



**Congreso Nacional del Medio Ambiente**  
Cumbre del Desarrollo Sostenible

## COMUNICACIÓN TÉCNICA

# 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

Autor: Verónica Tricio Gómez

Institución: Universidad de Burgos  
E-mail: [vtricio@ubu.es](mailto:vtricio@ubu.es)

Otros autores: Liban Montes de Oca (Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba); Roiki Rodríguez (Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba); Allan Pierra (Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba); O. Cuesta (InsTEC e Instituto de Meteorología, Cuba)



## **RESUMEN:**

Con los crecientes problemas de contaminación y el énfasis dado a las normas de calidad del aire en los últimos años en la Unión Europea, en los países en vías de desarrollo los modelos de dispersión están siendo cada vez más usados en evaluaciones de impacto ambiental, así como para apoyar la elaboración de planes de acción locales para mejorar la calidad del aire. Estos modelos fueron desarrollados y se han usado en países industrializados y pueden ser útiles en países en vías de desarrollo. Sin embargo, su uso puede requerir de una adaptación o calibración de acuerdo a la topografía y patrones meteorológicos propios del lugar y condiciones bajo las que son utilizados. Por ejemplo, en áreas tropicales o cordilleranas. Algunos de los modelos que acreditan cumplir los criterios técnicos mínimos definidos por la Agencia Ambiental US EPA, fueron probados en el terreno y extensamente revisados por lo que se denominan “modelos preferidos”. Existen otros modelos, que si bien no son de los que utilizan habitualmente, pueden llegar a ser más apropiados en situaciones específicas debido a que han sido desarrollados por instituciones locales, considerando las condiciones propias de dicha localidad. Lo anterior no indica que un “modelo no preferido” sea menos apropiado para una determinada aplicación, pero sí que existen experiencias documentadas para los “modelos preferidos” que pueden dar mayor credibilidad al estudio. Sin embargo, tampoco el uso de un “modelo preferido” asegura que cualquier aplicación sea exitosa. A partir de los resultados obtenidos de la revisión de los modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos en EslA como apoyo en los planes de acción locales para mejorar la calidad del aire en Cuba, se ha analizado un estudio de caso, Moa, con topografía y patrones meteorológicos propios del lugar. En este trabajo se ha revisado el procedimiento de los Estudios de Impacto Ambiental (EslA) y los planes de acción locales para mejorar la calidad del aire en Cuba, con el objetivo de asegurar que el uso de los modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos sea justificado y se aplique correctamente. Esto requiere, por una parte, implementar y mantener procesos que desarrollen el conocimiento y competencia en evaluadores, analistas y tomadores de decisiones acerca del estado del arte en cuanto a la modelación de dispersión de contaminantes atmosféricos.



## **INTRODUCCIÓN.**

En el artículo descriptivo del estado del arte de la modelación de la dispersión de contaminantes atmosféricos en Cuba (Montes de Oca, et al., 2008), se plantea que debido a la importancia que tiene la modelación de la dispersión de contaminantes atmosféricos se ha propuesto una Guía (Turtós et al., 2004) para la aplicación de estos modelos en nuestro país con el fin de lograr que los estudios locales de calidad del aire presenten mayor rigor y estén a la altura del estado del arte internacional, dado que la normativa cubana que trata el tema, en lo referente a los modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos, no ha cambiado en los últimos 20 años y no refleja los últimos avances de la ciencia en la modelación de la dispersión.

La Guía propuesta proporciona la visión necesaria en los enfoques de modelación recomendados y la consistencia en los métodos de modelación. También se propone aprovechar toda la experiencia adquirida en el país en el uso del modelo de Berlyand (NC 93-02-202, 1987), tanto para estimar las concentraciones instantáneas como los promedios diarios, dándole su lugar en el esquema de evaluación por niveles, específicamente en los niveles de sondeo (Montes de Oca, et al., 2008).

La Guía recomienda el uso de los modelos SCREEN3 y Berlyand para análisis de sondeo, en este caso específico ilustraremos su aplicación como parte de un Estudio de Impacto Ambiental (EslA) de un nuevo Proyecto de Explotación Minero Metalúrgico, para ello fueron necesarias 2 etapas, tomando en consideración los diferentes factores regulatorios que inciden sobre el Proyecto, una primera etapa en la que se emplea el procedimiento de modelación recomendado por los lineamientos del Banco Mundial para estos casos (WORLD BANK GROUP, 1998), teniendo en cuenta que el EslA es parte integrante del Estudio de Factibilidad Banqueable que se debe presentar a los grupos financieristas internacionales y una segunda etapa en la cual se aplican los requisitos regulatorios de la normativa cubana (NC 39:1999), orientado a su presentación a la Autoridad Ambiental de la República de Cuba para tramitar los permisos y licencias de rigor.

También es recomendado se continúen los trabajos para definir el modelo a usar para modelar fuentes lineales asociadas al transporte, por lo cual se presenta una experiencia desarrollada localmente para la modelación de la emisión y dispersión de partículas por el tránsito de vehículos en caminos no pavimentados en las minas de Níquel a cielo abierto.



## **DESARROLLO.**

Se aplicó un procedimiento de sondeo para determinar si los parámetros de las fuentes previstas en el proyecto provocarán que se sobrepasen o no los límites de calidad del aire en el área de influencia del proyecto. El análisis de sondeo aplicado servirá para determinar de manera aproximada las concentraciones esperables en las condiciones más desfavorables.

El presente estudio emplea los elementos brindados por el proyecto para una modelación del proceso de dispersión de contaminantes en la atmósfera, en una aproximación inicial de alcance limitado, lo cual es propio de la fase de factibilidad, para el análisis pormenorizado de cada situación se requiere un estudio a largo plazo empleando modelos detallados, datos de observaciones meteorológicas horarias “in situ” de un periodo representativo, datos de monitoreo acumulados y considerar además la experiencia práctica. La Figura 1 muestra la vista de la planta actual del Proyecto, mostrando las chimeneas existentes y un esquema de las nuevas instalaciones mostrando las chimeneas proyectadas

## **CONSIDERACIONES GENERALES COMUNES A LOS PROCEDIMIENTOS DE CÁLCULO DE LAS DOS ETAPAS.**

Se procedió previamente a la determinación de los aspectos básicos tomados en cuenta en los cálculos fundamentales tanto en los procedimientos recomendados por el Banco Mundial (*Screening Procedures for Estimating the Air Quality Impact of Stationary Sources, Revised. USEPA 450/R-92-019*) como en la normativa cubana (*NC 93-02-202: Requisitos higiénico sanitarios: Concentraciones máximas admisibles, alturas mínimas de expulsión y zonas de protección sanitaria*).

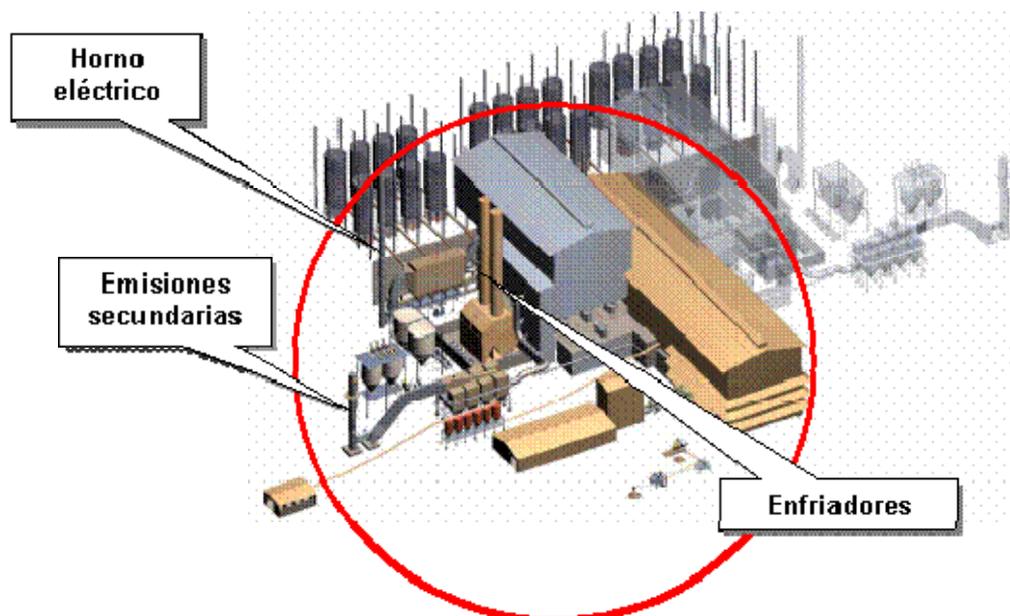
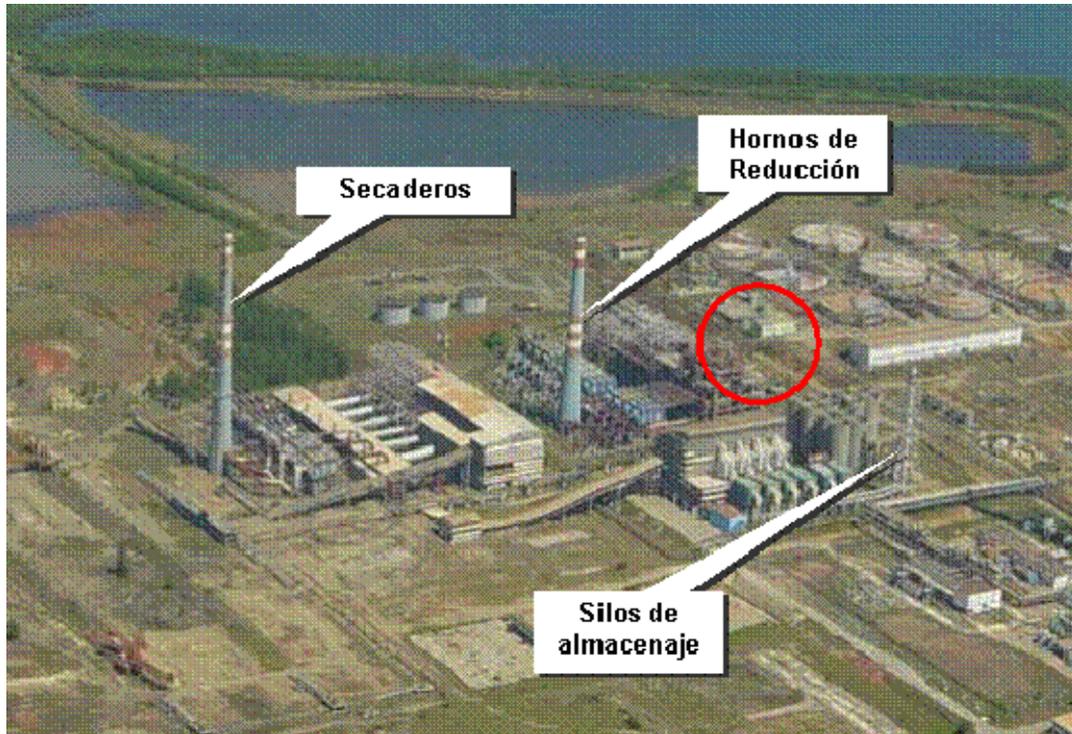
## **CARACTERÍSTICAS DE LAS PRINCIPALES SUSTANCIAS CONTAMINANTES EMITIDAS.**

### *Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)*

El SO<sub>2</sub> es un gas incoloro e inodoro en concentraciones bajas y de olor acre en concentraciones altas. Es producido por la combustión de combustibles fósiles que contienen azufre como el carbón y el petróleo y por varios procesos industriales. Cuando el SO<sub>2</sub> y los oxidantes fotoquímicos reaccionan en la atmósfera, se forma el trióxido de azufre, el cual se combina con agua para formar ácido sulfúrico y partículas sulfatadas. Esto contribuye a la producción de lluvia ácida y al aumento de los niveles de material particulado (MP) con diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micrómetros (MP<sub>10</sub>) y 2,5 micrómetros (MP<sub>2,5</sub>).

