

Modelación de la dispersión de los contaminantes atmosféricos emitidos por Antillana de Acero

Modelling of the dispersion of air pollutants emitted by Antillana de Acero

Lic. Lázaro R. Batule Águila | lazaro.batule@insmet.cu | Centro de Contaminación y Química Atmosférica, Cuba

Dr. Osvaldo Cuesta Santos | cuesta@insmet.cu | Centro de Contaminación y Química Atmosférica, Cuba

Lic. Alejandro Adonis Herrera G. | alejandro.adonis@insmet.cu | Centro de Meteorología Marítima, Cuba

Recibido: 28 de enero, 2013; aceptado: 19 de marzo, 2013. pp. 94 – 105.

Resumen

Actualmente, la contaminación de la atmósfera es uno de los principales problemas ambientales que presenta la humanidad, y Cuba no está exenta de ello, lo cual se ratificó en la Estrategia Ambiental Nacional (CITMA, 2007). La presente investigación pretendió conocer cómo se dispersan los contaminantes atmosféricos emitidos por Antillana de Acero, en el municipio de El Cotorro. La hipótesis de la investigación supone que el mayor impacto negativo en la calidad del aire por la dispersión de los contaminantes atmosféricos emitidos por esta industria, ocurre dentro de los límites del municipio, para lo cual se aplicó el modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos DISPER 4 con la finalidad de caracterizar la distribución espacial de los contaminantes. Se realizó la modelación para los horarios correspondientes a las 7:00 a.m. y 4:00 p.m., en los que se emplearon los valores medios de las variables y los parámetros meteorológicos del período 2006–2010. Asimismo, se modeló un escenario crítico bajo condiciones meteorológicas desfavorables y se obtuvieron las mayores concentraciones. Los resultados de la modelación muestran que el material particulado es el contaminante principal que emite la chimenea de esta acería. El dióxido de azufre y el sulfuro de hidrógeno resultaron ser los principales contaminantes emitidos por las chimeneas de los hornos 250 y 300.

PALABRAS CLAVE: Modelo, modelo de dispersión, contaminantes atmosféricos, emisiones, modelación, dispersión atmosférica, Antillana de Acero.

Abstract:

Currently, the atmosphere pollution is one of the main environmental problems faced by humanity. In Cuba, the atmosphere pollution is also one of the major environmental problems, which was ratified in the National Environmental Strategy (CITMA, 2007). This research sought to know how to disperse the air pollutants emitted by the Antillana de Acero in the municipality Cotorro. The hypothesis of research assumed that the greatest negative impact on air quality due to the air pollutants dispersion emitted by this industry, takes place within the city limits. For that reason, we applied the air dispersion model as DISPER 4 in order to characterize the spatial distribution of pollutants. The model was running to 7:00 a.m. and 4:00 p.m., in which we used the average values for meteorological variables and parameters in the period 2006–2010. It was made a run for a critical scenario under unfavorable weather conditions obtaining the maximum concentration values. The modeling results show that particulate matter was the main pollutant emitted from steel foundry source. Sulfur dioxide and hydrogen sulfide were main pollutants emitted by 250 and 300 furnaces.

KEYWORDS: Model, dispersion model, atmospheric pollutants, emissions, modelation, atmospheric dispersion, Antillana de Acero.

Introducción

La degradación del medio ambiente se acelera a un ritmo constante dada la desmesurada explotación de los recursos naturales en el planeta. El ser humano, compulsado por las ansias de satisfacer sus necesidades, sin tener en cuenta la repercusión de sus acciones, ha incrementado a un ritmo desmedido uno de los principales problemas que atraviesa la humanidad hoy día: la *contaminación*.

La contaminación se divide en diferentes tipos, si se tiene en cuenta el medio sobre el cual influye. Uno de los tipos de contaminación que más afecta el equilibrio planetario y que provoca importantes daños a escalas local, regional y global es la contaminación atmosférica. Esta comenzó a intensificarse con la Revolución Industrial, en el siglo XVIII; posteriormente, la utilización del petróleo trajo consigo un incremento significativo del impacto del hombre sobre la atmósfera y, de manera general, sobre todos los componentes del medio natural.

En Cuba, la contaminación de la atmósfera constituye uno de los principales problemas medioambientales y quedó reflejado como tal en la Estrategia Ambiental Nacional. La existencia de este problema en el país se debe a diversas causas, entre las que se encuentran aspectos relacionados con la planificación territorial de los asentamientos humanos, la presencia de industrias, la utilización de tecnologías obsoletas en las actividades productivas y la existencia de otras fuentes contaminantes, como el transporte automotor (CITMA, 2007).

