



REVISTA CIENTÍFICA TRIMESTAL DE CUBASOLAR

**REVISTA CIENTÍFICA de las
FUENTES RENOVABLES de ENERGÍA**

23



Etapa preliminar del secado solar del carbón mineral a la intemperie en el Centro de Investigaciones Siderúrgicas.....	1
Control de las emisiones para el transporte automotor.....	8
Implementación de un SIG para el mejoramiento del sistema de vigilancia ambiental y los pronósticos de la contaminación atmosférica.....	18
Utilización de un sistema de información geográfica para realizar los estudios de impacto ambiental en la Empresa Eléctrica Provincial de Santiago de Cuba.....	26
Contaminación atmosférica resultante del proceso productivo en el Centro de Investigaciones Siderúrgicas.....	33
Modelación de la dispersión de contaminantes atmosféricos emitidos por el tráfico vehicular en una vía de Ciudad de La Habana.....	51

Etapa preliminar del secado solar del carbón mineral a la intemperie en el Centro de Investigaciones Siderúrgicas

Preliminary stage of solar drying of coal exposed to wind and weather at the Center of Siderurgy Research

*Por Ing. Andrey Leyva Mormul, Ing. Ariel Díaz Castillo,
Inv. Aux. Oscar Sinecio Leyva González e Ing. José Anival Trotman Gavilán
Centro de Investigaciones Siderúrgicas (CIS).
Dique Norte, La Pasa s/n, Nicaro, Mayarí, Holguín, Cuba.
Tel.: (53 24) 516396 y 516827.
e-mail: andrey@dsit.cu*

Resumen

En el trabajo se exponen los resultados alcanzados por el Centro de Investigaciones Siderúrgicas (CIS) después de implementar el secado solar del carbón a la intemperie, previo al secado convencional en el horno de cilindro o tambor rotatorio. Esto ha llevado a un aumento de la eficiencia de secado en el proceso productivo, y conlleva paralelamente una disminución del volumen de los gases productos de la combustión, máximos propulsores del efecto invernadero, las lluvias ácidas y la desertificación de los suelos. A partir de la valoración cuantitativa, se puede afirmar que se logró bajar el contenido de humedad (W) del carbón que se debe secar, con la previa aplicación del secado solar, de 13 a 8%, aproximadamente, además de minimizar el consumo de combustible por tonelada de carbón secado, de 40 a 19-22 L, y aumentar la productividad del horno de 0,5 a 1,3 t/h.

Palabras clave: Secado solar a la intemperie, carbón mineral

Abstract

The paper depicts the results attained at the Center of Siderurgy Research (CIS, in Spanish) after implementing the solar drying of coal exposed to wind and weather, previous to the conventional drying in the cylinder oven or rotatory drum. This has led to an increase in the drying efficiency in the production process, and in parallel to a decrease of the volume of the combustion gases, drivers of greenhouse effect, acid rains and soil desertification. From the quantitative assessment, it can be assured that with the application of the solar drying it was achieved a decrease in the humidity content (W) of the coal, from 13 to 8 %, approximately, in addition to minimize the fuel consumption per ton of coal dried, from 40 to 19-22 L, and increasing the productivity of the oven from 0.5 to 1.3 t/h.

Keywords: Solar drying exposed to wind and weather, coal

Introducción
La educación energética contribuye no sólo a un mejor y más eficiente aprovechamiento de los combustibles fósiles con que cuenta la humanidad, sino, además, constituye una garantía en la transición hacia una economía energética sostenible que descansa en la energía solar disponible [Retirado, *et al.*, 2007].

El Centro de Investigaciones Siderúrgicas se encuentra en proceso de Perfeccionamiento Empresarial. Para poder facilitar este proceso se trabaja en proyectos de desarrollo, innovación y gestión tecnológica, sobre la base de una mayor integración de las fuerzas técnicas, con el incremento de la masividad y el rigor de actuación, coadyuvando así al cumplimiento exitoso de las tareas de la Batalla de Ideas y demás programas de la Revolución.

El carbón utilizado como carga, insuflado y ajuste, en la Empresa Siderúrgica José Martí Antillana de Acero y la Empresa de Aceros Inoxidables ACINOX Tunas, es preparado mecánicamente en la planta de carbón del CIS. Los carbones de insuflado y ajuste son sometidos al proceso de molienda, clasificación y secado en un horno de tambor rotatorio, para la eliminación del agua que contienen estos materiales; después se incorporan a un equipo de trituración y clasificación CMD 27, con el que se garantiza la granulometría exigida por los usuarios.

Entre los aspectos más importantes que se han planteado, en función de disminuir el consumo de combustible, está la ejecución eficiente del proceso de secado en el cilindro rotatorio. Para contribuir a esto, se ha implementado el secado solar del carbón a la intemperie, previo al secado en el horno de cilindro rotatorio; lo que ha dado resultados satisfactorios en lo referido a la eficiencia del proceso productivo y la obtención de un producto de mayor calidad.

Antes de proceder a explicar el procedimiento utilizado y exponer los resultados obtenidos, se refieren algunos elementos de interés:

- En la Tierra la radiación solar es la principal fuente de energía primaria. Prácticamente es inagotable, no contaminante, está territorialmente distribuida y su disponibilidad potencial es muy superior a las necesidades energéticas del hombre [Bérriz y Álvarez, 2008].
- En cada metro cuadrado del territorio cubano se recibe diariamente una cantidad de energía solar de 5 kWh, aproximadamente, lo que equivale a medio kilogramo de petróleo combustible, valor promedio prácticamente invariable durante todo el año [Bérriz y Álvarez, 2008].
- El carbón, según sus características físicas, es un mineral higroscópico, es decir, tiene la propiedad de impregnar o exhalar la humedad en dependencia de las condiciones del ambiente en el que se encuentre; y es netamente negro, por lo que absorbe entre 90 y 98% la radiación solar, sin reflejarla posteriormente.

Breve descripción del flujo

El carbón es traído hasta el CIS en vehículos de volteo, ya sean camiones o rastras, desde donde se descarga en el patio de recepción y se amontonan en pilas o bultos que llegan alcanzar alturas de 2-2,5 m. Después, el mineral se esparce por toda la superficie del patio, en horas bien tempranas de la mañana, con un cargador marca TO-18, formando una plataforma de 0,15-0,20 m de altura, y se mantiene así durante todo el día expuesto directamente a la radiación solar hasta la tarde, momento en que es recogido por el cargador

nuevamente y almacenado en una pila dentro del cobertizo, para al día siguiente ser sometido al secado en el horno de cilindro rotatorio (Figs. 1, 2, 3, 4 y 5).



Figs. 1, 2, 3, 4 y 5. Preparación del carbón mineral para el secado solar.

Materiales y métodos

Para tomar una muestra representativa, suficiente y mínima, se empleó el muestreo sistemático; se concibió una red virtual y se seleccionaron treinta puntos, en los cuales se tomaron las muestras, a las que se le realizó un análisis de humedad por triplicado en probetas de cristal con 0,10 kg de carbón mineral en su interior. Este procedimiento es efectuado tres veces al día (7:00 a.m., 12:00 m. y 5:00 p.m.).

En el desarrollo del trabajo se utilizaron varios instrumentos y materiales que permitieron la ejecución de los experimentos (horno de 300 °C-C HOL 3524-5, desecadora y balanza analítica ВЛКТ-500 g-M). Todos formaron parte de las pruebas de humedad.

Resultados alcanzados

Análisis de humedad

La figura 6 revela que con el secado solar del carbón descrito con anterioridad, durante 10 horas sol, hay una disminución de humedad de 5%, aproximadamente. En el día 11 de marzo hay una notable irregularidad con respecto a los demás ensayos. Esta anomalía sucede en épocas de lluvia y precipitaciones, donde la nubosidad no permite una buena acción de los rayos del Sol sobre el mineral. En este período el carbón se mantiene amontonado en forma de pilas cónicas y el principal agente secador, incluso en mayor medida que la radiación solar, es el aire. Normalmente en esta zona geográfica del archipiélago cubano estas temporadas no son tan significativas; las sequías tienen mayor representatividad.

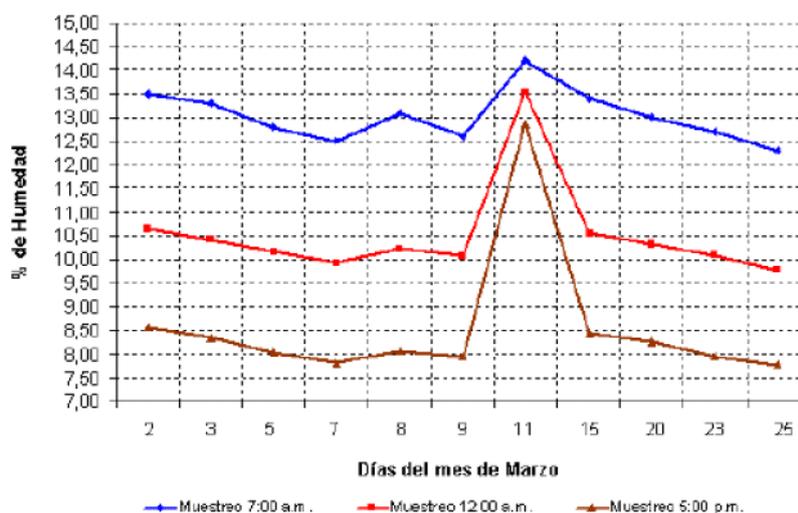


Fig. 6. Ensayos de humedad en el mes de marzo de 2008.

Análisis de la eficiencia del secadero

En la tabla 1 se expone un estudio comparativo del proceso de secado en el horno de cilindro rotatorio del carbón, antes y después de implementado el secado solar previo del mineral.

Tabla 1. Resultado comparativo de la eficiencia del secadero antes y después de implementado el secado solar previo del mineral

	Productividad, t/h	Consumo de diésel por tonelada de carbón secado, L/t	Calidad del producto obtenido (según % de humedad)
Antes	0,5	≈ 40	0,8-1,3
Después	1,3	≈ 22	0,8-1,3

Análisis medioambiental

Según mediciones realizadas por otros investigadores sobre los gases productos de la combustión, con el analizador de gases ORZAT, ha quedado mostrado que 1 L de combustible diésel utilizado en procesos productivos similares al descrito desprende los valores contenidos en la tabla 2.