La exposición al SO<sub>2</sub> puede disminuir la función pulmonar, agravar enfermedades respiratorias preexistentes (especialmente bronquitis) y reducir la habilidad de los pulmones para liberar partículas extrañas. También puede contribuir al incremento de la mortalidad, especialmente si las concentraciones de MP también son elevadas. Los asmáticos y las personas con enfermedades pulmonares obstructivas crónicas (EPOC) y con problemas cardíacos son los más sensibles a los efectos del SO<sub>2</sub>. También es probable que los adultos mayores y niños sean sensibles a los efectos del SO<sub>2</sub>. La

exposición de corto plazo a altas concentraciones de  $\text{SO}_2$  puede irritar el tracto respiratorio y congestionar los conductos bronquiales de los asmáticos. La Tabla 1 presenta los valores guía para  $\text{SO}_2$  recomendados por la OMS. Además, indica los niveles de  $\text{SO}_2$  por encima de los cuales se han observado efectos en la salud, el factor



de incertidumbre y los valores guía para diferentes tiempos promedio de exposición.



**Figura 1. Vista de la planta actual, mostrando las chimeneas existentes y un esquema de las nuevas instalaciones mostrando las chimeneas proyectadas**

**Tabla 1. Valores guía para el SO<sub>2</sub> recomendados por la OMS**

Efectos sobre la salud	Nivel de efecto observable (mg/m <sup>3</sup> )	Factor de incertidumbre	Valor guía (mg/m <sup>3</sup> )	Tiempo promedio de exposición
Cambios en la función pulmonar de los asmáticos	1000	2	500	10 minutos
Exacerbación de los síntomas respiratorios en individuos sensibles	250	2	125	24 horas
	100	2	50	1 año

(Fuente CEPIS-OPS)

## VALORES DE CONCENTRACIÓN DE FONDO A CONSIGNAR.

Para evaluar la concentración de fondo nos basamos en la disponibilidad de información existente, en especial la concerniente a los datos obtenidos como parte de un estudio regional de la calidad del aire con actualizaciones periódicas desde 1997 a la fecha y en especial el Estudio de Línea Base Ambiental realizado para el proyecto.

Las concentraciones instantáneas de SO<sub>2</sub> en la zona de estudio varían entre 1.9 y 168.5 µg/m<sup>3</sup> promedio de 24 horas, mostrando una amplia zona con valores inferiores a 20 µg/m<sup>3</sup> desde la ubicación de la futura planta de procesamiento del proyecto, hacia el oeste (W). Teniendo en cuenta el patrón de distribución que siguen las concentraciones de SO<sub>2</sub> en el área de influencia directa de las emisiones de la planta (definida por un radio del orden de 5 km alrededor de la planta) se considera adecuado escoger el valor de 20 µg/m<sup>3</sup> como el más representativo de la concentración de fondo para el área en cuestión (ver Figura 2).

## CARACTERÍSTICAS DE LAS FUENTES EMISORAS.

La Tabla 2 contiene todos los datos necesarios para caracterizar físicamente las 3 principales fuentes de emisión del proyecto y los regímenes de operación para cada chimenea. Cada fuente ha sido modelada para la situación de plena carga. Para las chimeneas del sistema de tratamiento de emisiones secundarias y el de los silos de almacenamiento que incluye la planta de trituración y la de aglomeración no fueron suministrados los datos de las emisiones.

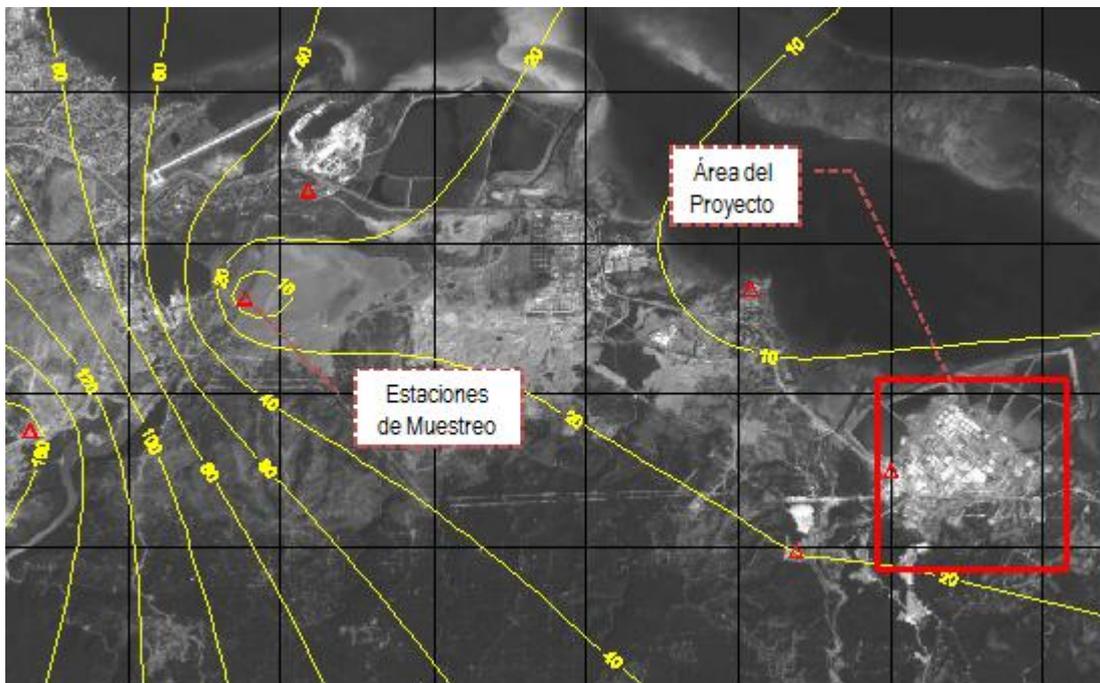


Figura 2. Distribución espacial de las concentraciones instantáneas de SO<sub>2</sub>.

Tabla 2. Características de las fuentes emisoras

Parámetro	Unid.	Nombre / Código				
		Secaderos	Hornos de Reducción	Horno Eléctrico	Emisiones Secund.	Silos
Altura de la Chimenea	(m)	140	120	80	30	80
Diámetro Interior	(m)	6	5	1,2	3	3
Velocidad de salida de los gases (EPA)	(m/s)	4,9	1,4	28,8		
Temp. del Efluente	(K)	410,0	610,0	586,0		
Caudales Másicos de SO <sub>2</sub> Fuel oil (bajo S) 40 % de metalización	(g/s)	5,8	3,5	6,6		
Caudales Másicos de Material Particulado	(g/s)	2,0	0,3	0,3		





## CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFICAS DE LA ZONA.

Observando la topografía de la zona donde se encuentran ubicadas las chimeneas vemos que corresponde a una zona montañosa con cambios bruscos en el relieve. En la Tabla 3 se muestran las alturas en cotas absolutas respecto al nivel del mar de las terrazas de las plantas y las áreas poblacionales circundantes.

**Tabla 3. Cotas respecto al nivel del mar de las diferentes fuentes y emisores.**

Denominación del área	Cotas (m)
Secaderos	36
Hornos de reducción	34
Horno eléctrico y refinera	33
Receptores	Variable hasta 40

Las fuentes están ubicadas en una zona donde se puede considerar la condición de terreno plano, será necesario entonces escoger la opción de terreno simple (alturas de los receptores sobre la base de las chimeneas pero no sobrepasan la altura de la misma) para evaluar puntualmente la influencia sobre los receptores.

## ANÁLISIS DE LOS RECEPTORES.

El análisis de los receptores se realizó para garantizar un adecuado rastreo de la zona de influencia. Se utilizó una rejilla de paso 100 x 100m en las zonas de máxima concentración esperable, con el objetivo de asegurar la presencia de receptores en dichas áreas. Existen algunas circunstancias bajo las cuales para el cálculo de las concentraciones máximas esperables fue necesario considerar ubicaciones especiales de receptores, que denominamos críticos.

## CONCENTRACIONES MÁXIMAS ADMISIBLES.

Los valores establecidos por la norma cubana NC 93-02-202 para el contaminante objeto de estudio se muestran en la tabla 4.

**Tabla 4. Concentraciones máximas admisibles de sustancias contaminantes del aire para zona habitables.**

Contaminantes	CMA (mg/m <sup>3</sup> )	
	Instantánea (20 min.)	Prom. diario (24 horas)
Dióxido de Azufre	0,50	0.05

(Fuente NC 93-02-202)



En la normativa cubana no están establecidas normas para la emisión. Uno de los objetivos del proyecto es diseñar los sistemas medioambiental y de manejo de gases para lograr el nivel más estricto de las regulaciones del Banco Mundial y las normas cubanas. Éstos se resumen debajo, con la fuente indicada:

- Las emisiones de SO<sub>2</sub> por chimenea: 2000 mg/dry Nm<sup>3</sup> (según el Banco Mundial)
- SO<sub>2</sub> GLCs promedio de 24 horas : 50 µg/m<sup>3</sup> (según la Norma Cubana)

### **CONDICIONES CLIMÁTICAS EXTERIORES.**

Del informe “Caracterización de la contaminación atmosférica de las zonas afectadas por el proceso industrial de Moa” del INSMET, se asumen para el presente estudio los parámetros mostrados en la tabla 5.

**Tabla 5. Condiciones climáticas exteriores.**

<b>Parámetros considerados</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Velocidad y dirección del viento promedio anual	m/s	4.5 E
Temperatura máxima (probabilidad del 1%)	°C	32 °C

### **Etapa I. Proceso de evaluación usando modelo regulatorio de análisis de rejilla según las guías del Banco Mundial.**

En el análisis de sondeo se parte de la premisa de que se están considerando las peores condiciones posibles en la evaluación de la concentración máxima total para cada uno de los períodos promedio fijados por la normativa correspondiente. La evaluación del aporte relativo de las emisiones de cada fuente está basada en un barrido de condiciones atmosféricas que permite identificar la situación ambientalmente más desfavorable.