En el país existen importantes focos de contaminación declarados por la Red de Vigilancia de la Contaminación Atmosférica del Instituto de Meteorología; entre los principales se encuentran: Moa, Nuevitas,

Mariel y La Habana. La capital del país, La Habana, cuenta con algunas de las más importantes fuentes contaminantes de la isla, entre estas sobresalen las siguientes: la Refinería Níco López, el aeropuerto internacional, las termoeléctricas, el transporte automotor y Antillana de Acero. (Cuesta, O. *et al.*, 2009)

Por tanto, el objetivo de la presente investigación es caracterizar la dispersión de los contaminantes atmosféricos emitidos por Antillana de Acero, en el municipio de El Cotorro. Este trabajo tiene gran importancia dado que permitirá conocer el grado de afectación que provoca la industria sobre el territorio, específicamente en relación con la contaminación de la atmósfera y su influencia en la calidad del aire. Además, constituirá un elemento importante que ha de tenerse en cuenta por las autoridades pertinentes en la planificación y el ordenamiento territorial del municipio.

Materiales y métodos

Se visitó Antillana de Acero para obtener los datos técnicos de esta industria, los cuales fueron brindados por el responsable de Medio Ambiente de esta entidad. A partir del recorrido por la industria se determinaron las principales fuentes de emisión con las que cuenta la fábrica, que resultaron ser tres chimeneas: una correspondiente a la acería y las otras dos pertenecientes a los hornos de recalentamiento o metódicos, localizadas en los laminadores 250 y 300.

Después de realizar un análisis sobre las tres fuentes de emisión se concluyó que la chimenea de la acería es el principal emisor de la industria, puesto que la fusión en el horno de arco eléctrico es la etapa del proceso donde las emisiones son más importantes. Las emisiones de las otras chimeneas resultan despreciables en comparación con la anterior, debido a las características del proceso de recalentamiento y transformación de las barras de acero.

El responsable de Medio Ambiente de la industria brindó los datos técnicos correspondientes a las

fuentes de emisión estudiadas, estos fueron los siguientes: la altura, los diámetros exterior e interior; asimismo, ofreció información relacionada con los gases y partículas que emiten las chimeneas de Antillana: velocidad de salida de los contaminantes y su temperatura en el punto de salida.

Por medio de las normas internacionales de emisiones de contaminantes, para el tipo de proceso industrial que desarrolla Antillana de Acero, se conocieron los contaminantes que emiten las chimeneas en cada uno de los pasos del flujo productivo.

La chimenea de la acería emite: material particulado (MP), dióxido de nitrógeno (NO₂), monóxido de carbono (CO), cobre (Cu), plomo (Pb), zinc (Zn), cromo (Cr), cadmio (Cd), mercurio (Hg), níquel (Ni), arsénico (As) y compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVDM). Por su parte, las chimeneas de los laminadores emiten: dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), monóxido de carbono (CO) y sulfuro de hidrógeno (H₂S).

Para la posterior aplicación del modelo de dispersión se calculó la emisión de los gases y partículas emitidos por las fuentes; el valor de la emisión, para los metales pesados y el material particulado, se determinó siguiendo la metodología aplicada en el País Vasco (gobierno Vasco, 2007).

En primer lugar, se asumió lo siguiente:

1. No se dispone de analítica de polvo de acería.
2. No se dispone de mediciones de emisión de metales pesados.

Como no funciona la depuradora de gases y dada la no existencia de filtros en el proceso de emisión, se asumió una retención de filtro de mangas de 1 %. La ecuación que se aplicó en el caso de los metales pesados es la siguiente:

$$Empesados = Z + (Z + I \times Z) \times (1 - Q) / Q \quad | \quad (1)$$

Donde: Empesados es la emisión de los metales pesados (g/s); $Z = H/5 \times L$ (Z está referido a una eficacia de depuración del filtro de mangas de 1 %); L es la cantidad de acero líquido anual (t/año), Q es la captación total (0/1) y H es el factor de emisión (kg MP/t acero líquido).

Para el material particulado se aplicó la expresión siguiente:

$$Emp = (N/0.1 \times 0.076) \times (1 - Q)Q \quad | \quad (2)$$

Donde: EMP es la emisión del material particulado (g/s); N es el polvo recogido en filtro de mangas (kg PM10/año) y Q es la captación total (0/1).

En el caso de la determinación de la emisión de los principales gases contaminantes emitidos por la industria, se empleó el software Decision Support System for Industrial Pollution Control del Banco Mundial (Sebastian I., Lvosky K. y Koning H, 1995), a partir de la ecuación:

$$E = A \times FE \quad | \quad (3)$$

Donde: E: el valor de la emisión (unidad de masa por unidad de tiempo), A es la variable de actividad (unidad de producción por unidad de tiempo), FE es el factor de emisión (unidad de masa por unidad de producción).

Finalmente, se procedió a convertir el valor de la emisión a g/s a partir de los valores de emisión obtenidos (en kg/año) mediante la expresión (3).