Tabla 2. Concentración química de los gases productos de la combustión, %

	CO₂	CO	O₂	N₂
1 L	11	0,2	6	82,8
40 L	440	8	240	3312
22 L	242	4,4	132	1 821,6
Diferencia	198	3,6	108	1 490,4

En la tabla 2 aparecen el CO₂ y el CO, dos de los principales gases causantes del efecto invernadero, lluvias ácidas, desertificación de los suelos, deshielo de los polos, etc., los cuales con el secado solar previo del carbón han minimizado su concentración a aproximadamente la mitad, por tonelada de mineral secado.

Otro punto de gran significación es que mientras más seco sea sometido el mineral al horno, menor tiempo permanecerá en éste, por lo que se produce menor emisión de finos o polvos a la atmósfera, entre los que se encuentran partículas de diámetro aerodinámico menores de 10 µm (PM₁₀), que son muy peligrosas para la salud humana, porque son capaces de alcanzar la zona inferior de los pulmones.

Valoración económica orientativa

Con la utilización del secado solar previo al secado en el horno rotatorio se ha logrado disminuir, como ya se ha expuesto, casi o a la mitad el consumo de combustible.

En estos momentos la Empresa Provincial CUPET suministra el litro de diésel a 0,40 CUC, es decir, si se compran 3 000 L, entonces serían se estar erogando 1 200 CUC.

También hay que tener presente el consumo de combustible del cargador, para el riego de las pilas, la recogida del mineral y el traslado al cobertizo de almacenamiento. Este equipo consume 10 L por hora y trabaja diariamente en función del flujo un promedio de 4 horas, por lo que gasta 40 L/d. El combustible diésel utilizado por los equipos automovilísticos, en los

establecimientos de CUPET tiene un valor de 0,50 CUC/L. Entonces, para el uso del cargador se consumen 20 CUC diarios. En la tabla 3 se expone el efecto económico que ha representado el empleo del secado solar previo.

Tabla 3. Efecto económico

Antes			Después		
Masa seca, t	Consumo de diésel, L	Costo, CUC	Masa seca, t	Consumo de diésel, L	Costo, CUC
1	40	16	1	22	8,8
18	720	288	18	396	158,4
Otros gastos			Otros gastos		
Cargador	-	-	Cargador	40	20
Total	720	288	Total	436	178,4

Secar 18 t, es decir, la producción diaria, actualmente tiene un gasto económico en cuanto al consumo de diésel igual a 178,4 CUC, por lo que diariamente se ahorran 109,6 CUC (en el período de un año este valor se eleva a 40 004,00 CUC).

Conclusiones

1. Con el secado solar del carbón, durante 10 horas sol, hay una disminución de humedad de 5%, aproximadamente, durante casi todo el año.
2. Con la aplicación previa del secado solar, en el secador de cilindro rotatorio ha existido un incremento de la productividad en 0,8 t/h; una notable disminución del consumo de combustible diésel, de aproximadamente a la mitad, y el producto obtenido presenta una calidad en cuanto al contenido de humedad por debajo de 1,4%.
3. Desde un punto de vista medioambiental:
 - La disminución del consumo de diésel por tonelada de mineral secado trae paralelamente una minimización de los gases productos de la combustión (ver Tabla 2).
 - Al utilizarse un carbón con menor humedad, se retiene menos tiempo en el horno, lo que contribuye a que la emisión de finos y polvos, entre los que se encuentran partículas de diámetro aerodinámico menores de 10 µm (PM₁₀), sea mucho menor. Este valor aún no se ha cuantificado.
4. El secado solar previo, en el proceso productivo, ha proporcionado un efecto económico, en cuanto al consumo de diésel, de 109,6 CUC diariamente, que en el periodo de un año asciende a 40 004 CUC.

Recomendaciones

Caracterizar integralmente el secado solar del carbón, con el propósito de describir el comportamiento de la humedad contenida durante el proceso,

determinar los parámetros más influyentes y correlacionarlos con los métodos tradicionales.

Bibliografía

BÉRRIZ PÉREZ, LUIS Y MANUEL ÁLVAREZ GONZÁLEZ. *Manual para el cálculo y diseño de calentadores solares*. La Habana: Ed. CUBASOLAR, 2008.

FUNDORA LLITERAS, JUAN. «Energía y educación», en *Energía y tú*, (39): 20-24, jul.-sep., 2007.

Instituto Mundial del Carbón. *El carbón como recurso (Una visión general del carbón)*. Primera publicación en Reino Unido, mayo de 2005. Disponible en: http://www.worldcoal.org/assets_cm/files/PDF/spanish_coal_resource.pdf.

Última revisión: 100308/ 12:10 p.m.

LARA COIRA, MANUEL. «Escenario energético mundial». DYNA 82 (9): 471-478, 2007.

MONTESINOS LARROSA, ALEJANDRO. *Hacia la cultura solar*. 2da. edición. La Habana: Ed. CUBASOLAR, 2006.

RETIRADO MEDIACEJA, YOALBYS; EVER GÓNGORA LEYVA, ENRIQUE TORRES TAMAYO Y ARTURO LUIS ROJAS PURÓN. «Comportamiento de la humedad durante el secado solar del mineral laterítico», en *Minería Geología* 23 (3), 2007.

Disponible en: <http://www.ismm.edu.cu/revistamg/v23-n3-2007/art2-3-2007.pdf>.

Última revisión: 100308/ 11:15 a.m.

RODRÍGUEZ GARCÍA, JESÚS ERNESTO. «Sistema de monitoreo de la calidad del aire en el Centro de Investigaciones Siderúrgicas como premisa para la implantación del Sistema de Gestión ambiental». Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Gestión Ambiental, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Holguín, 2007.

TURRINI, ENRICO. *El camino del Sol*. 2da. edición. La Habana: Ed. CUBASOLAR, 2006.

———. «El Sol: Padre del Socialismo», en *Energía y tú*, (38): 34-35, abr.-jun., 2007.

VIGIL SANTOS, ELENA. «Los hidrocarburos y la atmósfera», en *Energía y tú*, (33): 41-44, ene.-mar., 2006.

Control de las emisiones para el transporte automotor

Road transport emissions Control

*Por M.Sc. Martha Amarales Contreras
Centro de Investigación y Desarrollo del Transporte, La Habana, Cuba.*

Resumen

El transporte automotor es una de las principales fuentes emisoras de gases contaminantes provenientes de la combustión de los motores, que provoca un doble efecto dañino, pues mientras algunos de los componentes gaseosos afectan la salud humana (CO, NO_x y HC), otros conllevan al incremento de los gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄ y N₂O), incidentes en el cambio climático que afecta a la Tierra. Se presenta el resultado de un proceso que tiene como objetivo establecer, con fines de regulación, los máximos niveles de emisión de gases a la atmósfera generado por fuentes móviles, para atenuar su influencia en el marcado deterioro de la calidad del aire. De esta manera, las propuestas de valores límites de emisiones de gases, tanto para los vehículos con motor de gasolina, como diésel, se reducen para todos los indicadores y en los años de fabricación de los equipos, y están en correspondencia con los valores que establecen diversas normas internacionales analizadas.

Palabras clave: Contaminación ambiental, gases de efecto invernadero, transporte automotor.

Abstract

Road transport is one of the main sources of pollutant gases originating in the combustion that takes place in the engines, which cause a double harmful effect, since while some of the gaseous components directly affect health (CO, NO_x and HC), other cause an increment of the greenhouse gases (CO₂, CH₄ and N₂O), that provoke climate change that affects the Earth. It is presented the result of a process aimed at establishing, with regulatory purposes, the maximum levels of emission of gases to the atmosphere generated by moving sources, in order to attenuate its repercussion in the deterioration of the quality of the air. This way, the proposals of cut-off values of emissions of gases, both for the gasoline or diesel powered vehicles are reduced for all the indicators and in the manufacturing years of the cars, and they are in correspondence with the values established by various international standards analyzed.

Keywords: Pollution, greenhouse gases, road transport.

Introducción

El desarrollo tecnológico de los países tiene como consecuencia, debido a la quema de los combustibles fósiles, el incremento de las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera, lo que repercute en el deterioro de la calidad de

vida que percibe hoy en día la población, lo que constituye uno de los principales problemas ambientales y uno de los retos que debe resolver la sociedad.

El transporte, por su naturaleza, se relaciona prácticamente con todos los sectores de la economía, moviliza los insumos y materias primas requeridas para la producción de bienes hasta los centros de consumo y actúa como un importante demandante de los productos y servicios de diversas ramas económicas. Beneficia la transformación de las relaciones de trabajo y grupos sociales al incorporar productos y experiencias disímiles en aquellas localidades que se enlazan a las redes de transporte, e influye en la ubicación de los centros urbanos y sus actividades, medios de vida, conformación de los espacios urbanos, modificación de los usos del suelo y en las formas de comunicación e identificación social. El crecimiento demográfico en los centros urbanos en los últimos cincuenta años ha incrementado la demanda del transporte masivo, aunque la oferta no ha crecido en la misma proporción. A partir del 2005 se aprecia un crecimiento en el transporte interprovincial en Cuba y más recientemente se trabaja por revertir la situación en el transporte urbano colectivo.

El derecho a la movilidad es inherente al modo de vida de la sociedad moderna, pero al mismo tiempo la infraestructura del transporte y el propio movimiento de vehículos provocan impactos negativos en el medio ambiente, en particular la contaminación del aire, agua y suelos; el efecto invernadero y afectaciones a la biota y a la calidad de vida por los entornos ruidosos, accidentes, y la presencia de elementos ajenos al paisaje.

El transporte en Cuba constituye una de las fuentes de contaminación atmosférica más distintivas debido a su deplorable estado técnico, deficiencias en el mantenimiento preventivo y correctivo, y el uso de combustibles fósiles de baja calidad.

La difícil situación económica de los últimos años ha gravitado sobre la explotación y mejora de los medios de transporte, y ha limitado las acciones necesarias para la minimización de sus impactos ambientales. No obstante, en tanto la capacidad para aprender y extraer experiencias de las dificultades es también consustancial a nuestro proceso, la idea de la sostenibilidad lejos de debilitarse se ha reforzado porque hemos adquirido mayor conciencia y nuevas habilidades para desarrollar instrumentos y acciones que permitan alcanzar la sostenibilidad del transporte.