El modelo a utilizar para el análisis de sondeo es el SCREEN3 recomendado por el WORLD BANK GROUP (Pollution Prevention and Abatement Handbook, Effective July 1998) el mismo está descrito en la versión de (EPA 450/4-9-006, Modeling Guideline, and EPA 454/R-92-019, Screening Procedures for Stationary Sources) actualizada a la fecha de realización del estudio, la versión del programa utilizada (versión fechada 96043) fue obtenida en ([www.ttn.epa.gov/scram](http://www.ttn.epa.gov/scram)).

El modelo SCREEN3 fue desarrollado para proporcionar un método fácil de usar para obtener estimaciones de concentración de contaminantes basadas en el documento de procedimientos de análisis de rejilla. Aprovechando la gran disponibilidad de las computadoras personales, el modelo SCREEN hace los cálculos de rejilla accesibles a una gran variedad de usuarios. SCREEN3 se ejecuta interactivamente en una computadora personal.



SCREEN3 puede realizar todos los cálculos de corto plazo para una sola fuente, incluyendo la estimación de concentraciones máximas a nivel de suelo y la distancia, incorpora los efectos del flujo de caída por edificios, en las concentraciones máximas para las regiones cercanas de la pluma, estima las concentraciones en la zona de recirculación de cavidad, estima las concentraciones debido al rompimiento de inversión y fumigación de litoral. El modelo puede incorporar los efectos de terreno elevado sencillo en las concentraciones máximas.

### **SELECCIÓN DE LA TOPOGRAFÍA: URBANA O RURAL.**

De los diversos criterios utilizados para la selección de la condición urbana o rural (rugosidad de la superficie, uso de la tierra, densidad de población), se adoptó el procedimiento basado en el uso de la tierra. Este procedimiento determina el empleo de parámetros de dispersión urbanos en aquellos casos para los cuales el uso de la tierra para más del 50 por ciento de la zona de influencia, corresponda a zonas alta o medianamente industriales, comerciales o de residencias multifamiliares. Dicha zona de influencia queda determinada por un círculo de 5 kilómetros de radio con centro en el foco emisor y por la dirección respectiva del viento. El análisis de la zona de influencia muestra una clasificación rural en la cual se desarrolla una intensa actividad minero - industrial.

### **CONSIDERACIÓN DEL EFECTO DE REMOCIÓN POR EDIFICIOS CERCANOS.**

Los edificios ubicados en las inmediaciones de una chimenea influyen de manera diferente en el desarrollo de la pluma de acuerdo a la relación entre su altura y su ancho. Bajo ciertas condiciones atmosféricas, se puede producir una cavidad a barlovento del edificio. La pluma puede ser atrapada en esta cavidad dando lugar por resultado concentraciones locales extremadamente altas.

Se define entonces la altura de Buen Diseño Técnico  $h$  (BDT) como:

$$h_{BDT} = \begin{cases} H_{edif} + 1.5L & Si L < H \\ 2.5H_{edif} & Si L \geq H \end{cases}$$

donde  $H_{edif}$ , es la altura del edificio y  $L$  es la menor dimensión entre el ancho proyectado en la dirección del viento y la altura. Se considera que los edificios cercanos modifican el desarrollo de la pluma si la altura de la chimenea es menor que  $h_{BDT}$ .

Se considera que un edificio está lo suficientemente cerca de una chimenea como para influir en el desarrollo de su pluma, cuando la chimenea esta dentro de un rectángulo descrito por una línea ubicada a una distancia  $5L$  del edificio en la dirección del viento y otra paralela a la anterior ubicada a una distancia  $2L$  en la dirección contraria al viento.

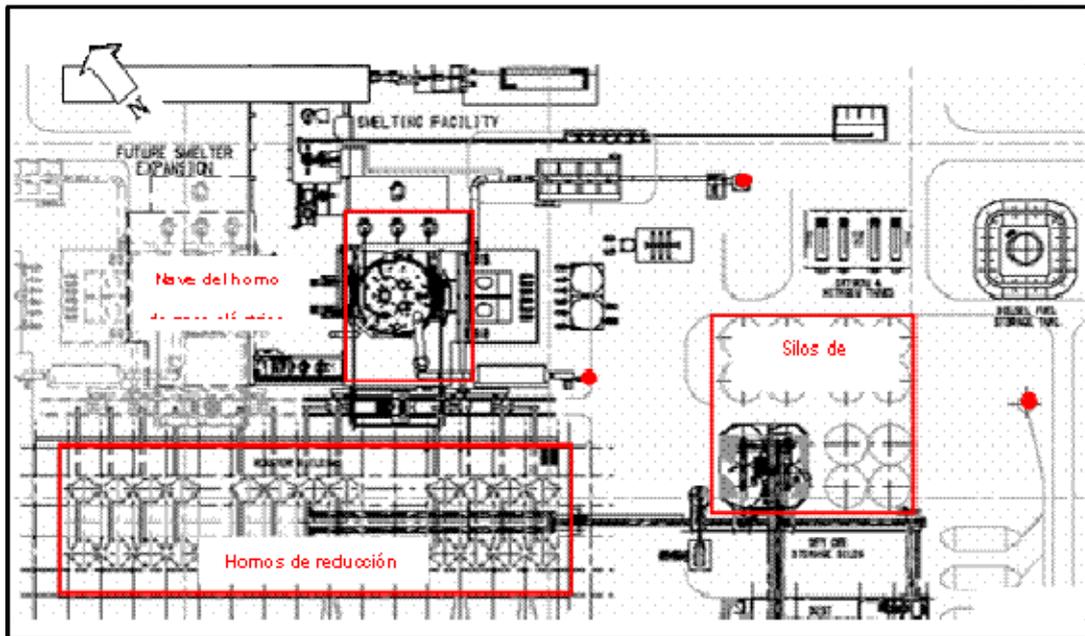


Figura 4. Dimensiones de las estructuras circundantes no cumplen la  $h_{(BDT)}$ .

Teniendo en cuenta que las relaciones de las dimensiones las alturas planificadas de las chimeneas del horno de arco eléctrico, la de emisiones secundarias y la de silos de almacenamiento con las dimensiones de las estructuras circundantes no cumplen la  $h_{(BDT)}$  se hace necesario considerar en la modelación los efectos de remoción en estas estructuras de la planta. En la Figura 4 se representa la ubicación relativa de las estructuras respecto a las chimeneas en cuestión.

El modelo SCREEN3 requiere los siguientes datos de entrada:

- Altura del edificio (m)
- Dimensión máxima horizontal de la estructura (m)
- Dimensión mínima horizontal de la estructura (m)

en la Tabla 6 se especifican las dimensiones aproximadas de estas estructuras.

Del análisis de la Tabla 6 y la Figura 6 se infiere que la altura de las chimeneas del horno de arco eléctrico, la de emisiones secundarias y la de los silos de almacenamiento no cumple con los requerimientos de "Buen Diseño Técnico" por lo que se presupone la influencia de las estructuras señaladas anteriormente en la dispersión de los contaminantes, para la evaluación de este efecto se procederá a su consideración en la modelación.

**Tabla 6. Dimensiones de los edificios cercanos a las chimeneas.**

<b>Estructura</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>Dimensión máxima horizontal (m)</b>	<b>Dimensión mínima horizontal (m)</b>	<b>h (BDT)</b>
Hornos de reducción	60	140	40	150
Silos de almacenamiento	60	60	60	150
Nave del horno de arco eléctrico	45	50	40	120

### **EFFECTOS AERODINÁMICOS LOCALES.**

Los efectos aerodinámicos locales pueden tener influencia adversa en la elevación de la pluma y su dispersión. Para condiciones de altas velocidades del viento y bajas velocidades de salida de los gases la pluma puede ser parcialmente atrapada en una cavidad de baja presión que se desarrolla en el tope de la chimenea. Durante los cálculos se pudo observar que las velocidades de salida de los gases para las chimeneas de Secaderos y Hornos son bastantes pequeñas en comparación con los valores típicos (de 10 a 30 m/s), lo que puede dar lugar al efecto anteriormente mencionado, esta situación deberá mejorar al ampliarse la capacidad cuando entre en funcionamiento la segunda etapa.

### **CÁLCULO DE LAS CONCENTRACIONES HORARIAS MÁXIMAS PARA DETECTAR LA CONDICIÓN ATMOSFÉRICA DE PEOR CASO.**

Para detectar las condiciones atmosféricas de peor caso, es decir aquéllas que implican la concentración horaria más alta, se deben tener en cuenta todas las combinaciones posibles de clase de estabilidad - velocidad de viento - altura de la capa de mezcla.

En un escenario complejo con varias fuentes y condiciones meteorológicas cambiantes, es apropiado calcular los impactos de cada fuente individualmente, usando la meteorología simplificada para cada fuente. Pueden sumarse entonces los impactos de todas las fuentes, esto no proporciona un estimado tan riguroso como un modelo detallado multifuente pero garantiza una evaluación razonable del impacto global.

El método más adecuado es ejecutar la opción de la meteorología completa para cada fuente y sumar los máximos individuales de las concentraciones pronosticadas para determinar un valor máximo combinado. Este acercamiento asume que las fuentes son similares en su naturaleza. Como el valor máximo pronosticado para cada fuente está a menudo asociado con una única condición meteorológica, los máximos individuales no podrán ocurrir para la misma condición. Como consecuencia, la suma será conservadora dado que los máximos individuales ocurrirán como regla general al mismo tiempo.

## MATRIZ CLASE DE ESTABILIDAD - VELOCIDAD DE VIENTO.

La turbulencia de la atmósfera se caracteriza en base a un parámetro que se denomina clase de estabilidad, que es función de la turbulencia térmica y de la turbulencia mecánica. Con el propósito de la modelación de la dispersión de los contaminantes en la atmósfera se han definido seis niveles de turbulencia atmosférica, referidas como clases de estabilidad de Pasquill - Guifford (PG):

- Clases PG A, B y C están asociadas con la turbulencia aumentada por el calentamiento diurno y son clasificadas como condiciones inestables.
- Clase PG D está asociada con la turbulencia generada mecánicamente (p. ej. velocidades del viento altas) o condiciones de nublados (p. ej. no calentamiento o enfriamiento). La misma está clasificada como condiciones neutrales.
- Clases PG E y F están asociadas con el cese de la turbulencia causado por el enfriamiento nocturno y son denominadas como condiciones estables.