Para determinar la emisión del SO₂ se aplicó un método de estimación basado en el consumo de combustible. Se tuvo en cuenta el consumo en cada uno de los laminadores, puesto que el laminador 250 consume 100 kg de combustible por cada tonelada de acero producido, mientras que el laminador 300 emplea 35 kg para producir cada tonelada de acero. El consumo anual de Antillana de Acero fue, en 2010, de 10 982,81 t, se tuvo en cuenta en el combustible 6 % de azufre.

Finalmente, se aplicó la ecuación siguiente:

$$Emis.de S = Cons \left[\frac{kg\ comb}{h} \right] * \%S \left[\frac{S}{100kg\ comb} \right]$$

Donde: *Emis. de S* es la emisión de azufre; *Cons* es el consumo; *Kg comb* es la cantidad de combustible (*kg*); *h* es la hora y *%S* es el porcentaje de azufre en el combustible

Los valores de las emisiones de los contaminantes emitidos por los laminadores 250 y 300 se calcularon tomando como referencia la compilación de factores de emisión AP-42 (USEPA, 1995).

Luego de tener recopilada la información de la fuente de emisión se pasó a la obtención de los datos meteorológicos del territorio; en este sentido, la información sobre el comportamiento de las variables meteorológicas se obtuvo de la estación meteorológica de Tapaste, y con esta se calcularon el parámetro de estabilidad atmosférica y la altura de la capa de mezcla. El cálculo de la estabilidad atmosférica se realizó mediante el método de Turner (1964).

Las diferentes categorías de estabilidad atmosférica y altura de capa de mezcla que se emplearon en el trabajo fueron los siguientes:

—*— A	Muy inestable (1 600 m)
—■— B	Inestable (1 200 m)
— — C	Ligeramente inestable (800 m)
—▲— D	Neutra (560 m)
—■— E	Ligera estabilidad (320 m)
—◆— F	Estable (200 m)

Para aplicar este método se utilizó el Sistema Automatizado de Gestión de Información de Fuentes Contaminantes (Rodríguez, 2007), el cual tiene implementado el método de Turner y las ecuaciones que obtienen la posición del Sol (altura sobre el horizonte) en cualquier momento del día y para cualquier época del año, además de tener también implementado el método de Pasquill (1961). Este último se aplicó con miras a obte-

ner la altura de la capa de mezcla atmosférica, lo que se hizo en conjunción con las estabilidades determinadas mediante el método de Turner (Rodríguez, *et al.*, 2008).

Los datos meteorológicos empleados en la aplicación del modelo de dispersión de contaminantes corresponden al período 2006–2010; no se empleó información meteorológica de más años, a pesar de que se contaba con esta, debido a que estos estudios no requieren de un análisis climático tan profundo y a la complejidad del cálculo en la determinación de las variables necesarias en la modelación. La dirección del viento predominante se halló mediante un análisis vectorial con la elaboración de las rosas de vientos.

Con posterioridad, se utilizó una imagen satelital del GoogleEarth (versión 5.0) correspondiente al municipio de El Cotorro, en la cual se digitalizaron los límites del municipio y la localización exacta de las fuentes emisoras con vistas a facilitar su interpretación. Posteriormente, sobre la imagen georreferenciada se superpusieron las concentraciones de los contaminantes atmosféricos estudiados.

Con la información de las fuentes de emisión y los datos meteorológicos se aplicó el modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos Disper (versión 4.0). Con este software se realizó una georreferenciación del área de estudio y, posteriormente, se comenzó a introducir la información técnica de la fuente de emisión, así como los datos del comportamiento de las variables meteorológicas. Se aplicó este modelo en los horarios correspondientes a las 7:00 a.m. y 4:00 p.m., puesto que las condiciones meteorológicas difieren para esos momentos del día.

Asimismo, se realizó una modelación para condiciones meteorológicas con el objetivo de considerar un escenario crítico. Es importante precisar que se entiende como escenario crítico la ocurrencia de condiciones meteorológicas desfavorables para la dispersión de contaminantes en la atmósfera; en estas condiciones, se alcanzan las mayores concentraciones de contaminantes en superficie. Las condicio-

nes meteorológicas asumidas en este trabajo para el un escenario crítico fueron las siguientes: atmósfera muy estable (6), altura de la capa de mezcla de 200 m y velocidad del viento inferior a 1 m/s.

Posteriormente, se exportaron en coordenadas cartesianas los valores de concentración en superficie de los principales contaminantes para su manejo en un sistema de información geográfica (SIG). Por último, se realizó en el SIG ARGIS 10.0, una interpolación mediante el método Kriging, con el objetivo de representar la dispersión de contaminantes en la imagen mencionada.

En los resultados de las modelaciones se tuvieron en cuenta los criterios que establecen las Normas Cubanas de la Calidad del Aire en relación con las concentraciones máximas admisibles *Cma* para los contaminantes atmosféricos emitidos durante el proceso productivo de Antillana de Acero.