El enfoque para el tratamiento de las emisiones debe efectuarse a partir de considerar de forma simultánea tres variables interdependientes: calidad del combustible utilizado, tecnología vehicular y condiciones de uso de los vehículos, lo cual significa que una variación en cualquier de estos factores, incide de manera directa en la modificación del nivel de las emisiones.

Según reportes y estudios realizados, para transportes con igual tecnología y condiciones de utilización, la máxima disminución de emisiones que se puede lograr modificando las características del combustible está en el orden de 20 a

30% [Asociación..., 2001], lo que se traduce en el empleo de gasolinas con bajo contenido de azufre (S), olefinas, aromáticos, etc., y en el caso del diésel con alto valor de cetano y también bajo contenido de S, entre otras.

En cuanto a la tecnología vehicular, estas van dirigidas fundamentalmente a cambios en el diseño del motor, condiciones de combustión, así como la incorporación de tecnologías de postratamiento y el control de pérdidas evaporativas. Lo anterior se traduce en la aplicación, por ejemplo, de la inyección electrónica del combustible, catalizador de oxidación, cámara de combustión de quemado rápido y recirculación de los gases de escape.

Por su parte, una adecuada gestión del tránsito en las ciudades, puede reducir de cinco a diez veces las emisiones vehiculares [Asociación..., 2001]. De ahí que el crecimiento de la motorización requiere ir acompañado de una apropiada actividad de tránsito e infraestructura vial. Actualmente, los países y regiones geográficas con mayor desarrollo y los que están en vías de ello, establecen normativas para el control de las emisiones de gases de los vehículos automotores, que abarcan desde los aspectos relacionados con el diseño y construcción hasta los vinculados con la explotación de los mismos.

Está demostrado que el problema de la contaminación ambiental crece cada día, con un efecto directo sobre la salud humana.

Cuba, y en especial La Habana, no está ajena a esta problemática mundial; se han realizado trabajos que demuestran lo antes expresado, y existen zonas en la capital del país (Cerro) [Biar] donde se han obtenido concentraciones de gases contaminantes en valores superiores a los máximos admisibles (durante 1987 se detectaron valores máximos de 20,2 mg/m³ de CO en diferentes avenidas estudiadas y de 40,6 mg/m³ en el túnel de la bahía).

En trabajos anteriormente realizados por el Centro de Investigación y Desarrollo del Transporte (CETRA), relacionados con la influencia del transporte y el medio ambiente [Alea y Díaz, 1997], la economía energética en el transporte [Alea y Díaz, 2000] e Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Fuentes Móviles [Alea y Biar, 2004; Biar, 2005], donde a partir de los resultados alcanzados, relacionados con el desgaste de los equipos, su estado técnico y la experiencia de los autores en la temática, se determinaron valores en las emisiones de gases producidos por los vehículos, superiores a los reportados por los fabricantes.

Tales resultados condujeron a la afectación de los factores de emisión dado por la metodología europea: en 2,0 para el caso del CO; 0,89 para el CO₂, y 2,3 en los HC (CH₄ y COVDM), valores que posteriormente son utilizados en los inventarios de GEI para fuentes móviles [Biar].

Como se aprecia, en Cuba desde 1997 se establecen diagnósticos para el control de las emisiones de gases de escape en los vehículos con motor de gasolina y diésel. En este momento, atendiendo al tiempo de vigencia de la actual resolución, consideraciones asumidas en su determinación y dado los criterios que suponen muy holgados los límites de emisión actuales, se procede

a la evaluación y elaboración de nuevos valores de límites máximos que permita una mejoría en la economía de combustible y la preservación del medio ambiente.

Fuentes móviles: Contaminación y control

1. Particularidades de las emisiones en la flota vehicular en Cuba

Desde finales de la última década del siglo pasado, como consecuencia de un mejoramiento de las condiciones económicas del país, se observa un incremento de la circulación vehicular por las principales ciudades, fundamentalmente en la capital, aspecto que conllevó a la Comisión No. 11 del Programa de Apoyo a la Ciudad de La Habana, a valorar para el caso del humo en específico, de excesivo, aunque hay otros gases incoloros e incluso inodoros que tienen altos niveles de toxicidad, de forma tal, que incluso los vehículos cuyos gases de escape no son visibles, pueden estar emitiendo a la atmósfera cantidades excesivas de contaminantes.

Internacionalmente constituye una práctica la elaboración de normas de emisión de forma general, que abarquen la totalidad de los vehículos según las categorías de ligeros, medios y pesados, sin hacer diferencia sobre la base del desarrollo tecnológico en la construcción de los equipos. Esta situación obliga a los fabricantes de vehículos a acometer periódicamente costosos programas de modernización que permita la eliminación de aquellos equipos con atraso tecnológico y desgaste técnico.

En cuanto a Cuba, el parque automotor a pesar de que se está modernizando, se caracteriza por proceder de diferentes zonas geográficas y por tener un variado conjunto de técnicas de fabricación, lo que unido al envejecimiento técnico ocasionado por el prolongado período de explotación, posee tecnologías de baja eficiencia energética que promueve altos niveles de emisiones de gases de combustión.

Esta situación impide la elaboración de regulaciones y/o normas de emisión con carácter general, pues mientras las empresas transportistas estatales y propietarios particulares que dispongan de vehículos modernos apenas tienen que realizar esfuerzos para cumplirlas, los que poseen medios con tecnologías atrasadas no podrán lograrlo, a no ser mediante el manejo de determinadas inversiones que no siempre el país está en condiciones de enfrentar.

Debido a lo anterior es que se hace necesaria la elaboración de regulaciones y/o normas de emisión que, además de considerar las categorías del vehículo atendiendo al peso y potencia, consideren las particularidades tecnológicas y desgastes técnicos de estos, así como las posibilidades económicas del país para alcanzar determinados niveles de eficiencia energética y ambiental.

2. Bases para la elaboración del sistema de regulación de las emisiones

En Cuba el control de las emisiones de gases de los vehículos automotores se realiza en los Centros de Revisión Técnica Automotor (CRTA), pertenecientes

al Ministerio del Transporte (MITRANS). Estas instalaciones son creadas para la verificación del estado técnico de los vehículos en parámetros relacionados con la suspensión, freno, alineación de las ruedas, luces y emisiones de gases, con el objetivo de lograr una mayor seguridad en la circulación vehicular, propiciar el ahorro de combustible y regular la contaminación atmosférica que produce este modo de transporte.

Estos centros están ubicados en las provincias de Ciudad de La Habana, Matanzas, Villa Clara, Camagüey, Holguín y Santiago de Cuba, para la atención fundamentalmente del parque vehicular estatal y los privados que cuentan con licencia operativa del transporte. También existen los llamados «centros móviles», como el que presta servicio en la provincia de Granma, la cual no posee un centro de revisión basificado en el territorio.

Relacionado con la forma de medir las emisiones de gases, las técnicas más actuales se realizan en pruebas dinámicas, o sea, con el vehículo en movimiento, a diferencia de la que se ejecuta en nuestro país, donde los valores de emisión son obtenidos mediante pruebas estáticas del vehículo en los CRTA. Debido a ello, las regulaciones europeas, en común con las de Estados Unidos y Japón, están definidas en términos de relación de masa de contaminante emitidos por unidad de distancia recorrida o algún múltiplo de esta, por ejemplo g/km. Mientras que para nuestro caso, los indicadores que se utilizan son en tanto por ciento (%) y en partes por millón (ppm) del volumen de los gases.

De esta manera, se miden los elementos HC, CO, CO₂, O₂ mediante el analizador de gases 8690 CE de la firma Muller Bem.

La escala con que se miden los valores de la composición de la mezcla gaseosa es volumétrica, siendo la resolución para cada componente la siguiente [SB-NOT-7700T1ES]:

CO: De 0 a 10% en volumen, error: $\pm 0,01\%$ Vol.

CO₂: De 0 a 20% en volumen, error: $\pm 0,1\%$ Vol.

HC: De 0 a 10 000 ppm en volumen, error: ± 1 ppm

O₂: De 0 a 25% en volumen, error: 0,01% Vol.

Los datos de cada medición se analizan automáticamente y se comparan contra los valores tope definidos por la Resolución 172-01 del MITRANS, que constituye el instrumento normativo vigente.

3. Determinación de las emisiones máximas admisibles según las características de transporte automotor

La tabla 1 ofrece los resultados propuestos de las emisiones contaminantes que se deben controlar diferenciados en vehículos con motor de gasolina y motor diésel por año de fabricación, donde además se exponen las cifras que se encuentran vigentes en la actualidad, según la Resolución 172-01 del MITRANS.

Tabla 1. Valores de emisiones contaminantes vigentes y propuestos

Tipo de combustible	Indicadores	Año de fabricación del vehículo					
		≤ 1980		1981-1998		≥ 1999	
		Vigente	Propuesta	Vigente	Propuesta	Vigente	Propuesta
Gasolina	Monóxido de carbono (CO) del volumen total de gases, %	7,5	6,3	3,5	2,8	2,0	1,8
	Hidrocarburos (HC), ppm	1 500	1 267	900	740	300	280
Diésel	Opacidad, %	Ligeros		60		52	44
		Pesados	70	66	60	57	50

Fuente: Resolución 172-01 y elaboración propia.

Como se observa en la tabla 1, los valores límites se reducen en todos los nuevos indicadores propuestos. En los vehículos de gasolina con año de fabricación ≤ 1980 , se reduce el CO y los HC a 16%, mientras que los comprendidos entre 1981 y 1999 la disminución alcanza 20% para el CO y 18% para los HC. En los vehículos ≥ 1999 , la reducción se realiza a 10% para el CO y 7% para los HC.

Para los vehículos con motor diésel, a diferencia de lo estipulado en la Resolución 172-01 del MITRANS, se hace una nueva división entre los ligeros y los pesados, que posibilita realizar una mayor exigencia hacia los primeros, reduciéndose el valor permisible de la opacidad en 14, 13 y 12% para los vehículos construidos antes de 1980, entre 1981 y 1998 y después de 1999, respectivamente, en relación con la regulación vigente. En el caso de los vehículos pesados la opacidad se disminuye en 6, 5 y 4% para los fabricados antes de 1980, entre 1981 y 1998 y después de 1999, respectivamente.