La siguiente Tabla 7 sintetiza la definición de las clases de estabilidad para condiciones diurnas y nocturnas, según la radiación solar incidente, para todos los rangos de velocidades de viento:

**Tabla 7. Clases de estabilidad para condiciones diurnas y nocturnas.**

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

<sup>(1)</sup> La noche se define como el período desde una hora después de la puesta de sol, hasta una hora antes de la salida del mismo. Para cielos totalmente cubiertos, tanto para el día como para la noche, debe asumirse clase de estabilidad D.

En la Figura 5 se muestran las frecuencias de ocurrencia de las diferentes clases de estabilidad PG en la zona de estudio en el periodo muestreado. En ella se ve la preponderancia de la clase de estabilidad D, la misma está clasificada como condiciones

neutrales, asociada con la turbulencia generada mecánicamente es decir velocidades del viento altas.

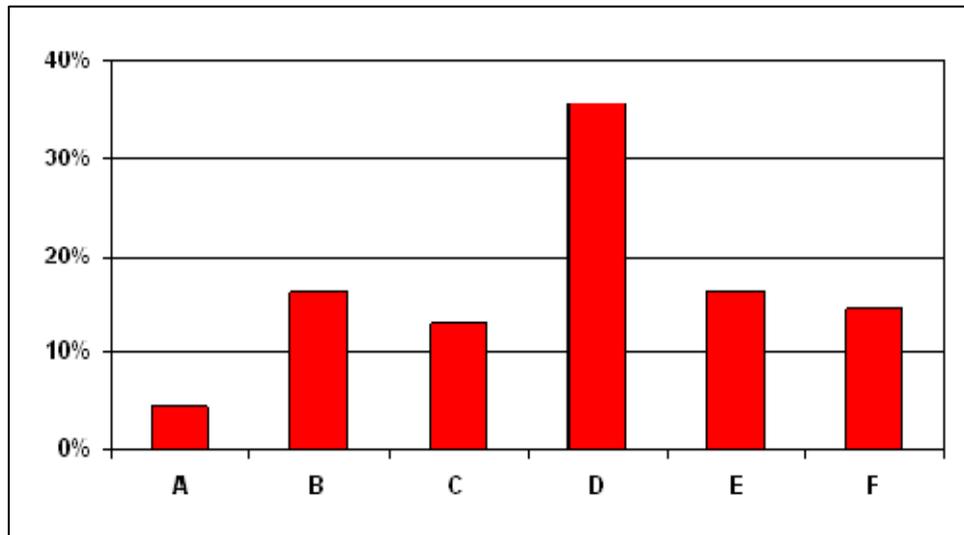


Figura 5. Frecuencia de ocurrencia de las diferentes clases de estabilidad PG.

La Tabla 8 muestra la matriz de frecuencias relativas (%) de ocurrencia de clase de estabilidad – velocidad del viento en la que se corrobora lo anterior.

**Tabla 8. Matriz de frecuencias relativas (%) de ocurrencia de clase de estabilidad – velocidad del viento.**

Intervalos de Veloc. del viento (m/s) (a 10 m de altura)	Clases de estabilidad					
	A	B	C	D	E	F
$V < 2$	1.17	5.36		2.39		12.46
$2 \leq V < 3$	3.36	1.28	0.52	1.65	9.07	1.94
$3 \leq V < 5$		9.13	2.71	2.34	8.37	
$5 \leq V < 7$			8.18	16.16		
$V \geq 7$			1.98	11.91		

#### ALTURA DE LA CAPA DE MEZCLADO.

Para determinar la situación de peor caso bajo condiciones inestables y neutras (clases A, B, C y D), es necesario realizar un análisis tomando como parámetro las alturas de capa de mezcla, calculadas en base a la altura efectiva de cada una de las chimeneas en estudio.



Se calculó la altura efectiva de emisión para cada una de las chimeneas, para todas las velocidades de viento indicadas en la Tabla 8. Para cada una de las velocidades de viento, se calcula también para cada chimenea en estudio un valor para la altura de la capa de mezcla.

Para la evaluación de la concentración máxima horaria, en caso de chimeneas múltiples, cada celda de la Tabla 8 tiene asociada una combinación de clase de estabilidad (A, B, C o D) - velocidad de viento y tantas alturas de capa de mezcla como chimeneas en estudio. Para condiciones estables se consideró una altura de capa de mezcla de 10 000 m, para representar mezcla ilimitada. En este caso el procedimiento resulta más sencillo y se limita al cálculo la concentración máxima horaria para cada una de las combinaciones clase de estabilidad (E o F) - velocidad de viento (ver Tabla 8) para todas las chimeneas en conjunto.

## **FUMIGACIÓN.**

Fumigación es un término general para describir la mezcla rápida de una pluma elevada sobre el nivel del suelo. Pueden ocurrir dos tipos de fumigación:

- Fumigación por rompimiento de la inversión: Cuando ocurre una inversión localizada cerca del suelo previo a la salida del sol, con la pluma dispersándose en una capa estable. Después de la salida de sol la capa de mezclado se incrementa en altura. Cuando la capa de mezclado alcanza la pluma, la pluma se mezcla rápidamente produciendo a nivel de suelo concentraciones de corto tiempo relativamente altas.
- Fumigación de línea de costa: Flujos de aire estables costa adentro pueden producirse asociados a grandes cuerpos de agua. Este flujo estable se modifica más adentro y al entrar la pluma en él puede producir episodios de altas concentraciones a nivel de suelo.

El programa SCREEN 3 considera ambas opciones, cuando se tiene chimeneas mayores de 10 m y se usa la opción de dispersión en condiciones rurales.

## **CONCENTRACIONES MÁXIMAS PARA PROMEDIOS DE CORTO Y LARGO PLAZO.**

Dado que la salida de SCREEN3 está referida a periodos promedio de 1 hora, en aquellas situaciones para las cuales la normativa indica los límites máximos admisibles de corto plazo para periodos diferentes, se pueden obtener los valores de concentración máxima promedio de acuerdo a la expresión:

$$C_{\max}(D_t) = C_{\max}(60) \cdot \left(\frac{D_t}{60}\right)^{-0.20}$$

donde  $D_t$ : es el período promedio regulado (minutos).

Para periodos mayores que 1 hora es recomendado usar los factores de conversión dados en la tabla 9:

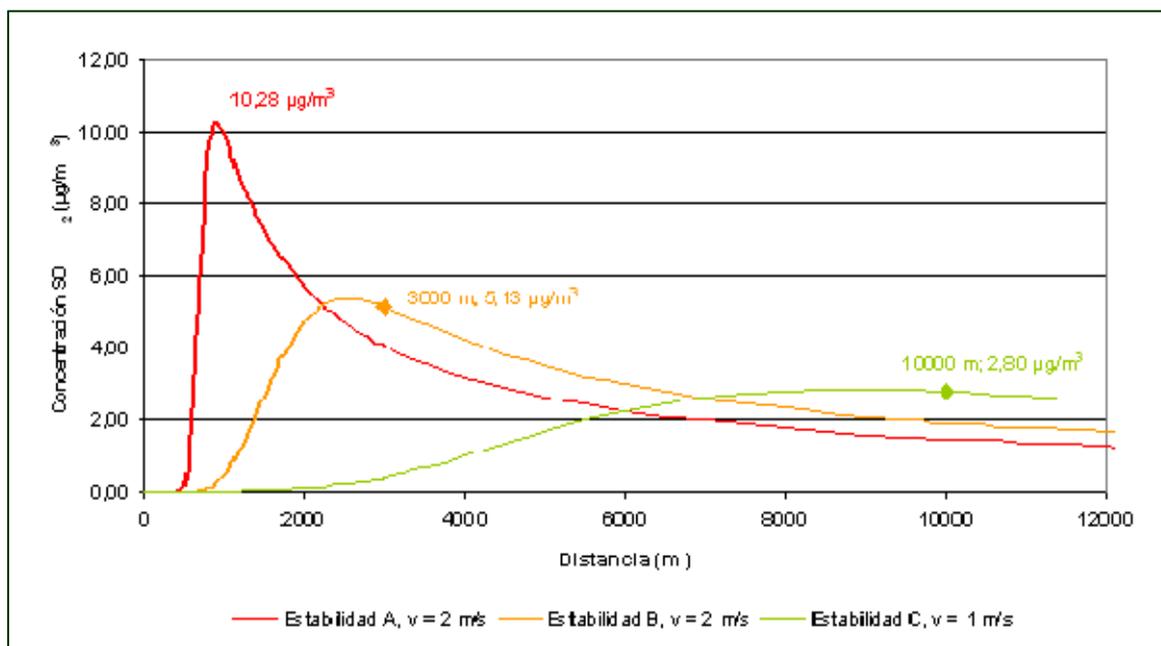
**Tabla 9. Factores de conversión recomendados para periodos de largo plazo (EPA)**

Periodo promedio	Factor multiplicativo
1 h	1,0
3 h	0,9 ± 0,1
8 h	0,7 ± 0,2
24 h	0,4 ± 0,2
Anual	0,08 ± 0,02

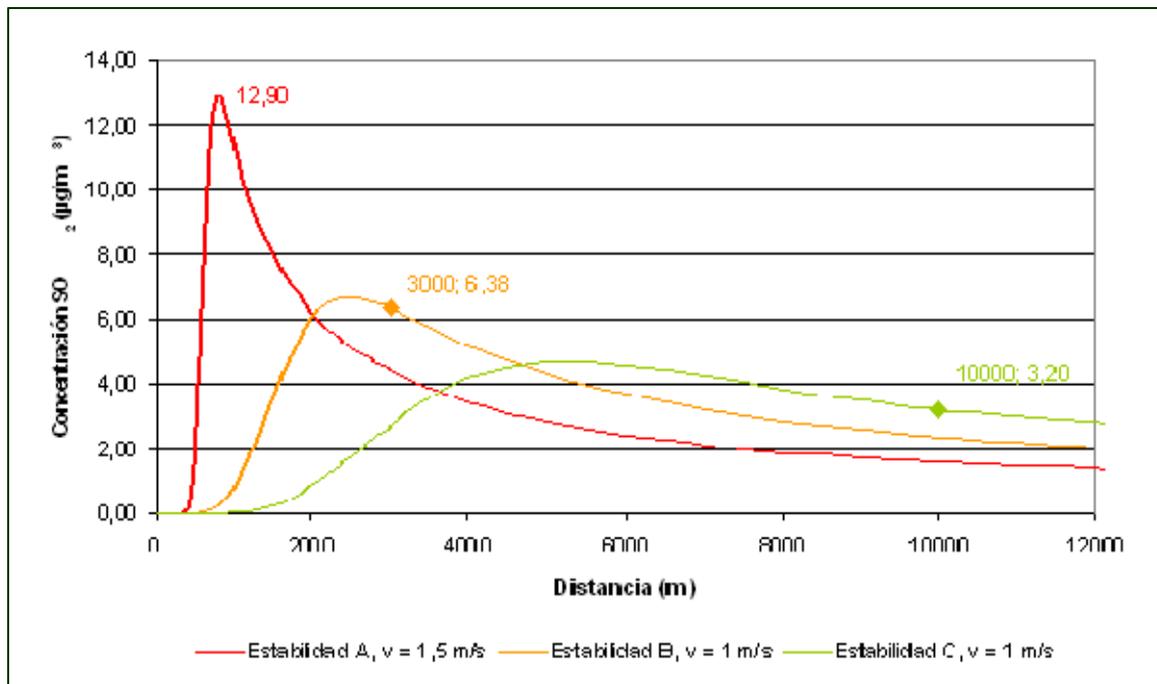
(Fuente USEPA)

## RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados de la corrida del modelo regulatorio de la USEPA, SCREEN3, arrojó como resultado que el contaminante más significativo es el SO<sub>2</sub>.