TABLA 1
Concentración máxima admisible de los principales contaminantes emitidos por Antillana de Acero en función de las normas cubanas

Contaminantes atmosféricos	Concentración máxima admisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) instantáneas	Concentración máxima admisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) diaria
Dióxido de nitrógeno (NO_2)	85	40
Material Particulado (MP)	200	50
Monóxido de carbono (CO)	5 000	3 000
Dióxido de azufre (SO_2)	500	50
Sulfuro de hidrógeno (H_2S)	8	8
Plomo (Pb)	-	0,3
Zinc (Zn)	-	50
Mercurio (Hg)	-	0,3
Cobre (Cu)	-	2
Níquel (Ni)	-	1
Arsénico (As)	-	3
Cromo (Cr)	-	1,5

Resultados y discusión

Características técnicas de las fuentes de emisión y variables meteorológicas empleadas en la modelación

La tabla 2 presenta la información técnica de las tres chimeneas que se empleó en la modelación y la posición geográfica de estas, en coordenadas cartesianas

TABLA 2
Características técnicas de las fuentes de emisión

	Chimeneas		
	Acería	Lam. 250	Lam. 300
H (m)	100	50	30
V/S (m/s)	3,4	1,6	1,6
T (K)	353,15	1273,15	473,15
D (m)	4,38	1,2	1,2
mE	368 755,4139	369 482,9972	369 597,1669
mN	357 239,3120	356 475,1620	356 913,4963

Nota: H es la altura de la chimenea; V/S es la velocidad de salida de los contaminantes; T es la temperatura del gas en el punto de salida; D es el diámetro del orificio de salida; mN son los metros norte y mE son los metros este.

Con miras a obtener los resultados de la dispersión más acordes con la realidad, se utilizaron diferentes variables meteorológicas en la aplicación de los modelos de dispersión de contaminantes. Las variables empleadas fueron las siguientes: la velocidad del viento *VV*, la temperatura del aire *T*, la estabilidad atmosférica *Ea*, la altura de la capa de mezcla *Acm* y la dirección del viento *DD*. La tabla 3 expone los valores de las variables meteorológicas empleadas en la modelación.

Resultados de la ejecución del modelo de dispersión a las 7:00 a.m.

La figura 1 presenta el patrón de la dispersión de los contaminantes emitidos por la chimenea de la acería, el cual ha sido elaborado a partir de la ejecución del modelo Disper 4.

El penacho se extiende al oeste de la fuente de emisión, condicionado por la dirección del viento predominante en este horario; se observa un incremento gradual de la concentración en superficie, hasta alcanzar su máximo valor en 357 306,66 mN y 367 644,14 mE.

La concentración de los contaminantes en superficie alcanza su máximo valor a 1 113,31 m de la fuente de emisión; al oeste del punto de máxima concentración comienzan a disminuir progresivamente las concentraciones en superficie. En el mapa se aprecia que las concentraciones más altas permanecen dentro de los límites del municipio de El Cotorro; por tanto, los mayores impactos negativos en la calidad del aire durante este escenario estarán reflejados dentro de las fronteras municipales.

La tabla 4 muestra los valores máximos de concentración alcanzados por los contaminantes estudiados.

En la tabla, el contaminante sombreado es el que superó las concentraciones máximas admisibles *Cma* para 1 h establecidas en las Normas Cubanas de Calidad del Aire NC 111:2004 y NC 39:1999. El MP supera la concentración máxima admisible *Cma* establecida en 1,118 veces.

La figura 2 presenta el patrón de dispersión de los contaminantes emitidos por las chimeneas de los laminadores 250 y 300. La concentración máxima de las emisiones del laminador 250 se sitúa en 356 489,51 mN y 369 081,14 mE, exactamente a 402 m de la fuente emisora; en el laminador 300, en 356 929,23 mN y 369 328,49 mE, a 269,13 m de la fuente.

La tabla 5 recogen los valores de las concentraciones máximas para cada contaminante.

Las concentraciones del SO₂ y H₂S superan, en ambos casos, los valores de *Cma* reflejados en las Normas Cubanas de Calidad del Aire. La emisión de SO₂ en el laminador 250 rebasa la *Cma* en 1,12 veces, y la del laminador 300 en 2,05 veces. Por su parte, el H₂S emitido por el laminador 250 excede la cifra de *Cma* establecida en 37,28 veces, mientras que para el emitido por el laminador 300, en 67,99 veces.