Se ha considerado que a pesar de que para calcular las emisiones de gases de efecto invernadero de un país se separa el CH₄ del resto de los HC, denominándolos como compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVDM), realmente para emisiones de los vehículos no es necesario realizar esta diferenciación, y generalmente los equipos disponibles los miden como un todo. Téngase además en cuenta que las emisiones de HC (CH₄ incluido)

proviene en su mayoría de la evaporación durante los distintos procesos de manipulación del combustible, que de los propios inquemados que emigran por el escape.

Con respecto al azufre (S) contenido en el combustible, una parte queda medida al determinar la opacidad, es decir, la fracción que escapa como sulfatos y forma parte del material particulado, y otra que constituye los SOx, que si bien es cierto que tienen incidencia en la formación de la llamada lluvia ácida, no son gases de efecto invernadero (GEI). Además, su emisión depende en lo fundamental del azufre que contiene el combustible y no del estado de mantenimiento del vehículo, del sistema de explotación, del conductor u otras.

En el caso de los óxidos de nitrógeno (NOx) no se cuenta con el equipamiento necesario para ello y por tanto este contaminante nunca se ha medido.

Para estipular los valores de NOx máximos admisibles, en la propuesta de norma que se elabore, se tomará en consideración lo planteado en las normas internacionales y la valoración por criterio de experto (investigadores y especialistas de CETRA y MITRANS).

4. Análisis con normas de emisión de otros países

A modo de comparación y poder valorar el rigor de la nueva propuesta, se confronta con documentos normativos de la Comunidad Europea y diferentes países latinoamericanos, como México, Venezuela, Chile y República Dominicana, donde circula una gran cantidad de vehículos norteamericanos. En la figura 1 se muestran los valores de monóxido de carbono de estos países y la nueva propuesta en dependencia de los años de fabricación de los vehículos.

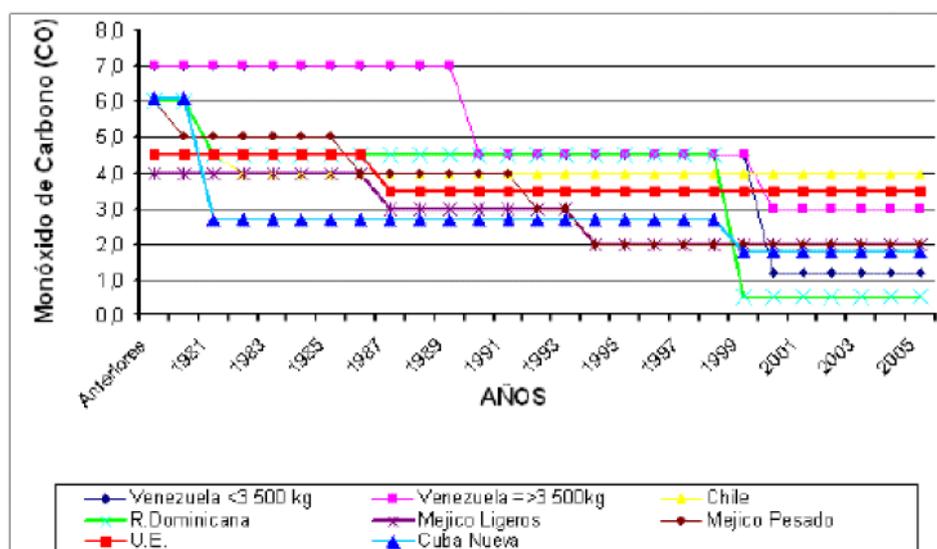


Fig. 1. Normas de emisión de monóxido de carbono (%), de varios países. Fuente: Directiva 2003/27/CE; Ley 18.290; NOM 041-ECOL-1999; Decreto N° 2.673 y elaboración propia.

Es necesario aclarar que las normas expuestas para los diferentes países contemplan las mismas condiciones técnicas de explotación para los vehículos que la existente en Cuba, pues por ejemplo, las Normas Europeas indican exigencias mucho más rigurosas para los contaminantes de los vehículos que tienen instalado catalizadores (0,5% para el CO y 125 partes por millón para los HC).

Al compararse los requisitos establecidos en la nueva propuesta con algunas normas vigentes extranjeras, se puede apreciar que para los vehículos fabricados antes 1980 el planteamiento actual instituye valores límites superiores. Por ejemplo, ellos superan en 1,5 y 1,4 veces los de México para los vehículos ligeros y la Unión Europea, respectivamente, lo que se fundamentan en la antigüedad y diferencia en tipos de los carros que circulan en el país.

Sin embargo, para los vehículos fabricados entre los años 1981-1998, la sugerencia de regulación cubana sitúa valores inferiores al de los países comparados, dado a que los datos obtenidos en nuestro país responden a los motores regulados de los vehículos que entran a inspección.

En el caso de los carros fabricados posterior a 1999, la instrucción cubana inserta cifras inferiores a los relacionados por la Unión Europea (UE) y México, lo que se corresponde con la utilización de tecnología más moderna.

Si se confrontan las cantidades asumidas para los hidrocarburos (HC), por la nueva propuesta con la de otros países, en dependencia de los años de fabricación de los vehículos (Fig. 2), se observa que prácticamente para todos los años de fabricación de los carros, los indicadores cubanos están por encima. Este sobreexceso de hidrocarburos es motivado por que la regulación del motor del vehículo se realiza sin instrumento técnico.

Dado que en Cuba está priorizado el ahorro de combustible mucho más que en otros países, este indicador debe estar más ajustado en el futuro.

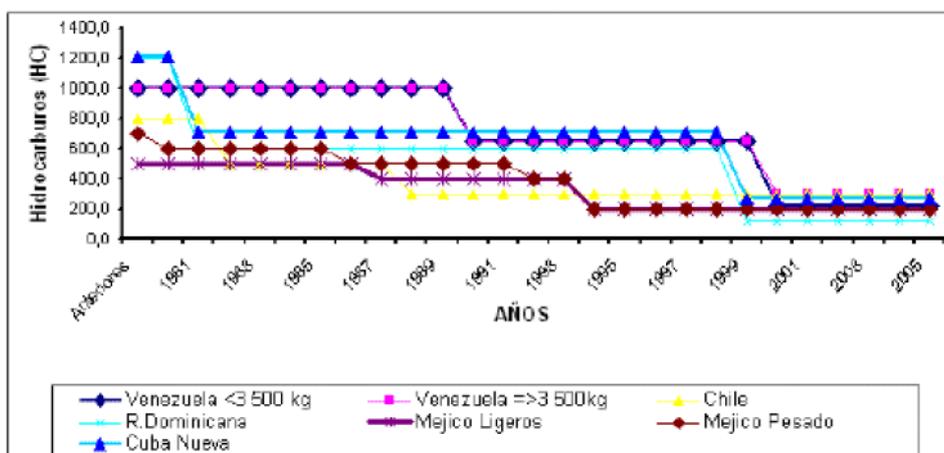


Fig. 2. Normas de hidrocarburos (ppm) de varios países.
Fuente: Ley 18.290; NOM 041-ECOL-1999; Decreto N° 2.673 y elaboración propia.

En la figura 3 se muestran los valores de opacidad de varios países y la nueva propuesta en dependencia de los años de fabricación de los vehículos. En el análisis se observa que para todos los años de fabricación de los vehículos, la indicación cubana está por debajo, para iguales condiciones técnicas de explotación de los vehículos, lo cual está dado por la diferencia que se establece entre los equipos pesados y ligeros, no siendo así para las normas extranjeras donde las categorías de los equipos es única y se registran vehículos de mayor potencia que los existente en el país.

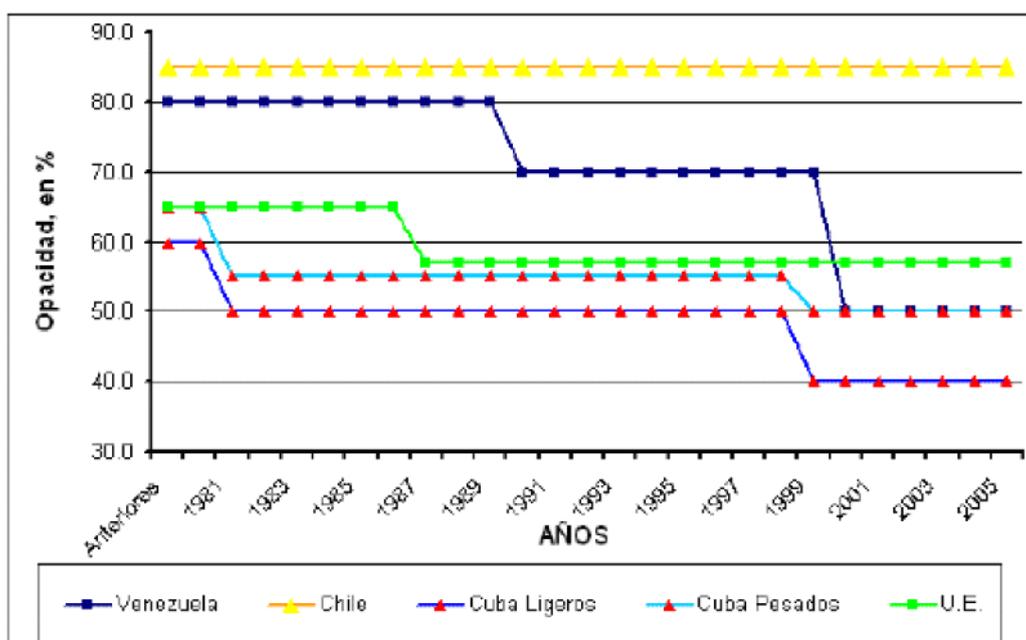


Fig. 3. Normas de opacidad de varios países.
 Fuente: Directiva 2003/27/CE; Ley 18.290; Decreto N° 2.673 y elaboración propia.

Por otra parte, la Política y Estrategia Ambiental del Sistema Empresarial del Ministerio del Transporte contempla dentro de sus acciones aquellas encaminadas a modernizar de forma sistemática el parque automotor, mejorar gradualmente el estado técnico de los vehículos y dotar a los CRTA con el equipamiento necesario para el control de los gases de escape, lo cual coadyuvará la actualización e instauración de un sistema normativo que permita regular las emisiones atendiendo a las posibilidades tecnológicas de los vehículos.