**Figura 10. Resultados de la modelación para la planta de secaderos asumiendo la meteorología de peor caso.**

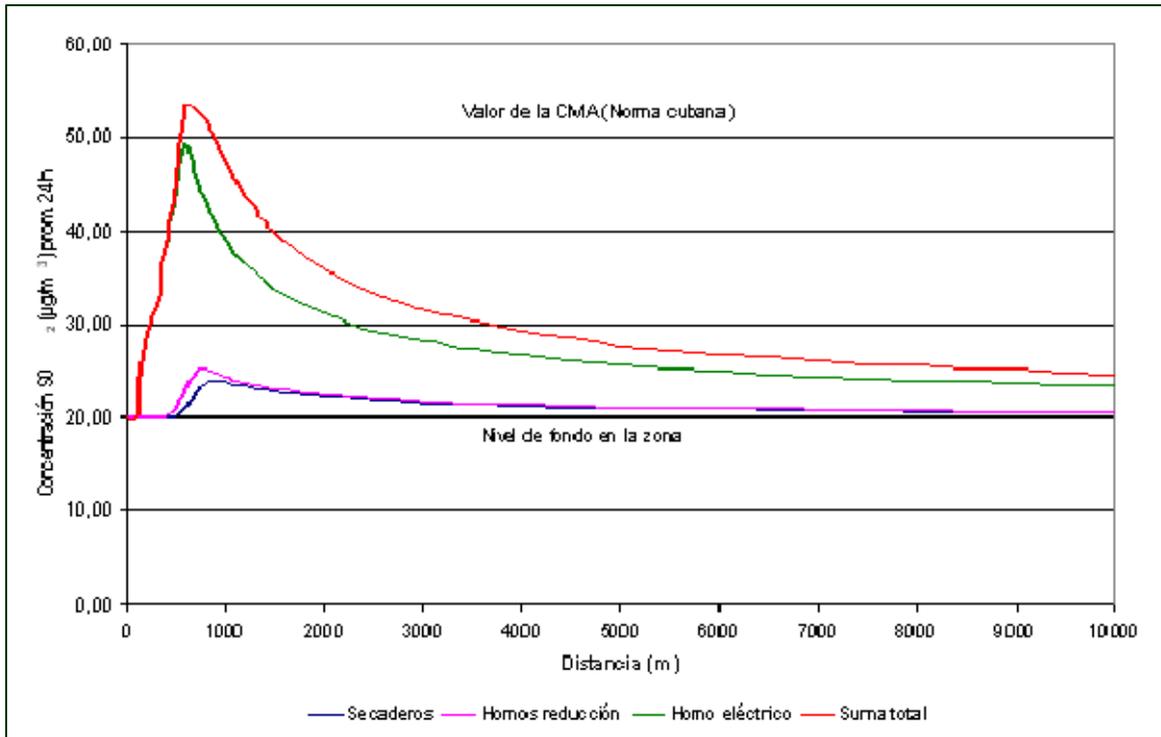


**Figura 11. Resultados de la modelación para la planta de hornos de reducción asumiendo la meteorología de peor caso.**

### SUMA DEL IMPACTO DEBIDO A TODAS LAS FUENTES.

Del análisis de cada una de las fuentes individuales podemos concluir que la chimenea de secaderos es la que menor concentración a nivel de suelo produce y la que peores condiciones de dispersión tiene es la del horno de eléctrico produciendo las mayores concentraciones a nivel de suelo de todo el conjunto de fuentes.

Para las condiciones meteorológicas de peor caso modeladas según los requerimientos regulatorios de la USEPA se obtiene una concentración media máxima de 58,6 µg/m<sup>3</sup> (promedio para 24 horas) al superponer las contribuciones individuales de las fuentes del proyecto al fondo estimado para la zona de influencia del mismo (Figura 10). Este valor máximo excede a la CMA de 50 µg/m<sup>3</sup> prevista en la norma cubana (NC- 93-02 - 202). Esta concentración está calculada sobre la base de criterios conservadores, dado que las concentraciones máximas individuales de cada fuente no se alcanzan exactamente para las mismas condiciones meteorológicas, la zona de impacto se produce en un intervalo de distancias entre los 600 – 900 m a partir de la fuente en la dirección del viento.



**Figura 12. Resultados de la suma de las concentraciones máximas debidas a todas las fuentes asumiendo la meteorología de peor caso.**

## **Etapa II. Calculo de las concentraciones de SO<sub>2</sub> provocadas en la atmósfera por las instalaciones del Proyecto de Ferroniquel y de la zona de protección sanitaria.**

La metodología de los cálculos de la dispersión que aparecen a continuación constituyen un instrumento directo para la evaluación de las diferentes alternativas de solución de las expulsiones de contaminantes a través de las chimeneas del proyecto con ajuste a las exigencias higiénico sanitarias previstas en la normativa cubana. La misma es aplicable en instalaciones localizadas en regiones llanas o poco accidentadas. Los valores de las concentraciones de sustancias contaminantes calculados se suponen a sotavento de las fuentes contaminantes en la capa de aire cercana a la superficie terrestre y formados bajo condiciones meteorológicas desfavorables. Los cálculos de la dispersión de las emisiones de las principales fuentes del proyecto fueron realizadas según el procedimiento de cálculo establecido en la NC 93-02-202 (Sección 5) usando tablas dinámicas programadas en MS EXCEL, los resultados obtenidos se presentan a continuación utilizando el formato propuesto en el Apéndice I de dicha norma.

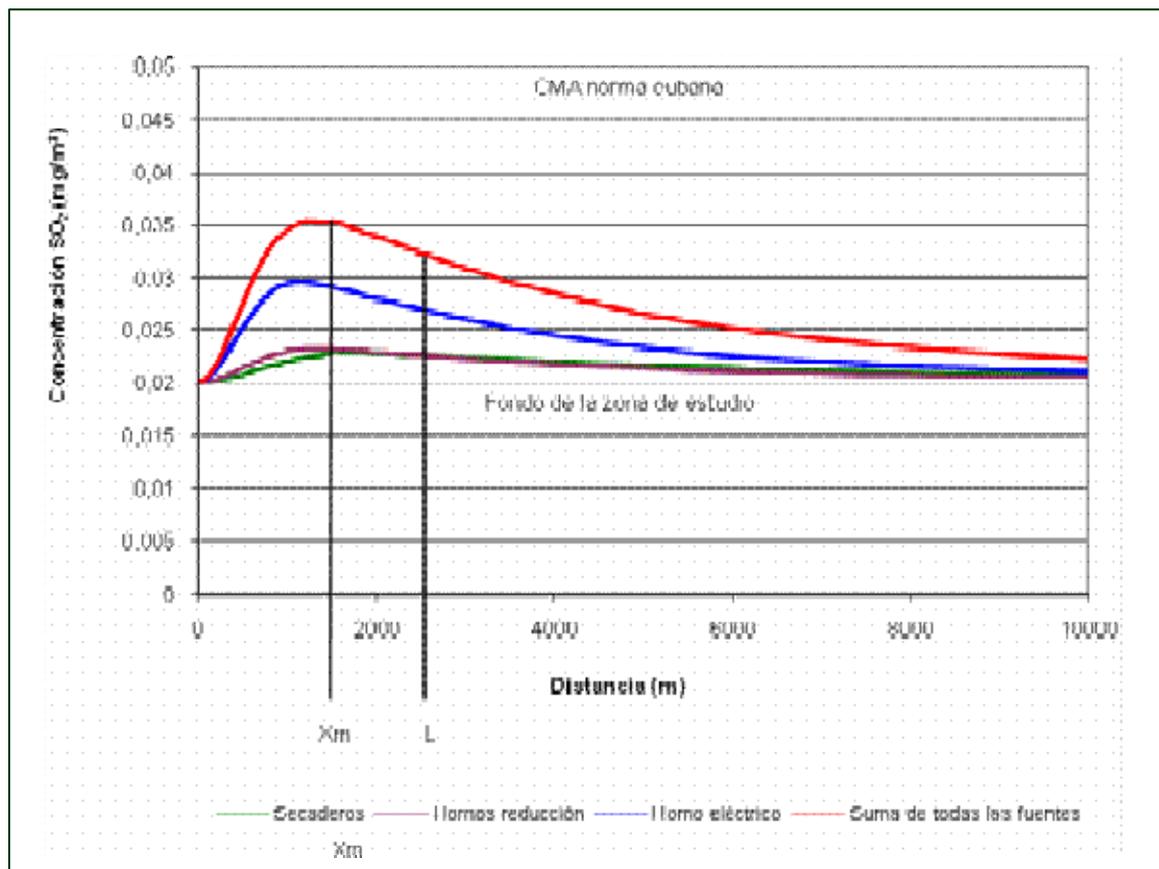
**Tabla 10. Cálculo de las concentraciones para el SO<sub>2</sub> provocadas en la atmósfera por las instalaciones del Proyecto.**

No.	Instalación	Descripción, fórmulas, cálculos	Unidad de medida	Valor Obtenido
1	2	3	4	5
		Cálculo de la concentración de SO <sub>2</sub> (Fuel Oil bajo S)		
1		Concentración de fondo	mg/m <sup>3</sup>	0,020
2		Constante de estratificación atmosférica (A)		200
3		Coefficiente de precipitación (F)		1
4		Temperatura del aire (Ta)	°C	32
5		Denominación de la instalaciones		
	1	Secaderos (405-CH-001)		
	2	Hornos de Reducción (413-CH-001)		
	3	Horno de arco eléctrico (513-CH-001)		
6	1 al 3	Número de chimeneas por instalación		1
7		Alturas de las chimeneas H	m	
	1			140
	2			120
	3			80
8		Diámetro de las chimeneas D	m	
	1			6
	2			5
	3			1,2
9		Diámetro de la plazoleta (área) de localización de las chimeneas (L)	m	200
10		Temperatura de la mezcla de gas y aire Tg:	°C	
	1			137
	2			337
	3			313
11		Caudal de la mezcla de gas y aire V:	Nm <sup>3</sup> /s	
	1			138.54
	2			27.48
	3			32.57
12		Flujos máximos de dióxido de azufre M:	g/s	
	1			5.8
	2			3.5
	3			6.6
13		Velocidades de salida de la mezcla de gas y aire $W = \frac{4v}{\pi D^2}$	m/s	
	1			4.9
	2			1.4
	3			28.8
14		Diferencia de temperatura entre la mezcla de gases y aire y el aire ambiente: $\Delta T = Tg - Ta$	14	
	1			105
	2			305
	3			281
15		Parámetros $f = \frac{10^3 W^2 D}{H \Delta T}$	m.s <sup>2</sup> .°C	
	1			0.070
	2			0.002
	3			0.553
16		Coefficientes de condiciones de emisión $m = (0.67 + 0.1\sqrt{f} + 0.34\sqrt[3]{f})^{-1}$		
	1			1.20
	2			1.39