TABLA 5

Valores de concentración máxima para los contaminantes emitidos por los laminadores 250 y 300, a las 7:00 am

Contaminantes	Laminador 250 (µg/m ³)	Laminador 300 (µg/m ³)
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	27,06	49,58
Monóxido de carbono (CO)	2,96	5,22
Dióxido de azufre (SO ₂)	561,22	1024,46
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	298,28	543,93

TABLA 3

Valores medios de las variables meteorológicas empleados en la modelación para los distintos escenarios

Escenario	VV (m/s)	T (K)	Ea	Acm (m)	DD (°)
7am	0,74	293,87	3	800	270
4pm	2,89	300,05	2	1200	225
Escenario crítico	0,29	295,65	6	200	270

TABLA 4

Valores máximos de concentración alcanzados en el escenario de las 7:00 a. m. (chimenea de la acería)

Contaminantes atmosféricos	Valor máximo de concentración (µg/m ³)
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	2,64
Material particulado (MP)	223,77
Monóxido de carbono (CO)	160,55
Compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVDM)	0,37
Plomo (Pb)	34,90
Zinc (Zn)	124,18
Mercurio (Hg)	0,14
Cobre (Cu)	1,99
Níquel (Ni)	0,25
Cadmio (Cd)	0,62
Arsénico (As)	0,25
Cromo (Cr)	0,75

Resultados de la ejecución

del modelo de dispersión a las 4:00 p.m.

La figura 3 presenta el patrón de la dispersión de los contaminantes emitidos por la chimenea de la acería. La máxima concentración se alcanza en 356 974,38 mN y 368 464,34 mE, a una distancia de 393 m de la

fuente de emisión. Este patrón evidencia que 100 % de los contaminantes emitidos se quedan dentro de los límites de El Cotorro, pero, al igual que en el caso anterior, no ejercen un impacto directo sobre la población, puesto que la dirección del viento es contraria al núcleo urbano.

La tabla 6 refleja los valores de las concentraciones máximas.

En este caso, al igual que a las 7:00 am, el MP supera los valores de *Cma* reflejados en la Normas Cubanas de la Calidad del Aire NC 111:2004 y NC 39:1999.

La figura 4 muestra el patrón de dispersión de las chimeneas de los laminadores 250 y 300. El punto de concentración máxima de la emisión del laminador 250 se localiza a 356 370,62 mN y 369 350 mE, exactamente a 168,66 m de la fuente de emisión; este punto, en el caso de la emisión del laminador 300, se localiza en 356 845,41 mN y 369 515,47 mE, a una distancia de 106 m de la fuente emisora.

Como puede apreciarse en la figura 4, los contaminantes emitidos por el laminador 300 permanecen casi dentro de la industria, a causa de, fundamentalmente, la poca altura que tiene la chimenea.

La tabla 7 recoge los valores de las concentraciones máximas de los contaminantes emitidos:

El dióxido de azufre emitido por la chimenea del laminador 300 supera en 1,60 veces los valores de *Cma* establecidos en las normas vigentes. A pesar de que los dos laminadores desarrollan el mismo proceso, bajo las mismas condiciones meteorológicas, las concentraciones originadas por la emisión del laminador 300 superan las del laminador 250 dada la diferencia que existe en las alturas de sus chimeneas. Asimismo, el H₂S supera las cifras para *Cma*; la emisión del laminador 250 rebasa en 26,98 veces los valores establecidos en las normas, mientras que el laminador 300 lo supera en 53,58 veces.

Como se ha explicado se realizó una modelación en la cual se tuvo en cuenta la dirección sur del viento, puesto que, en este caso, la dispersión de los con-

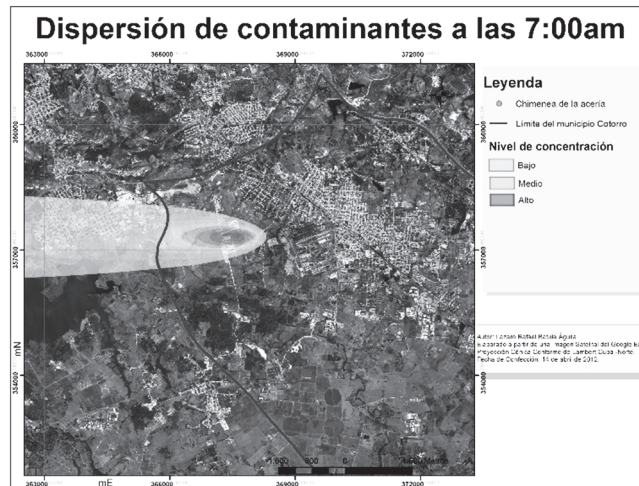


Fig. 1 Patrón de dispersión de los contaminantes emitidos por la chimenea de la acería a las 7:00 a. m.



Fig. 2 Patrón de dispersión de los contaminantes emitidos por la chimenea del laminador 250 a las 7:00 a. m.