Conclusiones

En la ponencia se expone la experiencia de lo realizado en la temática de control de las emisiones por fuentes móviles con fines de regulación, observándose que:

- Las propuestas de valores límites de emisiones de gases tanto para los vehículos con motor de gasolina, como diésel, se reducen para todos los indicadores y en los años de fabricación de los equipos.

- Las cifras proyectadas para los nuevos límites de emisión de gases están en correspondencia con las cantidades que establecen diferentes normas internacionales analizadas.
- Se trabaja en el desarrollo de una legislación, a partir de una Norma Cubana, que establezca los valores máximos admisibles de emisión de gases tóxicos por fuentes móviles.

Bibliografía

ALEA, J Y R. DÍAZ. «Economía energética en el transporte a partir del control de los gases de combustión». Informe final. La Habana: CETRA, 2000.

ALEA, J Y R. DÍAZ. «Influencia del transporte automotor en la contaminación ambiental de Cuba». Informe final. La Habana: CETRA, 1997.

ALEA, J. Y R. BIART. «Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero en fuentes móviles-2000». Informe final. La Habana: CETRA, 2004.

ASOCIACIÓN REGIONAL DE EMPRESAS DE PETRÓLEO Y GAS NATURAL EN LATINOAMÉRICA Y EL CARIBE (ARPEL). *Enfoque sistémico para el control de las emisiones vehiculares en América Latina y el Caribe*. Mayo de 2001.

BIART HERNÁNDEZ, RAFAEL. Tesis para optar por el grado de Máster de Ingeniería en Saneamiento Ambiental.

BIART, R. «Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero en fuentes móviles-2002». Informe final. La Habana: CETRA, 2005.

Resolución 172-01, del MITRANS. 17 de julio de 2001.

SB-NOT-7700T1ES. *Manual de utilización*.

Implementación de un SIG para el mejoramiento del sistema de vigilancia ambiental y los pronósticos de la contaminación atmosférica

Implementation of a GIS for the improvement of the environmental surveillance system and the atmospheric pollution forecasts

*Por Dr. Antonio Wallo Vázquez, Dr. Osvaldo Cuesta Santos, M.Sc. Pedro Sánchez Navarro y M.Sc. Arnaldo Collazo Aranda
Instituto de Meteorología. Loma de Casablanca s/n, Regla, La Habana, Cuba.
Tel.: (537) 8686500.
e-mail: antonio.wallo@insmet.cu*

Resumen

La contaminación atmosférica en las ciudades, que es producida generalmente por emisiones industriales y vehiculares, a pesar de los esfuerzos realizados por muchos países, aún continúa siendo un grave problema. Por esta razón cada día cobra mayor importancia la vigilancia ambiental con el objetivo de mitigar los daños que pueda la contaminación atmosférica. Con la aparición y desarrollo de los sistemas de información geográfica (SIG) se contó con herramienta capaz de poner en manos de los tomadores de decisiones la información de forma espacial y en tiempo real. Esto ha permitido la inmediatez en cuanto a la aplicación de acciones que permitan minimizar los daños que pueda producir la contaminación atmosférica en el deterioro de las condiciones ambientales. Dentro de este contexto el presente trabajo se propone la implementación de un sistema de información geográfica para el municipio Regla, de la provincia Ciudad de La Habana, para el mejoramiento de su sistema de vigilancia ambiental. Con ello, la toma de medidas de mitigación producto a afectaciones producidas al medio ambiente podría llevarse a cabo en el menor tiempo posible. Este sistema debe extenderse posteriormente al resto de los municipios de Ciudad de La Habana y a todo el país.

Palabras clave: Sistema de información geográfica (SIG), vigilancia ambiental, contaminación atmosférica.

Abstract

The atmospheric pollution in cities, that it is generally created by industrial and road transport emissions, in spite of the efforts accomplished by a many countries, still keeps on being a serious problem. For this reason environmental surveillance becomes more important everyday, with the purpose of mitigating the impacts of atmospheric pollution. With the development of Geographical Information Systems (GIS) the scientific community accounts with a tool that allow them to put the information in spatial format and in real time in the hands of the decision makers. This has enabled the immediacy regarding taking actions to minimize the damages that

atmospheric pollution can produce in the deterioration of the environmental conditions. Within this context the present paper recommends the implementation of a GIS for Regla municipality, La Habana province, for the improvement of its environmental surveillance system. With it, the process of taking mitigation measures due to the degradation of the environmental conditions could be taken in the shortest time possible. The application of this system should be extended later to the rest of the municipalities of La Habana and to the whole country.

Passwords: Geographical information system (SIG), environmental surveillance, atmospheric pollution

Introducción

Los aspectos relacionados con la protección del medio ambiente atraen cada vez más la atención de investigadores en diferentes ramas e incluso de políticos, comprometidos estos últimos desde la Cumbre de Río a jugar un papel más protagónico desde su posición de decisores, por cuanto la solución a los actuales problemas medio ambientales constituye una premisa fundamental para el desarrollo de la vida con sentido de sostenibilidad.

Para conocer con exactitud los problemas que confronta el medio ambiente atmosférico es imprescindible el estudio de la calidad de este, o sea, estudiar las características físicas (relacionadas con el clima) y químicas (relacionadas con la contaminación del aire) de la atmósfera, la vigilancia de la calidad del aire, la búsqueda de las tendencias más relevantes descritas por los fenómenos y elementos dañinos que se verifiquen o detecten en él, así como el pronóstico de su estado futuro según el modo y la intensidad en que se desarrollen los procesos productivos.

El surgimiento de los sistemas de información geográfica puso en manos de los investigadores una herramienta que permitiera el procesamiento espacial de una gran cantidad de información en forma de capas, con vistas a la realización de análisis espaciales de la misma.

Dentro de este contexto el presente trabajo se propone la implementación de un sistema de información geográfica para el municipio Regla que permita el mejoramiento del sistema de vigilancia ambiental en el mismo. Con ello que la toma de medidas de mitigación producto a afectaciones producidas al medio ambiente por la contaminación atmosférica pueden llevarse a cabo en el menor tiempo posible.

Materiales y métodos

Características geográficas del área de estudio

1. El área de estudio comprende el municipio de Regla (Fig. 1), el cual se encuentra en su mayor parte en una llanura baja pantanosa con áreas de superficie baja-marino palustre que bordea la bahía de La Habana. Las zonas más alejadas de la costa se encuentran sobre una llanura

ondulada, medianamente diseccionada, en Casablanca se destaca un escarpe denudativo de alrededor de 50 m de altura con altos valores de pendiente.

Esta región pertenece a las alturas Habana-Matanzas y está básicamente conformada por dos cadenas de bloques anticlinales separados por un sinclinal relleno por calizas. La zona de estudio está fuertemente antropizada por construcciones industriales y gran desarrollo urbanístico.

1. Los límites del municipio Regla son los siguientes: Norte: Municipio Habana del Este. Sur: Municipios San Miguel del Padrón y Guanabacoa. Este: municipios de Guanabacoa y Habana del Este. Oeste: municipio de Habana Vieja y bahía de La Habana.
2. Esta zona tiene una superficie territorial de 10,9 km², con una población de 43 004 habitantes y una densidad de 3 945,3 hab/km². Posee una intensa actividad portuaria e industrial; destacándose la Refinería Níco López, la Empresa Nacional de Astilleros, los Molinos de Trigo, las Instalaciones ferroviarias, las Terminales Marítima, de Atraques, de Contenedores y la Pesquera. Además se encuentran en el territorio la Fábrica de fertilizantes Gerardo Granda, la Fundición Galainera y la Derretidora de Cebo. Es de señalar que dos importantes vías de comunicación de la ciudad coinciden en este territorio, con un alto tráfico automotor, estas son; la Vía Blanca y el Anillo del Puerto.

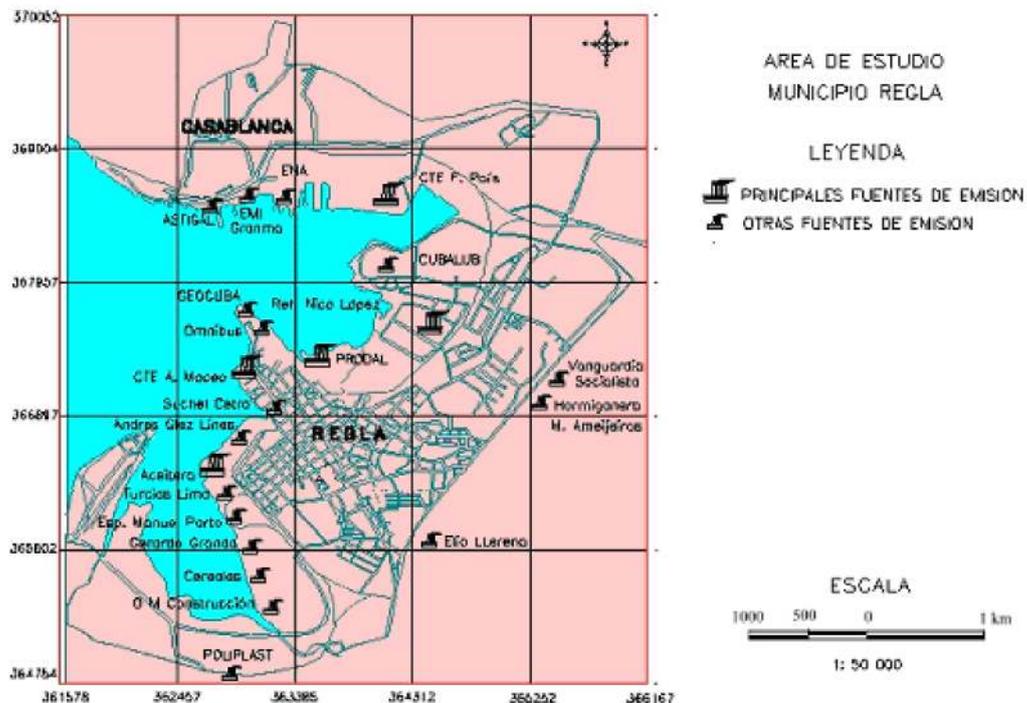


Fig. 1. Área de estudio del proyecto.