	3			0.98	
17		Parámetros: $V_m = 0.65 \sqrt[3]{\frac{V * \Delta T}{H}}$	m/s		
	1			3.06	
	2			2.68	
	3			3.16	
18		Coeficientes de condiciones de emisión n (como función de $V_m > 2$ ):			
	1			1	
	2			1	
	3			1	
19		Concentración máxima de $SO_2$ $C_m = \frac{AMFmn}{H^2 \sqrt[3]{V\Delta T}}$	mg/m <sup>3</sup>		
	1			0,0029	
	2			0,0033	
	3			0,0096	
		$C_m = C_{m1} + C_{m2} + C_{m3}$		0,0158	
20		Velocidad crítica del viento $U_m$ (siendo $V_m > 2$ ) $U_m = V_m(1 + 0.12\sqrt{f})$	m/s		
	1			3,15	
	2			2,69	
	3			3,44	
		Velocidad crítica promedio del viento $\overline{U_m} = \frac{\sum U_m * C_m}{\sum C_m}$	m/s		
21		Concentración máxima de $SO_2$ a la velocidad del viento $U_m$ . $C_{mu} = r * C_m$			
		Valores de $R = \frac{\overline{U_m}}{U_m}$			
	1			1.02	
	2			1.20	
	3			0.93	
		Valores de r siendo a) $R > 1$ $r = \frac{3R}{2R^2 - R + 2}$ y b) $R < 1$ $r = 0.67R + 1.67R^2 - 1.34R^3$			
		Cálculo de $C_{mu} = r * C_m$			
	1			0,0029	
	2			0,0030	
	3			0,0096	
		$C_m = C_{mu1} + C_{mu2} + C_{mu3}$		0,0155	
		CONCLUSIONES			
		Se garantizan las condiciones higiénico sanitarias de la calidad del aire, ver Figura 11.			
		Factores eólicos calculados por rumbos: $0.5 \left( \frac{P}{P_o} + \frac{U_r}{U_s} \right)$			
		Rumbo	Fact. Eólico	Rumbo	Fact. eólico
		N	0,73	S	0,47
		NNE	0,62	SSW	< 1,0
		NE	1,04	SW	< 1,0
		ENE	1,72	WSW	< 1,0
		E	2,58	W	< 1,0
		ESE	1,34	WNW	< 1,0

	SE	0,94	NW	< 1,0		
	SSE	0,48	NNW	< 1,0		
<b>Radios de protección sanitaria</b>						
	Rumbo	L	Rumbo	L		
	N	1000	S	1000		
	NNE	1000	SSW	1000		
	NE	1040	SW	1000		
	ENE	1720	WSW	1000		
	E	2580	W	1000		
	ESE	1340	WNW	1000		
	SE	1000	NW	1000		
	SSE	1000	NNW	1000		

La Figura 13 muestra las concentraciones máximas para la agrupación de chimeneas del Proyecto calculadas por la NC asumiendo las condiciones meteorológicas más desfavorables al superponer las mismas sobre el fondo estimado para esta zona vemos que la concentración alcanza el valor de 0,036 mg/m<sup>3</sup> muy inferior a los valores de la CMA previstos en la norma cubana para el SO<sub>2</sub> de 0,5 y 0,05 para el Dióxido de Azufre, por lo que se puede asegurar que las emisiones previstas en el proyecto para este contaminante, cumplirán los requisitos higiénico sanitarios aún en condiciones meteorológicas adversas. La distancia para la cual se alcanza esta concentración es de 1 500 m en la dirección del viento.

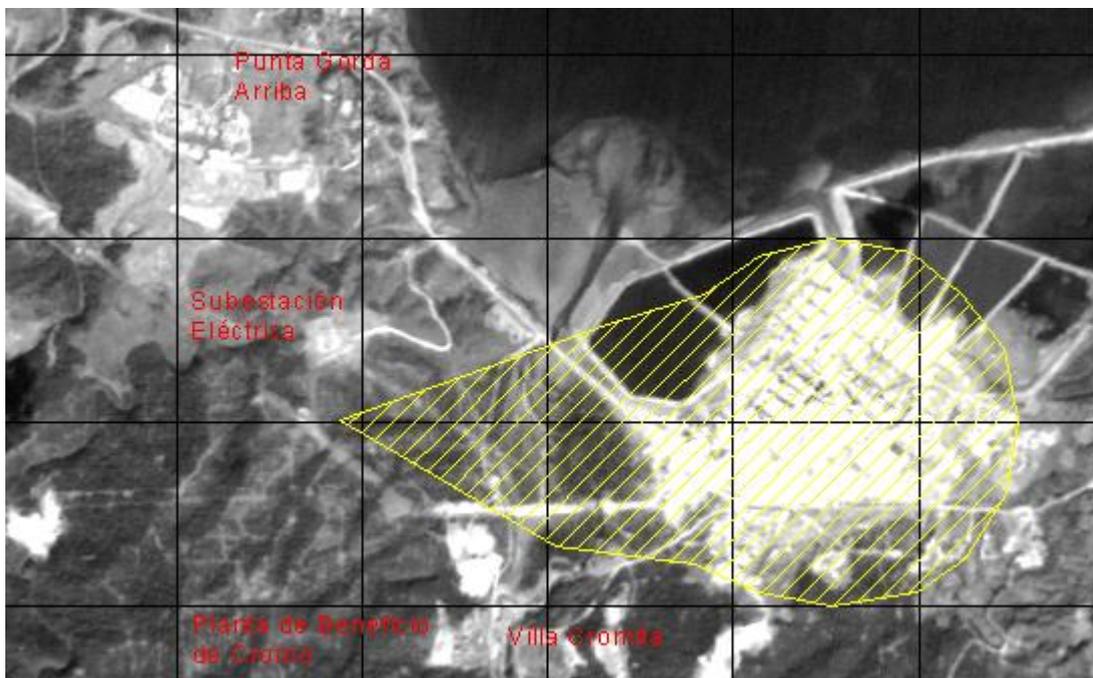


**Figura 13. Concentraciones máximas para la agrupación de chimeneas calculado por la NC asumiendo las condiciones meteorológicas más desfavorables.**

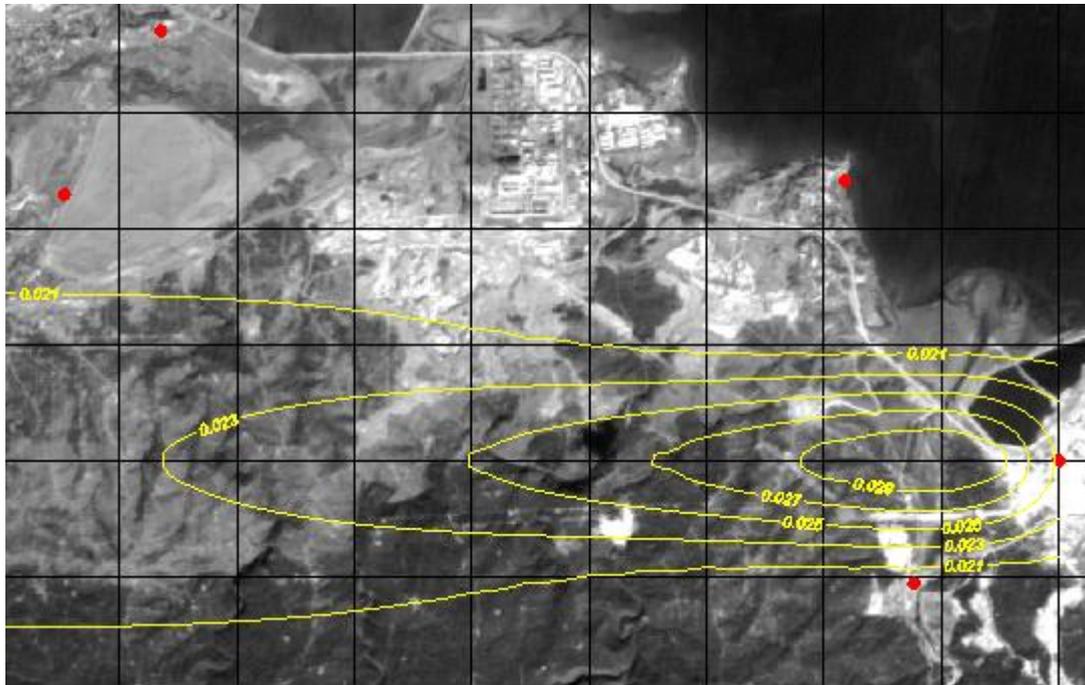
En la Figura 14 se muestra la zona de protección sanitaria calculada por la metodología prevista en la NC 93-02-202 (ver punto 22) de la tabla resumen, la misma toma en cuenta el radio de protección sanitaria de 1000 m previsto para este tipo de industria; los factores eólicos fueron calculados sobre la base de la frecuencia de ocurrencia del viento en los 16 rumbos según los datos del estudio aerológico realizado por el INSMET en 1990.

Se puede apreciar la marcada influencia de de los vientos del primer cuadrante que hacen que el radio de protección sanitaria se extienda 1,5 veces más a barlovento de las futuras instalaciones del proyecto, se encuentran fuera de la zona de protección sanitaria inherente al proyecto.

La Figura 15 muestra una representación espacial de la distribución de los campos y valores del SO<sub>2</sub> a nivel de suelo en la zona de influencia del proyecto y más allá de esta, se representan las isóneas representando los valores por encima del fondo de 0,02 mg/m<sup>3</sup> existente en la zona, dibujadas en la dirección predominante del viento por lo que coincidirá con la forma más habitual de la pluma de contaminantes. Se muestra también la ubicación de los actuales puntos de monitoreo, los cuales son susceptibles de un análisis para su reubicación en función del patrón de dispersión de las emisiones del proyecto.



**Figura 14. Radio de Protección sanitario.**



**Figura 15. Representación de la distribución de los campos y valores del SO<sub>2</sub>.**

### MODELACIÓN DE LA EMISIÓN Y DISPERSIÓN DE PARTÍCULAS EN LA MINA.

Estudios desarrollados o patrocinados por la EPA, han sido ampliamente utilizados como la fuente más confiable de estimación de factores de emisión de los principales contaminantes del aire para diversas actividades industriales. En el presente estudio se analizan los factores de emisión de las principales actividades ligadas a la extracción de mineral.