Dispersión de contaminantes a las 4:00pm

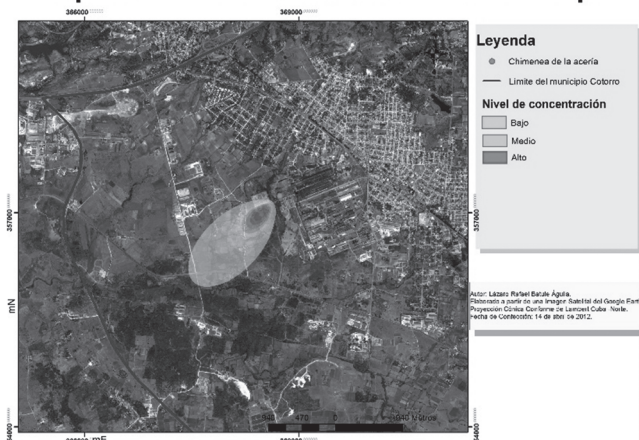


Fig. 3 Patrón de dispersión de los contaminantes emitidos por la chimenea de la acería a las 4:00 p.m.

Laminador 250



Laminador 300



Fig. 4 Patrón de dispersión de los contaminantes emitidos por las chimeneas de los laminadores 250 y 300 a las 4:00 p.m.

taminantes se sitúa sobre el sector más occidental del poblado de El Cotorro y, por ende, la afectación sobre la población residente es mayor.

La figura 5 muestra el patrón de dispersión de los contaminantes emitidos por la acería.

La máxima concentración en este escenario se alcanza en 357 655,85 mN y 368 740,04 mE a 416 m de la fuente de emisión. Los valores máximos de concentración alcanzados por los contaminantes emitidos se muestran en la tabla 8.

Como se observa, el MP supera en 1,21 veces los valores de *Cma* reflejados en las normas NC 111:2004 y NC 39:1999.

La figura 6 muestra la representación cartográfica de las modelaciones pertenecientes a los laminadores 250 y 300 a las 4:00 p.m., con viento de dirección sur.

La dispersión, en este caso, revela un elemento interesante, puesto que los contaminantes emitidos por ambas chimeneas permanecen dentro de los límites de la propia industria. La concentración máxima de los contaminantes emitidos por el laminador 250 se localiza en este escenario en 356 667,69 mN y 369 466,89 mE, a una distancia de 193,20 m de la fuente de emisión; los emitidos por el laminador 300 se localizan en 357 024,84 mN y 369 591,90 mE, a 111,47 m de la chimenea.

Dispersión de contaminantes a las 4:00pm

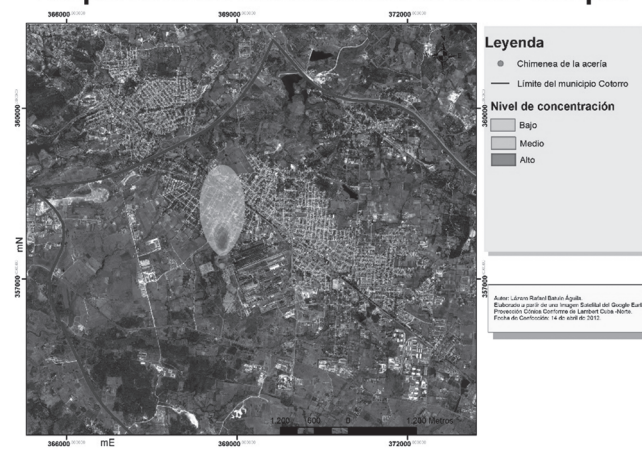


Fig. 5 Patrón de dispersión de los contaminantes emitidos por la chimenea de la acería a las 4:00 p.m. con viento de dirección sur.

TABLA 6

Valores máximos de concentración alcanzados en el escenario de las 4:00 p.m. (chimenea de la acería)

Contaminantes atmosféricos	Valor máximo de concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Dióxido de nitrógeno (NO_2)	2,90
Material Particulado (MP)	246,01
Monóxido de carbono (CO)	176,50
Compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVDM)	0,40
Plomo (Pb)	38,22
Zinc (Zn)	137,06
Mercurio (Hg)	0,15
Cobre (Cu)	2,19
Níquel (Ni)	0,27
Cadmio (Cd)	0,68
Arsénico (As)	0,27
Cromo (Cr)	0,82

TABLA 7

Valores de concentración máxima para los contaminantes emitidos por los laminadores 250 y 300 a las 4:00 p.m.

Contaminantes	Laminador 250 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Laminador 300 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Dióxido de nitrógeno (NO_2)	19,74	39,07
Monóxido de carbono (CO)	2,15	4,13
Dióxido de azufre (SO_2)	407,73	804,23
Sulfuro de hidrógeno (H_2S)	215,85	428,69

TABLA 8

Valores máximos de concentración alcanzados en el escenario de las 4:00 p.m. con viento de dirección sur (chimenea de la acería)

Contaminantes atmosféricos	Valor máximo de concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Dióxido de nitrógeno (NO_2)	2,89
Material particulado (MP)	243,69
Monóxido de carbono (CO)	175,86
Compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVDM)	0,40
Plomo (Pb)	38,23
Zinc (Zn)	136,56
Mercurio (Hg)	0,15
Cobre (Cu)	2,19
Níquel (Ni)	0,27
Cadmio (Cd)	0,68
Arsénico (As)	0,27
Cromo (Cr)	0,83

Fuente: Elaborado por el autor a partir de los resultados obtenidos.