Métodos de muestreo y análisis químico.

Contaminantes atmosféricos: NO₂, NO, NH₃, SO₂, H₂S, PST, lluvia, otros. Los valores obtenidos de las mediciones y análisis químicos de los contaminantes estudiados se realizaron según las metodologías recomendadas por la Red de Vigilancia de la Atmósfera Global (VAG) de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y la Organización Mundial de la Salud (WHO. 1990, 1997 y OMM, 1990), y son las oficialmente empleadas por el Centro de Contaminación y Química Atmosférica (CECONT), del Instituto de Meteorología del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente.

Información meteorológica

La información meteorológica se obtendrá de los distintos Centros del Instituto de Meteorología y la misma es la siguiente:

- Variables Meteorológicas: meteorológicas (temperatura, humedad relativa, tensión de vapor, presión, fuerza del viento, precipitación, nubosidad, horas sol).
- Tipos de situaciones sinópticas
- Capa de mezcla

Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Para la representación espacial de toda la información necesaria para el pronóstico y la determinación de la influencia de la contaminación atmosférica sobre las condiciones ambientales se utilizan las herramientas de análisis del SPRING [INPE, 2004]. La escala de trabajo empleada fue 1: 50 000. Toda la información se encuentra organizada en capas para la realización de los cálculos necesarios para la obtención de los mapas.

El análisis y la obtención de los mapas resultantes se realizará mediante la aplicación de la técnica AHP- Procesamiento Analítico Jerárquico INPE [2004] que se basa en que cuando se tiene diferentes factores que contribuyen a una decisión es necesario determinar una contribución relativa para cada uno, para esto existe una técnica basada en la comparación lógica de dos parámetros. Mediante este procedimiento los factores que influyen en la toma de decisión son comparados «dos a dos» en un criterio de importancia relativa conforme a una escala predefinida que se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Escala de valores AHP para comparación pareada

Intensidad	Definición
1	Importancia igual: los dos factores contribuyen con el mismo peso.
3	Importancia moderada: Un factor es ligeramente más importante que otro.
5	Importancia esencial: Un factor es esencialmente más importante que otro.
7	Importancia demostrada: Un factor es fuertemente favorecido por su mayor relevancia demostrada en la práctica.

9	Importancia extrema: La diferencia entre los factores es del mayor orden posible.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios.

Formulación final: $var3 = 0,667(Pondere(var1, tab1)) + 0,333*(Pondere(var2, tab2))$ (2.6)*

Resultados

Dentro de las bases cartográficas georreferenciadas e introducidas en el sistemas no solamente se cuenta con las del municipio Regla, sino que se extendió esta cartografía a todo el país, para cuando el sistema se extienda al resto de los municipios, provincias y país. Las áreas básicas para el trabajo en los municipios son los consejos populares. A continuación se relacionan estas bases cartográficas.

- Mapa general del área geográfica (Centroamérica y el Caribe).
- Cuba (provincias y municipios).
- Ciudad de La Habana (municipios, consejos populares).
- Provincias (municipios, consejos populares).

A partir de las bases anteriores es que se realizará cualquier análisis posterior en el sistema como tal, para ello se incluyeron además las bases de datos referentes tanto a los contaminantes como a las condiciones meteorológicas, las mismas son las siguientes:

- Concentraciones de contaminantes.
- Índices de calidad del aire (ICA).
- Variables meteorológicas.
- Tipos de situaciones sinópticas (TSS).
- Capa de mezcla.
- Aplicaciones.

Todas estas bases de datos se encuentran georreferenciadas a las bases cartográficas digitales antes descritas. Además se han creado módulos de trabajo que permiten el procesamiento espacial de la información en dependencia de los resultados que persigan obtenerse, estos módulos son:

- Módulo general de datos: En el mismo se encuentran todas las bases de datos digitales georreferenciadas y las bases cartográficas digitales. La finalidad del mismo es la obtención de mapas temáticos que servirán para el análisis espacial de toda la información.
- Dispersión de contaminantes: Se incluye un módulo independiente para el análisis de la dispersión de los contaminantes, en este módulo se encontraran los resultados de las corridas de los modelos de dispersión de contaminantes, como mapas temáticos también, listos para el análisis espacial en los módulos diseñados para el mismo.
- Análisis espacial aplicado: en este módulo se realizarían los análisis espaciales aplicados a la influencia de la contaminación atmosférica

sobre las condiciones ambientales, a partir de los mapas temáticos obtenidos en los módulos anteriores.

- Pronóstico de la contaminación atmosférica: Es un módulo dedicado al pronóstico del comportamiento de la contaminación atmosférica y las variables ambientales con vistas a implementar un sistema de alerta temprana, que permita en el menor tiempo posible poner en manos de los tomadores de decisión la información necesaria para la toma de medidas de mitigación.
- Cálculo de los costos ambientales: Este módulo permite el cálculo de los costos ambientales, producidos por la influencia ambiente-salud.

En la figura 2 se muestra un esquema general del funcionamiento del sistema, a partir de todo lo comentado anteriormente.

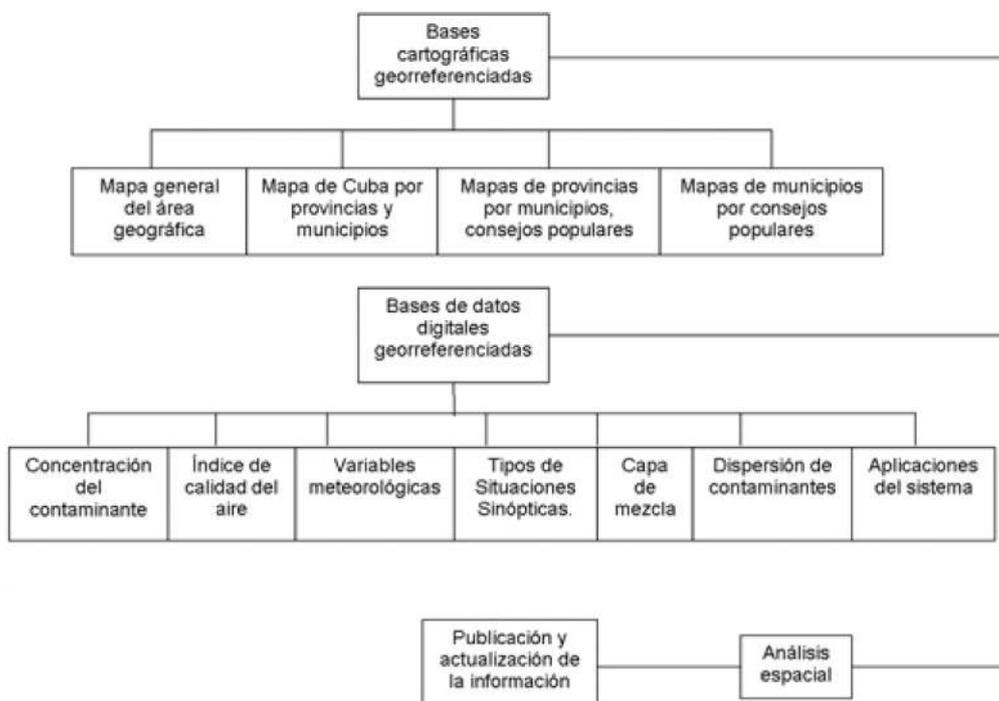


Fig. 2. Esquema general del funcionamiento del sistema.

Dentro de las tareas generales propuestas en el sistema se encuentran las siguientes:

- Determinación del estado de la calidad del aire, y el grado de cumplimiento de límites con respecto a los valores que establecía en las normas cubanas.
- Observación de la evolución de contaminantes en el tiempo.
- Observación de las variables meteorológicas y las condiciones sinópticas en el tiempo.
- Detección rápida de posibles situaciones de alerta o emergencia, así como llevar a cabo un intenso seguimiento de la evolución de la concentración de contaminantes. Aplicación del índice de calidad del aire establecido en las normas cubanas.
- Intercambio de información con los tomadores de decisiones.

Estas tareas permitirán mantener una observación constante de los valores de la contaminación atmosférica, así como de condiciones climáticas favorables para los episodios de acumulación de contaminantes, siendo la base del desarrollo de los pronósticos de la influencia de la contaminación atmosférica en las condiciones ambientales. Para lograr este objetivo primeramente se confeccionarán los siguientes mapas temáticos.

Condiciones meteorológicas:

- Variables meteorológicas.
- Tipo de situaciones sinópticas.
- Capa de mezcla.

Contaminación:

- Concentraciones de contaminantes.
- Índice de calidad del aire.
- Modelos de dispersión de contaminantes.

Con los mapas temáticos antes obtenidos se pasa a la realización del análisis espacial, con las diferentes opciones que da el sistema, como por ejemplo el procesamiento analítico jerárquico que permite la ponderación de las diferentes capas que se decidan objeto de análisis para la obtención de un mapa resultante. A continuación se detallan los diferentes análisis espaciales propuestos.

Análisis espacial de la contaminación atmosférica para el pronóstico de la misma a partir del cálculo de los mapas resultantes de los siguientes mapas temáticos.

- Condiciones meteorológicas favorables para la ocurrencia de episodios de contaminación.
- Concentraciones de contaminantes atmosféricos.
- Modelos de dispersión de contaminantes.
- Índice de calidad del aire.

Una vez realizados los análisis en el sistema los resultados obtenidos son puestos en manos de los tomadores de decisiones. Esta información debe llegar a los mismos en tiempo real, lo que permitirá que las medidas de mitigación sean tomadas en el menor tiempo posible, tanto en el caso de alguna emergencia ambiental o el propio pronóstico de la contaminación atmosférica en diferentes plazos de tiempo, en especial la alerta temprana de la misma.

Conclusiones

Los sistemas de información geográfica constituyen una herramienta eficaz para el análisis espacial de la información con vistas a la determinación de la influencia de la contaminación atmosférica sobre las condiciones ambientales y su alerta temprana.