El principal contaminante emitido por el tránsito de vehículos en caminos no pavimentados es el material particulado. Las partículas se colocan en suspensión en el aire luego de cada pasaje de vehículo y en función de su granulometría, humedad y ocurrencia de vientos, será transportada a distancias variables. La siguiente expresión se aplica a la emisión, *E*, de material particulado en caminos no pavimentados:

$$E = K \cdot 1,7 \left( \frac{s}{12} \right) \cdot \left( \frac{S}{48} \right) \cdot \left( \frac{W}{2,7} \right)^{0,7} \cdot \left( \frac{w}{4} \right)^{0,5} \cdot \left( \frac{365 - P}{365} \right) \quad (\text{kg / km recorrido})$$

donde:

- K*- multiplicador de tamaño de partícula (no dimensional),
- s*- tenor de limo ( $\varnothing < 75 \mu\text{ m}$ ) del material de la superficie de la pista (%)
- S*- velocidad media del vehículo (km/h),



$W$ - peso medio del vehículo (t),  
 $w$ - número medio de neumáticos,  
 $p$ - número de días al año con precipitación pluviométrica por encima de 1 mm.

El multiplicador de tamaño aerodinámico es dado por la siguiente tabla:

**Tabla 11. Multiplicador de tamaño aerodinámico.**

$\varnothing < 2,5 \mu m$	$2,5 < \varnothing < 5 \mu m$	$5 < \varnothing < 10 \mu m$	$10 < \varnothing < 15 \mu m$	$15 < \varnothing < 30 \mu m$
0,095	0,20	0,36	0,50	0,80

El tenor de limo puede medirse a través del análisis granulométrico del material de la pista. En la tabla siguiente se muestran valores típicos en diferentes tipos de minas:

**Tabla 12. Valores típicos del tenor de limo en diferentes tipos de minas.**

Tipos de Actividades	Tenor de limo (%)
Canteras	14,1
Extracción de arenas	4,8
Minas de carbón:	
a) vías de transporte	8,4
b) área de explotación	17
Pista revestida con macadam	9,6

Conocer la cantidad de contaminantes emitidas por determinadas fuentes no es suficiente para evaluar la calidad del aire de una actividad. En este caso, importa saber las concentraciones de contaminantes en puntos de interés cercanos, por ejemplo áreas habitadas.

Trabajos experimentales indican que, en determinadas condiciones, los contaminantes a sotavento del punto de emisión se distribuyen en una curva normal perpendicularmente a la dirección de dispersión. Los modelos gaussianos pueden suministrar la concentración de contaminantes en diversos puntos en el espacio. Para una fuente puntual y una región llana, esa concentración es dada por:

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

donde:

- $C(x,y,z)$ : concentración en los puntos de coordenadas (x,y,z).
- $Q$ : tasa constante de emisión ( $\mu\text{g/s}$ ).
- $\sigma_y$ : coeficiente de dispersión horizontal (m).
- $\sigma_z$ : coeficiente de dispersión vertical (m).
- $u$ : velocidad constante del viento (m/s).
- $h$ : altura efectiva (m).



Los coeficientes de dispersión  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  dependen de la distancia a la fuente emisora y al grado de estabilidad de la atmósfera que a su vez es función de la velocidad del viento y la irradiación solar recibida.

En algunas situaciones, como en el caso de los caminos mineros, el problema de la contaminación se puede modelar como una fuente lineal, continua de emisión infinita. Cuando la dirección del viento es normal a la línea de emisión, la concentración a nivel del suelo en la dirección del viento está dada por:

$$C(x,0) = \frac{2Q}{(2\pi)^{1/2} \sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{h}{\sigma_z}\right)^2\right]$$

Donde Q es la fuerza de la línea por distancia unitaria. Cuando la dirección no sea perpendicular a la fuente lineal, se sugiere que la ecuación anterior se divida por  $(\sin \varphi)$  donde  $\varphi$  es el ángulo entre la fuente lineal y la dirección del viento. Esta corrección puede no ser usada cuando  $\varphi$  sea menor de 45 grados.

En el caso de partículas a causa de la gravedad, será necesario usar una corrección a la magnitud  $h$  en la ecuación de dispersión gaussiana para la deposición general del material particulado. La distancia de caída libre de una partícula con una velocidad terminal o de asentamiento  $V_t$  es simplemente  $V_t t$ ; donde  $t$  es el tiempo que le toma a la corriente principal del contaminante para alcanzar una distancia  $x$  en la dirección del viento. El tiempo  $t$  se expresa también por  $x/u$ . Por tanto, la distancia de caída libre que es necesario aplicar como corrección a  $H$  es  $V_t x/u$ . La concentración a nivel del suelo a lo largo de la línea central tiene un especial interés. Haciendo  $y=0$  y  $z=0$ , se encuentra que:

$$C(x,0,0,H) = \frac{Q_p}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{H - (V_t x/u)}{\sigma_z}\right]^2\right\}$$

Donde  $Q_p$  es la tasa de emisión de las partículas. Típicamente,  $Q_p$  se puede expresar en unidades tales como gramos por segundo, con  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  en metros y  $u$  en metros por segundo,  $Q_p$  se refiere a un tamaño específico de partícula con una velocidad terminal  $V_t$ .

## RESULTADOS.

En el área del yacimiento se llevó a cabo un muestreo del material de la superficie de la pista de los caminos principales y secundarios para ser sometidos al análisis granulométrico.

Las muestras del material de la superficie de la pista fueron homogeneizadas y cuarteadas (garantizando que estén representadas todas las fracciones granulométricas en la misma proporción en la muestra) y se hace  $n$  veces hasta que se obtenga un volumen de la muestra adecuado que pese alrededor de 25 g luego se pesa la muestra;

sometiéndose posteriormente a un tamizado húmedo a través de un tamiz de diámetro 0,0075 mm de luz (< 200 mallas, ASTM), esta pulpa se decanta cuidadosamente y se evapora por calentamiento y se determina gravimétricamente el porcentaje del tenor de limo. En la Tabla 13 se muestran los resultados obtenidos:

**Tabla 13. Valor del tenor de limo para las diferentes muestras**

Muestra N°	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Tenor de limo (%)
1	26,5	12,46	47,03
2	30,5	8,5	27,8
3	27,6	13,6	49,27
4	28,6	10,6	37,0
5	29,7	8,25	27,8
6	25,6	9,0	35,1
<b>Promedio</b>			<b>37,3</b>

El valor de 37,3 % de tenor de limo, el cual comparado con los valores reportados para otras actividades extractivas típicas, supera en más del doble estos valores, lo cual dada la dependencia directa del factor de emisión con el tenor de limo (s), será un elemento de peso en la contaminación por polvo dentro del yacimiento.

La estimación del factor de emisión debido al tiro de mineral y escombros en el área se realizó tomando como base de cálculo los datos técnicos de los equipos y operaciones previstas. Las velocidades calculadas según los datos técnicos de los equipos y características del relieve del camino arrojaron valores de 35 km/h con el vehículo vacío y 30 km/h con el vehículo lleno.

Sobre la base de estos datos considerando solamente la fracción respirable (< 10  $\mu$ m), se realizó el cálculo obteniéndose, ver Tabla 14, un factor de emisión promedio de 7,58 kg/km recorrido cuando los camiones están vacíos de 10,74 kg/km recorrido para la actividad de tiro de mineral y de 11,59 kg/km recorrido para el tiro de escombros.

**Tabla 14. Factores de emisión calculados.**

Equipo	Actividad	K	s (%)	S (km/h)	W(t)	w	p (días)	E (kg / km recorrido)
<b>Volvo BM A40 D</b>	vacío	0,36	37,3	35	25	6	40	7,58
	lleno (mineral)	0,36	37,3	30	55	6	40	10,74
	lleno (escombros)	0,36	37,3	30	61,34	6	40	11,59

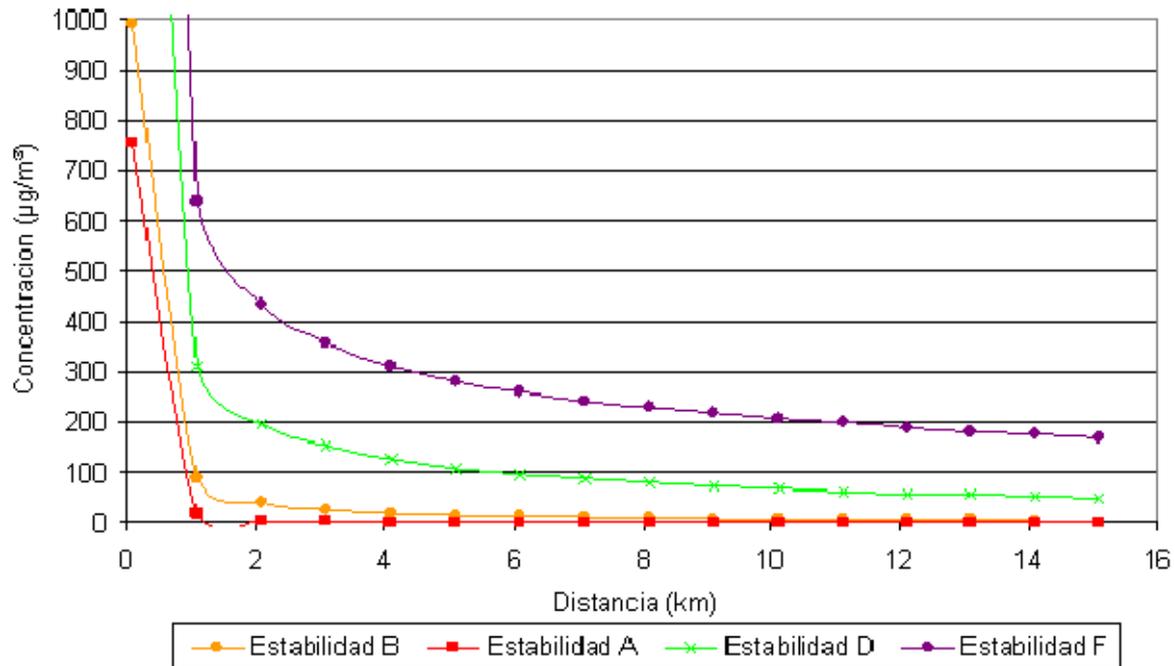


Teniendo en cuenta estos valores la estimación del factor de vehículos cuando van vacíos es menor que cuando van llenos tanto de mineral como de escombros. En estos resultados se nota que el elemento que más influye en la variación del factor de emisión son el peso y la velocidad del equipo.