El comportamiento de las concentraciones máximas de los contaminantes revela que el SO_2 emitido por el laminador 300 supera en 1,61 veces los valores de *Cma* establecidos en las normas cubanas. Al igual que en los escenarios anteriores, el H_2S rebasa las cifras para *Cma*; en el caso de la emisión del laminador 250, en 27,17 veces, mientras que para la chimenea del laminador 300, en 53,55 veces.

La tabla 9 expone las concentraciones alcanzadas en este escenario.

Resultados de la ejecución del modelo de dispersión en el escenario crítico

El patrón de dispersión de los contaminantes emitidos por la chimenea de la acería bajo condiciones críticas de dispersión se presenta en la figura 7. La concentración máxima se localiza, en este caso, en 357 322,77 mN y 364 055,56 mE, a una distancia de 4 700,59 m de la fuente de emisión. Como se aprecia en la figura, las mayores concentraciones en este escenario vinculadas con la emisión de la chimenea de la acería, se sitúan fuera de los límites del municipio de El Cotorro.

La tabla 10 presenta las concentraciones máximas alcanzadas por los contaminantes emitidos.

El MP supera en 4,59 veces los valores de *Cma* para 1 h reflejados en las Normas Cubanas de Calidad del Aire NC 111:2004 y NC 39:1999.

En el patrón de dispersión de los contaminantes emitidos por las chimeneas de los laminadores en el escenario crítico se evidencia que las máximas con-

TABLA 9

Valores de concentración máxima para los contaminantes emitidos por los laminadores 250 y 300 a las 4:00 p.m., con viento de dirección sur

Contaminantes	Laminador 250 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Laminador 300 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Dióxido de nitrógeno (NO_2)	19,80	39,05
Monóxido de carbono (CO)	2,16	4,13
Dióxido de azufre (SO_2)	409,01	806,87
Sulfuro de hidrógeno (H_2S)	217,38	428,41

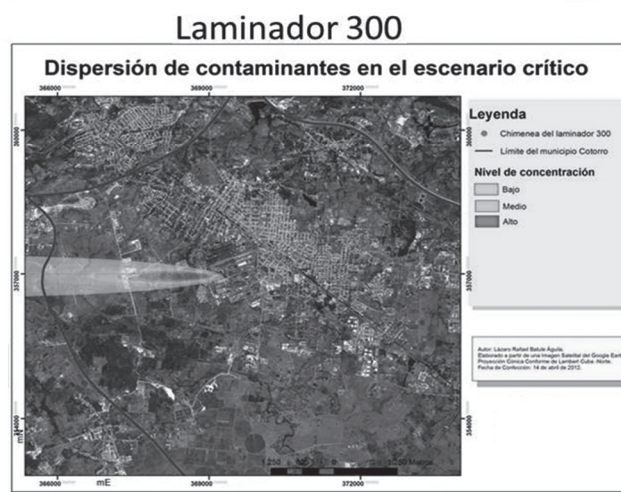
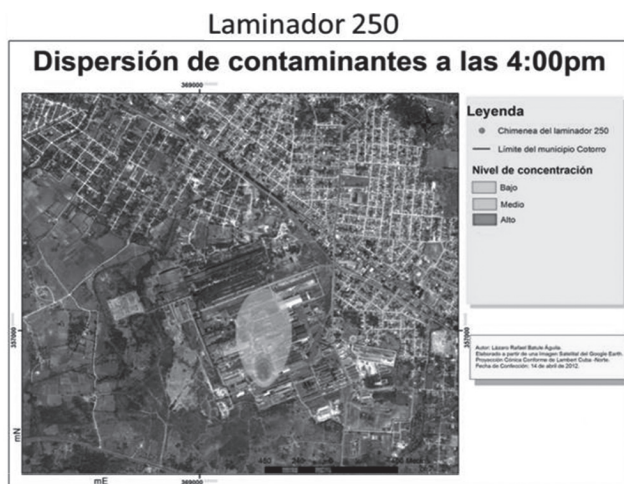


Fig. 6 Patrón de dispersión de los contaminantes emitidos por las chimeneas de los laminadores 250 y 300 a las 4:00 p. m., con viento de dirección sur.

Fig. 8 Patrón de dispersión de los contaminantes emitidos por las chimeneas de los laminadores 250 y 300 en el escenario crítico.



Fig. 7 Patrón de dispersión de los contaminantes emitidos por la chimenea de la acería en el escenario crítico.

centraciones quedan delimitadas dentro del límite municipal.