Los análisis espaciales realizados en el SIG permiten poner en manos de los tomadores de decisiones una importante herramienta a la hora de la aplicación de medidas de mitigación en el menor tiempo posible, contribuyendo al mejoramiento del sistema de vigilancia ambiental

Recomendaciones

Implementar el Sistema de Información Geográfica a nivel municipal con vistas al aviso temprano ante emergencias ambientales.

Implementar a nivel provincial y nacional tanto el SIG como el pronóstico.

Bibliografía

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIALES (INPE). *Manual de operación de SPRING 4.0*. Brasil: 2004. (Licencia autorizada).

ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL (OMM). *Guía de prácticas climatológicas*. No. 100. Ginebra: 1990.

SNEYERS, R. *On the Statistical Analysis of Series of Observations*. Technical Note No. 143. WMO No. 145, pp. 192. Ginebra: 1990.

WHO. *Health and Environment in Sustainable Development. Five Years after the Earth Summit, Executive Summary*. Ginebra: junio, 1997.

Utilización de un sistema de información geográfica para realizar los estudios de impacto ambiental en la Empresa Eléctrica Provincial de Santiago de Cuba

Utilization of a Geographical Information System to undertake the environmental impact assessment in Santiago de Cuba Electric Utility

Por María Rodríguez Gámez, Alcides Mas Ruiz**, Alain Destrade Giraudy* y Lázaro Valentín Rabelo Parra****

** Dirección de Generación, José Antonio Saco No.166 % Corona y Padre Pico, Santiago de Cuba, Cuba.*

*** Organización Básica Eléctrica (OBE) Provincial, Calle 13, Carretera del Caney y 4to., Reparto Vista Alegre, Santiago de Cuba, Cuba.*

**** Unión Nacional Eléctrica (UNE), Salvador Allende No. 666, Santiago de Cuba, Cuba.
Tel.: (537) 657994.*

e-mail: mariarg@elecstg.une.cu

Resumen

En este trabajo se describe la utilización del Sistema de Información Geográfica (SIG) como herramientas de control de los emplazamientos con posibles impactos al medio ambiente de la Empresa Eléctrica Provincial (EEP) de Santiago de Cuba. Para lograr este objetivo se realizó un inventario de los posibles focos de contaminación en toda la provincia, para su mejor gestión del estudio; con ello se logra conocer de forma integral cuáles son los puntos donde se pueden provocar posibles afecciones al medio ambiente debido a la generación y transmisión de energía. El Sistema permite tener una base de datos para el control y realizar proyectos con programas de mitigación de CO₂ y otros contaminantes para cada zona donde se encuentren ubicados los grupos electrógenos y poder tener realmente producciones de energía más limpia. En la EEP de Santiago de Cuba se trabaja para lograr integrar en un SIG toda la información de la generación de energía por diferentes tecnologías, lo que ayudaría potencialmente a los estudios ambientales en las áreas próximas a cada sitio de posible afección. El SIG constituye una herramienta adecuada para los especialistas que estudian y controlan afecciones ambientales, porque se pueden hacer bases comparativas por años de los impactos provocados y trabajar en función del desarrollo de sistemas sostenibles y garantizar la protección del medio ambiente.

Palabras clave: Sistema de Información Geográfica, impacto ambiental.

Abstract

The paper describes the utilization of a Geographic Information System (GIS) as a control tool of the locations with possible environmental damage due to the activities of the Provincial Electric Utility (PEU) of Santiago de Cuba. In order to achieve this objective it was carried out an inventory of the possible sources of pollution in the whole province. This allows knowing about the possible locations of environmental problems due to the generation and transmission of electricity. The GIS enables to having a data base for the control and

accomplishing of projects with programs of mitigation of CO₂ and other pollutants for each zone where gen sets are located in order to produce cleaner energy. The PEU of Santiago de Cuba is working on integrating in a GIS all the information about the generation of electricity from different technologies in the province. This would potentially help to the environmental assessment in the areas nearby the sites with possible damages, because GIS are suitable tools for specialists that study and control environmental problems.

Keywords: Geographic Information System, environmental impact assessment

Introducción

Actualmente los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han pasado a ser una tecnología nueva en la información espacial, territorial y geográfica. En los últimos años se ha generado una creciente demanda del conocimiento de los mismos en los estudios relacionados con el medio ambiente y el territorio en su conjunto, con estos sistemas se logra la producción y almacenamiento de gran cantidad de datos geográficos para los estudios analíticos de los mismos y que pueden ser representados de forma espacial.

Estos sistemas son novedosos desde el proceso originario de producción de la información, única vía para garantizar la utilidad universal de la información, con los estudios realizados actualmente, existe un fuerte consenso científico que el clima global se verá alterado significativamente, en el siglo xxi, como resultado del aumento de concentraciones de gases invernadero tales como el dióxido de carbono, metano, óxidos nitrosos y clorofluorocarbonos. Estos gases están atrapando una porción creciente de radiación infrarroja terrestre y se espera que hagan aumentar la temperatura planetaria entre 1,5 y 4,5 °C. Como respuesta a esto, se estima que los patrones de precipitación global, también se alteren, aunque existe un acuerdo general para todos los países del mundo, hay una gran incertidumbre con respecto a las magnitudes y las tasas de estos cambios a escalas regionales [Wikipedia, 2008].

La producción de energía es cada día mayor con el ánimo, de crecer económicamente, en estos últimos años se han adoptados sistemas tecnológicos que inciden en el medio ambiente y por ende sobre los seres humanos. El uso irracional de la energía es otra forma de consumo desmedido que nos lleva a la sobreexplotación de los recursos que nos ofrece la naturaleza.

Por esta razón y conociendo las nuevas tecnologías introducidas en Cuba para mejorar las condiciones socio económicas de la población, se hace necesario tener un control de todos los posibles focos de contaminantes donde inciden los grupos electrógenos de emergencia, distribuida y otras instalaciones adscriptas a la OBE.

Emprender el camino de producciones más limpias con la aplicación continúa de una estrategia integrada de prevención a los procesos, productos y servicios con el objetivo de aumentar la eficiencia y reducir los riesgos a el medio ambiente con un sistema de Gestión Ambiental adecuado que contribuya al

mejoramiento del desempeño ambiental de los emplazamientos, resultando ser un elemento básico para el aseguramiento de la calidad de las producciones y los servicios.

La estrategia integrada debe estar encaminada a la solución de problemas existentes con las nuevas tecnologías, por lo que se deben realizar estudios integrales de sostenibilidad donde es de especial interés conocer las propiedades de los sistemas ambientales en los territorios donde se encuentran ubicados los grupos emergentes, siendo el SIG una herramienta adecuada para ello.

El desarrollo sostenible es el modelo de desarrollo que se pretende construir en el ámbito mundial, en general, para lograr el crecimiento económico, que trae consigo la introducción de nuevas tecnologías hay que tener en cuenta la capacidad de los sistemas ambientales y su asimilación a acciones transformadoras.

El sistema propuesto permite el monitoreo continuo del sistema energético y las posibles áreas de contaminación, esto servirá para evitar que se tomen decisiones incorrectas y propone un proceso de desarrollo integral donde se tenga en cuenta la incorporación del medio ambiente a todas las actividades socio-económicas.

Las acciones de la planificación e inventario además de ayudar a gestionar el medio ambiente permitirán una mejor toma de decisiones para las personas responsables que tendrán ubicadas las zonas de alto riesgo, siendo el sistema una herramienta fundamental que permitirá el mejoramiento del desarrollo social y ambiental futuro.

Hoy no se puede considerar el medio ambiente como algo aislado, es concebido como un elemento fundamental en la estrategia de desarrollo general nacional para promover el mejoramiento socioeconómico y medioambiental, teniendo en cuenta que se deben elegir y desarrollar las tecnologías adecuadas para el monitoreo y la disminución de los efectos de contaminación, esto ayuda a mitigar los efectos negativos al medioambiente y lograr un crecimiento equilibrado en el contexto de desarrollo de la provincia y nacionalmente.

El desarrollo sostenible, tiene que sustentarse en una sólida planificación energética, los niveles de bienestar tienen que aumentar y valores morales deben entrar en equilibrio; en armonía con la naturaleza y sus recursos; la manera más conveniente de trazar las relaciones que existen entre energía y desarrollo es recurrir al enfoque del ecosistema, donde este término se emplea para designar cualquier zona de la naturaleza que comprende organismos vivos y sustancias no vivas que ejercen una acción recíproca para producir un intercambio de materiales entre las partes vivas y las no vivas. Las ventajas de la aplicación de este concepto es que en él, se ponen de relieve los elementos que intervienen en el funcionamiento del mismo, sus interacciones, los flujos de

materiales, nutrientes y energías, y sobre todo las limitaciones ambientales de las actividades sociales y económicas junto con los impactos de estas al medioambiente.

La importancia de los SIG, permite crear una base de datos que potencia un modelo de desarrollo de crecimiento de nuevo tipo, donde el medio ambiente se encuentra integrado en los programas de desarrollo social y donde se potencien los procesos cíclicos naturales que pueden establecerse en nuestra sociedad; esta herramienta posibilita en un futuro implementarla como sistema para la planificación y toma de decisiones en lo referente al Sistema de Gestión Ambiental en La Empresa Eléctrica Santiago, por lo que en el trabajo se requiere integralidad de todas las UEB para el mejor manejo de la información, por lo que para obtener este resultado deben colaborar todas las Sucursales de la provincia.

Materiales y métodos

La información fue georeferenciada en un software profesional, con un ambiente integrador y donde se están ubicados por ahora, los grupos emergentes, de distribuida, algunas subestaciones, programa de forestación, transformadores todo ello utilizando información existente y se continua su digitalización. La herramienta fundamental es la PC Pentium IV.

Análisis y discusión de los resultados

Se preparó un mapa potenciado por los grupos del Despacho Eléctrico, Dirección de Generación, Grupo de Emergencia con salidas principales que ayudarán a una dirección estratégica para el sector energético y medio ambiental. El mapa se puede observar en la figura 1, donde aparecen algunos objetivos de interés para el estudio como son las plantas emergentes, grupos de distribuida y algunas subestaciones todos en el plano de la provincia.

