias 2011, Cierres de Minas y Pasivos Ambientales Mineros.
- Carrario, A. (2016). *Utilización de Modelos de Dispersión Atmosférica para la estimación de dosis de exposición*.
- Carrario, Aparicio. (2016) Utilización de Modelos de Dispersión Atmosférica para la estimación de dosis de exposición Mecánica Computacional. XXIII,1743-1759.
- Chaulya S.K. (2005). Air Quality Status of an Open Pit Mining Area in India.

- Environmental Monitoring and Assessment, 105, 369-389
- Chaulya, S.K. (2002). Development of empirical formulae to determine emission rate from various Opencast Coal Mining Operations. *Water, Air, and Soil Pollution*, 140, 21-55
- Martínez Ataz E. y Díaz de Mera Morales, Y. (2004) Contaminación atmosférica. Universidad de Castilla-La Mancha. 45 de Colección Ciencia y técnica.
- Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, January (1994).
- Muleski, G.E., Update of AP-42 Emission Factors for Western Surface Coal Mines and Related Sections, Summary Report, Prepared for Emission Factors and Inventory Group (MD-14), Emissions, Modeling and Analysis Division, Office of Air Quality, Planning, and Standards, U.S.
- EPA, Emission Factor Documentation for AP-42, (1998). Section 13.2.2, Unpaved Roads, Final Report for U. S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, MRI Project N° 4864.
- FIS, Y. (2017). Evaluación minero-ambiental del yacimiento polimetálico Castellano en la provincia de Pinar del Río. *Ciencia & Futuro* 7(2): 23-44.
- Gallardo, D.; Cabrera, I.; Bruguera, N.; Madrazo, F.; Milián, E. & Vásquez, R. (2011). Impactos ambientales provocados por la actividad minera en Santa Lucía, Pinar del Río. En: IV Congreso Cubano de Minería.
- Ghenai, C.; Lin, C. X. (2006). Dispersion Modeling of PM₁₀ Released during Decontamination Activities. *J. Hazardous Materials*, 132(1): 58-67.
- Ghose, M.K., (2007). Factual analysis of the dispersion of air pollutants. *International Journal of Environmental Studies*, 63(2): 179-187.
- Gifford F.A. (1960). "Atmospheric Dispersion Calculations Using the Generalized Gaussian Plume Model", *Nuclear Safety*. 2: 56-59.
- Guías de Calidad de aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. (2015).
- Turtós Carbonell, L. (2010). Guía de modelación de la dispersión local de contaminantes gaseosos y partículas con el Sistema de modelos AERMOD. Proyecto PRN/5-2/2al Programa Ramal Nuclear "Sistema de Modelos AERMOD para dispersión local de contaminantes atmosféricos" pp. 17
- Harris Lippmann. (n.d.). *Size selective samplers for estimating "respirable" dust concentrations*.
- Huertas, J.I., S. Izquierdo y E. González, (2009). Modelación de la Dispersión de PM₁₀

- y PST en la región minera del Departamento del Cesar, Colombia usando ISC y AERMOD. Memorias VIII Congreso Nacional y III Internacional de Ciencia y Tecnología del Carbón, Colombia.
- Hussein, T., Abu Al-Ruz, R., Petäjä, T., Junninen, H., Arafah, D., Hämeri, K. and Kulmala, M. (2015). Local Air Pollution versus Short-range Transported Dust Episodes: A Comparative Study for Submicron Particle Number Concentration. *Aerosol Air Qual. Res.* 11: 109–119
- M., I. y M., D. (2014). Toward a Sustainable Cement Industry: Climate Change, Sub Study 8, <http://www.wbside.org/Docroot/OSQWU2t>
- Leiro López, A. (2011). Características específicas de los cementos puzolánicos y especiales - Dialnet. Available at: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=117474>.
- Gaceta Oficial de la República de Cuba. (1997, July). Ley No 81 del medio ambiente.
- León, R. M. (2010). *Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de la producción de cemento: Caso de estudio Cementos Cienfuegos S.A.* Diplomado, Cienfuegos.
- Turtos Carbonell, L. y Pire Rivas, S. (2010). Guía para la modelación de la dispersión regional de contaminantes gaseosos y de partículas en suspensión con el Sistema de Modelos CALMET-CALPUFF-CALPOST (CCC).
- Gaceta Oficial de la República de Cuba. (1997, July). Ley No 81 del medio ambiente.
- Abril, G. y Diez, S. (2010). Modelado de la dispersión de material particulado pm10 mediante la estimación de las tasas de emisión considerando la influencia de la meteorología local.
- Pierra Conde, A., Casals Blet, I. y Montes de Oca González, L. (2005). Modelación de emisiones de partículas debidas al transporte de mineral en minas a cielo abierto.
- National Pollutant Inventory (NPI). (2008). Emission estimation technique manual for cement manufacturing. Australian Government – Department of the Environment, Water, Heritage and the Arts.
- Norma Cubana NC 111/2004 Calidad del Aire. (2004). Reglas para la vigilancia de la calidad del aire en asentamientos humanos.
- Ogden, T., & Birkett, J. L. (n.d.). *The human head as a dust sampler. Inhaled particles IV*. Pergamon Press, Oxford: W.H Walton.
- OMS. 2005. Particulate matter air pollution: how it harms health. World Health Organization. Fact sheet EURO/04/05. Berlin, Copenhagen, Rome.
- OMS. 2006. Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and