Las concentraciones máximas de las emisiones del laminador 250 se localizan en 356 549,83 mN y 367 932,48 mE a 1 552,30 m de la fuente emisora; y las del laminador 300, en 356 948,63 mN y 368 671,10 mE, a 926 m de la fuente emisora. La tabla 11 expone las concentraciones máximas alcanzadas por los contaminantes emitidos.

Al igual que en el escenario de las 7:00 a.m., las concentraciones de SO_2 de ambos laminadores supera los valores de C_{ma} para 1 h reflejados en las normas cubanas: el SO_2 emitido por el laminador 250, en 1,58 veces, mientras que el emitido por el laminador 300

TABLA 10

Valores máximos de concentración alcanzados en el escenario crítico (chimenea de la acería)

Contaminantes atmosféricos	Valor máximo de concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Dióxido de nitrógeno (NO_2)	10,83
Material particulado (MP)	918,14
Monóxido de carbono (CO)	685,73
Compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVDM)	1,51
Plomo (Pb)	143,20
Zinc (Zn)	511,54
Mercurio (Hg)	0,56
Cobre (Cu)	8,17
Níquel (Ni)	1,02
Cadmio (Cd)	2,56
Arsénico (As)	1,02
Cromo (Cr)	3,11

TABLA 11

Valores de concentración máxima para los contaminantes emitidos por los laminadores 250 y 300 en el escenario crítico

Contaminantes	Laminador 250 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Laminador 300 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Dióxido de nitrógeno (NO_2)	38,38	62,7
Monóxido de carbono (CO)	4,18	6,66
Dióxido de azufre (SO_2)	792,89	1300,65
Sulfuro de hidrógeno (H_2S)	421,41	690,57

en 2,60 veces. Asimismo, el H_2S emitido por los laminadores 250 y 300 supera los valores de Cma reflejados en las normas cubanas en 52,68 veces y 86,32 veces, respectivamente.

Conclusiones

1. La dispersión de los contaminantes atmosféricos emitidos por Antillana de Acero a las 7:00 a.m. ocurre al oeste de las fuentes emisoras, y estos se trasladan a una distancia máxima de 1 113,31 m.
2. En el escenario de las 4:00 p.m., con el viento de dirección sur, se afecta directamente la población de El Cotorro, en especial, el sector noroccidental del núcleo urbano.
3. Los resultados de la aplicación del modelo muestran que el material particulado es el principal contami-

nante que emite la chimenea de la acería y, en todos los escenarios, supera la concentración máxima admisible.

4. El dióxido de azufre y el sulfuro de hidrógeno son los principales contaminantes emitidos por las chimeneas de los laminadores 250 y 300, puesto que, en todos los escenarios modelados, superan las concentraciones máximas admisibles.

Referencias

- CITMA 2007, *Estrategia Ambiental Nacional*, La Habana, Cuba.
- Cuesta, O. Sánchez, P, López, C, Pérez R, Marín, M, Biart, R y Villarroel, J 2009, *Estado de la Contaminación Atmosférica en Cuba*. En Geocuba. Evaluación del medio ambiente cubano. ISBN 978-959-300-002-4, La Habana. Cuba.
- Gobierno Vasco 2007, *Guía técnica para la Medición, Estimación y Cálculo de las emisiones al aire*, consultado: 27 de mayo 2010, http://www.euskadi.net/r33-2288/es/contenidos/manual/eptr/es_guia/adjuntos/acero.pdf.
- NC: 39 1999, *Requisitos higiénico-sanitarios*. CITMA-INN-MEP, La Habana, Cuba.
- NC: 111 2004, *Calidad del Aire*. Reglas para la vigilancia de la calidad del aire en asentamientos humanos. La Habana, Cuba.
- Pasquill, F 1961, *The estimation of the dispersion of wind-borne material*. *Meteorological Magazine*, p. 90. USA.
- Rodríguez, D 2007, *Sistema Automatizado de Gestión de Información de Fuentes Contaminantes (SAGIFC)*, Tesis de Maestría en Nuevas Tecnologías para la Educación. Universidad de Pinar del Río, Cuba.
- Rodríguez, D, Echeverría, L, Sánchez A, Cuesta, O 2008, *Estudio de las variables meteorológicas secundarias que intervienen en la difusión de contaminantes atmosféricos*. Estudio de caso Pinar del Río. Universidad de Pinar del Río.
- Sebastian I, Lvosky K y Koning H 1995, *Decision Sup-*

port System for Industrial Pollution Control. Environmental Department World Bank Group, USA.

Turner, D.B 1964, *A difusión model for an urbana area*, J. Appl. Meteor., vol. 3, pp. 83-91, USA.

USEPA 1995, *Compilation of Air Pollutant Emission Factors*, AP-42, Office of Air Quality Planning and Standars, Research Triangle Park NC. USA.