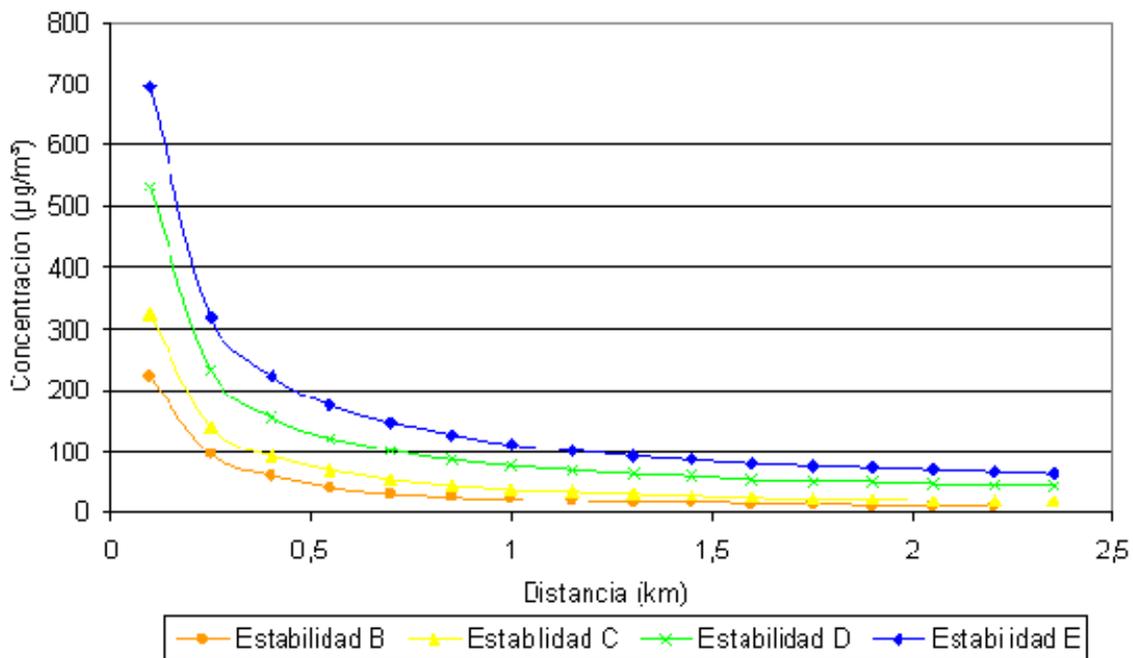
## **DISPERSIÓN DE POLVO EN LA ATMÓSFERA.**

Para la estimación de la dispersión del polvo en el aire, se utilizó un modelo gaussiano considerando el camino principal como una fuente lineal emisora continua, el valor promedio del factor de emisión para los equipos que extraen mineral del frente es  $10,26 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{vehículo}^{-1}$  considerando como promedio 3 camiones en funcionamiento, con una frecuencia de 4 viajes/h el cálculo arroja una fuerza de emisión de la línea unitaria de  $68,4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  para el camino principal. Los cálculos se realizaron con un programa en Microsoft Excel 6.0 confeccionado a tal efecto para fuentes lineales y material particulado.

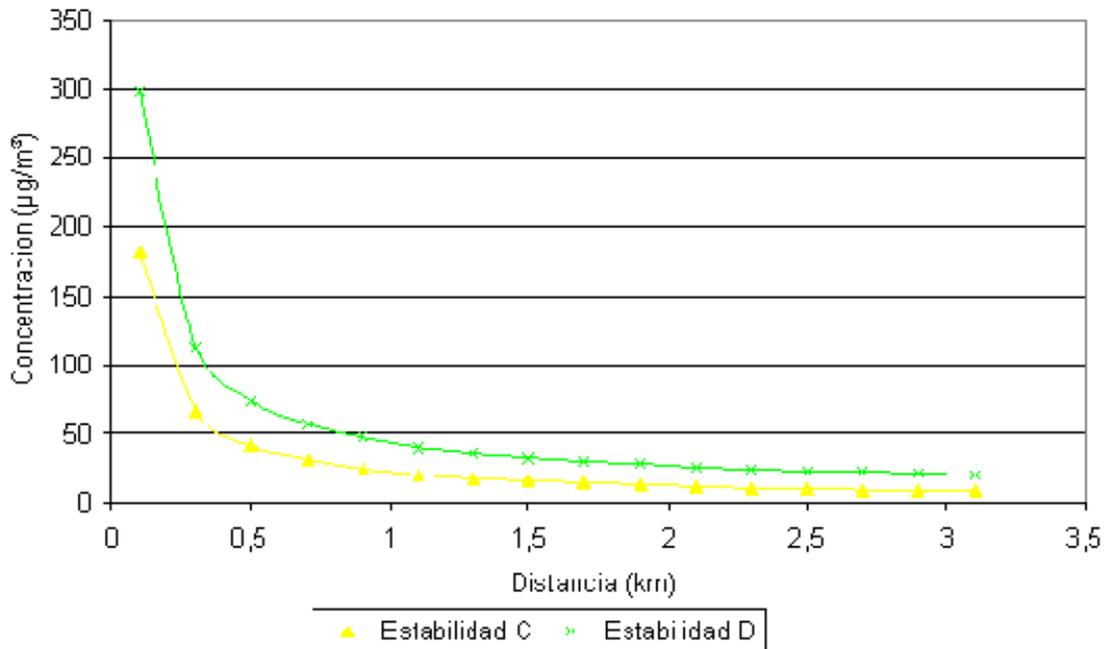
En las Figuras 16-18 se dan los gráficos de la concentración de polvo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), en función de la distancia al emisor, en dirección de la componente del viento perpendicular al camino y teniendo en cuenta las diferentes clases de estabilidad de la atmósfera (A-F) según la clasificación de Pasquill – Guilford. En ellas se aprecia que para la velocidad del viento predominante en la región de  $4,5 \text{ m/s}$ , habrá valores por encima de la CMA de  $0,1 \text{ mg}/\text{m}^3$  hasta distancias de  $1,2 \text{ km}$  para la clase de estabilidad D y E y para la B y C hasta de  $0,4 \text{ km}$ . Para las velocidades del viento inferiores se observa, como crítica, la de  $1 \text{ m/s}$  donde para las clases de estabilidad E y F se obtienen valores por encima de la CMA hasta distancias de más de  $6 \text{ km}$ , para las clases B y A hasta  $1 \text{ km}$ , en áreas aledañas  $< 1,5 \text{ km}$  el cuadro de contaminación será extraordinariamente severo pues se alcanzan concentraciones superiores a 10 veces la CMA. Para valores superiores de la velocidad del viento, como es  $8 \text{ m/s}$  se produce una difusión mejor en las áreas aledañas al yacimiento alcanzándose la CMA a distancias menores de  $0,5 \text{ km}$ .



**Figura 16. Concentración de Polvo en Suspensión (Velocidad del Viento 1m/s).**



**Figura 17. Concentración de Polvo en Suspensión (Velocidad del Viento 4,5 m/s)**



**Figura 18. Concentración de Polvo en Suspensión (Velocidad del Viento 8m/s)**

**CONCLUSIONES.**

1. En este estudio de caso se ratifica que por la importancia que tienen los trabajos relacionados con la dispersión de contaminantes en la atmósfera aplicados a los Estudios de Impacto Ambiental se debe continuar asimilando las características teóricas y prácticas de cada uno de los modelos más adecuados para su aplicación en base al objetivo requerido en cada estudio específico.
2. Se ratifica la utilidad metodológica de la Guía propuesta para realizar los estudios de dispersión local de contaminantes gaseosos y partículas.
3. Se toma como válida la recomendación de continuar trabajando en el marco del proyecto AECI las tareas de asimilación y de preparación y/o modificación de programas auxiliares, con el objetivo de valorar el posible uso del AERMOD para los estudios detallados a escala local
4. Dado que la principal dificultad para el uso del AERMOD es que necesita datos de aire superior y actualmente en Cuba no se realizan estas mediciones deberán desarrollarse metodologías aproximadas que permitan su uso.



## AGRADECIMIENTOS

A la Agencia Española de Cooperación y Desarrollo (AECID) la financiación parcial de este artículo (proyecto A/8114/07).

## BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

1. “Medidas sobre la Protección del Medio Ambiente” correspondiente a un área de  $12 \times 8 \approx 100 \text{ km}^2$  en la cual se encuentran ubicadas las fábricas “Las Camariocas” y “Punta Gorda”, así como los poblados de Moa y Punta Gorda respectivamente”. elaborado por el Instituto Estatal de la URSS para la proyección e Investigación Científica “GUIPRONIQUEL”.
2. Comité Estatal de Normalización, 1987: NC-93-02.202: Requisitos Higiénico sanitarios: Concentraciones máximas admisibles, alturas mínimas de expulsión y zonas de protección sanitaria.
3. Empresa de Proyectos para la Industria Básica, CECE, 1989: Obra: 1114 UPI Planta de Níquel las Camariocas, Objeto: 115.3 Estudio Chimenea de Sinterización, Proyecto: 500.0, Ingeniería Mecánica.
4. U.S. Environmental Protection Agency, 1995: Modeling Guideline. EPA 450/4-9-006. U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.
5. U.S. Environmental Protection Agency, 1995: SCREEN3 Model User’s Guide. EPA document EPA-454/B-95- 004. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.
6. U.S. Environmental Protection Agency, 1995: Screening Procedures for Estimating the Air Quality Impact of Stationary Sources, Revised. EPA-450/R-92-019. U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.
7. WORLD BANK GROUP, 1998: Pollution Prevention and Abatement Handbook.
8. Comité Estatal de Normalización, 1987: NC-93-02.202: Requisitos Higiénico sanitarios: Concentraciones máximas admisibles, alturas mínimas de expulsión y zonas de protección sanitaria.
9. U.S. Environmental Protection Agency, 1995: Modeling Guideline. EPA 450/4-9-006. U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.
10. Occupational Safety & Health Administration: Occupational Safety and Health Standards (TABLE Z-1 Limits for Air Contaminants)
11. Pierra, A., I. Casals y L. Montes de Oca (2004): Modelación de emisiones de partículas debidas al transporte de mineral en minas a cielo abierto. En [www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar17/HTML/articulo05.htm](http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar17/HTML/articulo05.htm)
12. Turtós L, Meneses R, Díaz Rivero N, Roque A, Álvarez L, Soltura, R. Cuesta, O. Collazo, A. Álvarez, O. Pire, S. Martín, S. Molina, E. Padrón, A. y Rabelo, L. (2004): Propuesta de Guía para realizar los estudios de dispersión local de contaminantes gaseosos y partículas. Informe Técnico, Cubaenergía, La Habana, Cuba.
13. Montes de Oca, L.\* Rodríguez, R., Pierra, A., Cuesta, O., Tricio, V. (2008). Planes de acción locales para mejorar la calidad del aire y estudios de impacto ambiental apoyados en modelos de dispersión atmosférica. CONAMA 9. Madrid. España