sulfur dioxide. Summary of risk assessment

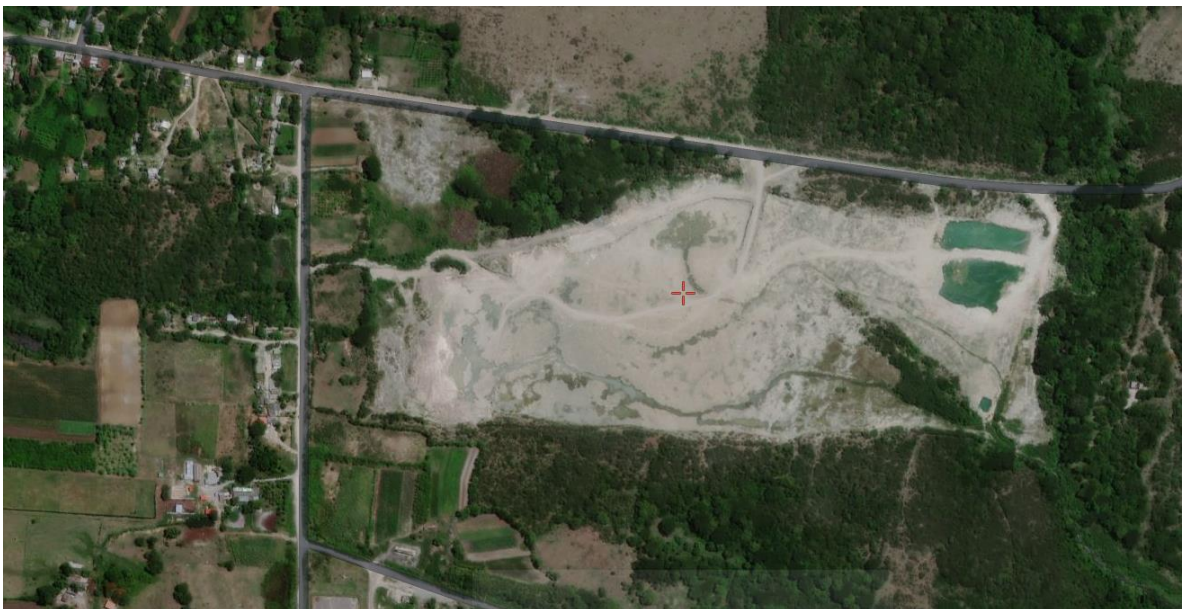
- Organización Mundial de la Salud, (2006). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Ginebra.
- Pasquill F. (1974). Atmospheric Diffusion. The Dispersion of Windborne Material from Industrial and Other Sources (2nd Ed). John Wiley and Sons.
- Petavratzi, E., S. Kingman, I. Lowndes, (2005). Particulates from mining operations: A review of sources, effects and regulations. Minerals Engineering, 18, 1183-1199.
- Ruíz, L. (2007). Conferencia Evaluaciones Ambientales: Instituto de Tecnologías y Ciencias Aplicadas.
- Sanjay, R. (2008). Exposure to Bad Air Raises Blood Pressure, Study Shows, ScienceDaily, Ohio State University,
<http://www.sciencedaily.com/releases/2008/07/0807281>
- Tarela, P. (2014). *Calidad del Aire e Impacto en la Salud: Herramientas de Simulación Computacional: Mecánica Computacional*.
- Thompson R. J., A. T. Visser, (2001). Mine Haul Road Fugitive Dust Emission and Exposure Characterisation. University of Pretoria.
- Turtós L. (2004, February). Externalidades ambientales atmosféricas de la generación eléctrica. Proyecto Programa Nacional Desarrollo Energético Sostenible. Universidad Nacional del nordeste. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas. (2006). Estudio experimental de procesos de dispersión atmosférica. Wittwer, Adrián R.1 - Loredó-Souza, Acir M.2 - Camaño Schettini, Edith B. pp 4
- USEPA. (1997). AP 42, Fifth Edition Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources.
- Tricio Gómez, V.; Montes de Oca, L.; Rodríguez, R.; Pierra, A.; Cuesta, O. (2008). Aplicación de modelos de dispersión atmosférica en la elaboración de planes de acción locales para mejorar la calidad del aire y estudios de impacto ambiental: estudio de caso. Congreso Nacional de Medio Ambiente. Cumbre del Desarrollo Sostenible.

Anexos.

Anexo.1 Área de la cantera de tobas puzolánicas ubicada en la zona de Carolina.



Anexo.2 Ubicación de la cantera en las cercanías del Caserío de Carolina.



Anexo.3 Canales de drenajes de la plataforma de cantera y pozos colectores donde se realizará la toma de muestra de residuales.



Anexo.4 Zona de mayor influencia de las emisiones de la cantera.



Anexo.5 Vista del riachuelo donde descargan las aguas de escorrentías de la cantera y distancia hasta el Río El Salado.