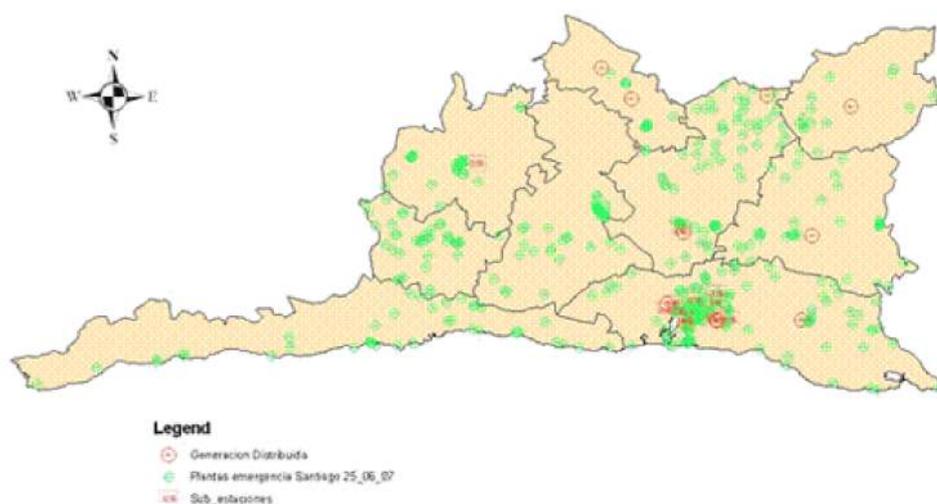


Fig. 1. Algunas instalaciones de interés en el estudio.

La imagen del mapa muestra la cantidad de focos contaminantes que existen en áreas urbanas y rurales, dispersos en todo el territorio, por lo que ahora los beneficios de la energía se revierten en un control y monitoreo riguroso de los impactos ambientales que estos pueden ocasionar los focos de incidencias, si no se tienen en cuenta las normas de explotación y vertimiento a los cuerpos receptores. Al encontrarse dispersos los sistemas, los impactos negativos al entorno también se encuentran dispersos y pueden ser los siguientes:

- Intensos ruidos (contaminación acústica).
- Drenaje inadecuado de los residuales tecnológicos y sociales.
- Desertificación de las áreas próximas a los emplazamientos y contaminación del manto freático por inadecuados procedimientos en el proceso tecnológico, aspectos que están referidos en las Normas del Medio Ambiente.

Se muestra en la figura 2, un gráfico que representa aproximadamente la cantidad de posibles focos de contaminación que podemos por el momento tener inventariados, estos en nivel de mapa podría conocer los posibles impactos provocados a las poblaciones cercanas, fauna, flora, ríos, etcétera.

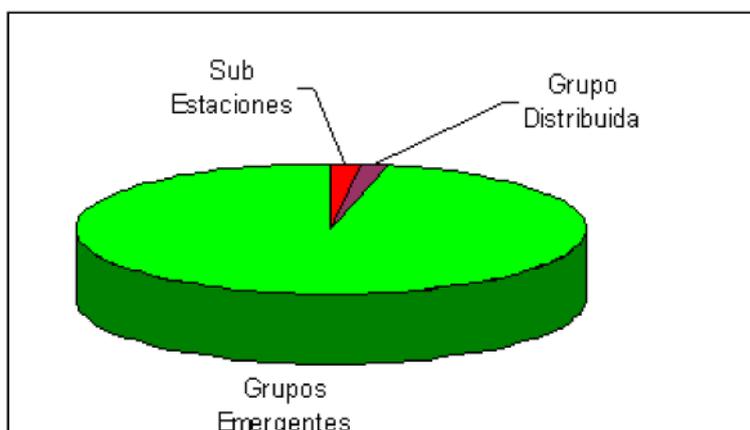


Fig. 2. Posibles focos de contaminantes.

Como se puede apreciar los grupos emergentes que representan la mayoría de las instalaciones actualmente, han resuelto uno de los problemas más importantes de la Revolución energética relacionado con la vitalidad de objetivos económicos y sociales priorizados, provocan un incremento de los focos de contaminación en la provincia.

Los emplazamientos de distribuida son objetivos de alta prioridad en el control de la contaminación debido a que son altos emisores de efectos contaminantes, por el uso en su proceso tecnológico de mayor cantidad de combustible y lubricantes, además de emisiones de ruidos intensos que no solo afectan al entorno social, sino a la fauna próxima a estos emplazamientos y las subestaciones que se encuentran aledañas a los emplazamientos dentro de la sub hay ruidos intensos que están por encima de las normas permisibles por la OMS.

En la figura 3, a modo de ejemplos, se aprecian fotos de focos de contaminación asociados a emplazamientos de distribuida, esto es preliminar debido a que estos elementos se pueden incluir dentro del mapa en forma poligonal y hacer monitoreos periódicos y planificados para realizar estudios en su comportamiento, y da la medida de los posibles proyectos de mitigación de las afecciones, esto puede realizarse con los demás objetivos. En el mapa se pueden visualizar todos los elementos cartográficos permitiendo conocer el entorno afectado en el orden territorial.



Fig. 3. Fotos asociadas a los objetivos.

El sistema de información constituye una herramienta apropiada para el manejo y control del umbral informático relacionado con el medio ambiente y vinculado con otros subsistemas existentes en bases de datos creadas en capas diferentes y que pueden ser superpuestas lográndose la interconexión adecuada de los sistemas, que pueden ser de diversos temas e intereses (carreteras, ríos, ciudades, asentamientos poblacionales, líneas eléctricas, bosques, etcétera).

Conclusiones

1. Se creó una base de datos utilizando el SIG, como herramientas para el monitoreo y control de los posibles impactos al medio ambiente de la Empresa Eléctrica Provincial de Santiago de Cuba, como consecuencia del proceso tecnológico de la generación de energía.
2. Con la base de datos obtenida se ponen en práctica los programas de mitigación para las producciones de energía más limpias logrando la información por años de los impactos y trabajar en función del desarrollo de Sistemas sostenible garantizando la protección del medioambiente.

Recomendaciones

1. Generalizarlo en todo el país.

Bibliografía

Wikipedia. Calentamiento global. 2008.

Planificación energética. Evaluación sinóptica de la relevancia ambiental. Humanity Development Library/gsd/html/env/envsp/vol 116.htm. Diciembre, 1999.

En busca del desarrollo sostenible ABSTRACT No. 1. Aproximaciones al enfoque. Unidad de Comunicación e Información-CIED.

OLADE. *Aspectos generales de balances energéticos*. Quito: OLADE, 1987.

QUINTELA, J. «El inventario, el análisis y el diagnóstico geoecológico de los paisajes mediante el uso de los SIG». Tesis para la obtención del grado de Doctor, Facultad de Geografía, Universidad de La Habana, 1995.

REYES ARTILES, G. «Diseño de un Sistema de Información Geográfica para la cuenca del río Máximo, provincia de Camagüey». Tesis para la obtención del grado de Master, Facultad de Geografía, Universidad de La Habana, 2001.

Ley No. 81 del Medio Ambiente, en *Gaceta Oficial de la República de Cuba*. La Habana, MINJUS, 1997.

Contaminación atmosférica resultante del proceso productivo en el Centro de Investigaciones Siderúrgicas

Atmospheric pollution as a result of the production process at the Center of Siderurgy Research

*Por Jesús Ernesto Rodríguez García, José Aníbal Trotman Gavilán
Manuel de la Fuente Fernández y Ramón Mena Guzmán.
Tel.: 96827, ext.121.
e-mail: jesuse@dsit.cu*

Resumen

En el presente trabajo se realiza un estudio de la contaminación creada por las partículas totales en suspensión (PTS), presentes en las emisiones a la atmósfera producto del proceso productivo del Centro de Investigaciones Siderúrgicas (CIS), como premisa para conocer su desempeño ambiental. Se definen las principales fuentes de contaminación que afectan el entorno de la planta de producción, se definen los parámetros y se caracterizan mediante indicadores propuestos, que definen las características físicas de los contaminantes. Se realiza una valoración semicuantitativa de la influencia de los principales factores climatológicos en la dispersión de los contaminantes emitidos a la atmósfera y se definió su distribución espacial, así como la interrelación del proceso de propagación con la ubicación físico-geográfica de la planta y su entorno. Por último, los resultados alcanzados se comparan con los valores establecidos por normas cubanas e internacionales, y con resultados presentes en la bibliografía especializada, y se sigue un conjunto de métodos y/o técnicas que tributan al diseño del Sistema.

Palabras clave: Contaminación atmosférica, partículas totales en suspensión, calidad del aire.

Abstract

In the present paper we describe a study of the pollution created by the total suspended particles (PTS, in Spanish), of the atmospheric emissions of the iron and steel production processes at the Center of Siderurgy Research (CIS, in Spanish), as a premise to assess its environmental performance. The main sources of pollution that affect the surroundings of the production plant are specified; we define the parameters and characterize them by means of proposed indicators that define the physical characteristics of the pollutants. A semi-quantitative assessment of the influence of the main climatological factors number on the dispersion of the pollutants emitted to the atmosphere and their spatial distribution was defined, as well as the interrelation of the process of propagation with the position of the plant and its surroundings. Finally, the results attained are compared with the values stated by the Cuban and international standards, with the results found in the specialized bibliography

and we follow a set of methods or techniques that contribute to the design of the system.

Keywords: Atmospheric pollution, total suspended particles, air quality

Introducción

La principal fuente de contaminación de la atmósfera son las instalaciones industriales. Una gran cantidad de los desechos industriales están formados por polvos.

Los polvos se pueden clasificar en atmosféricos e industriales. El polvo industrial se forma como resultado de los procesos productivos. El polvo atmosférico incluye al industrial y el polvo, que surge por las tormentas de polvo del desierto, las cenizas de incendios y erupciones volcánicas etc.

La protección de la atmósfera de la contaminación se le presta una atención especial por la comunidad internacional. En la mayoría de los países están establecidos los límites permisibles de emanaciones de sustancias nocivas a la atmósfera y al medio laboral.

El cumplimiento del límite de concentración permisible (LCP), exige el control sistemático respecto al contenido real del polvo en los gases industriales emitidos a la atmósfera. Dicho control permite garantizar los parámetros de protección e higiene normados, tener en cuenta el nivel de limpieza necesario para proteger la tecnología, conocer el desempeño ambiental de la organización, etcétera.

Para reducir al mínimo la contaminación por polvo existen diferentes modos y esta disponible, en el mundo, la tecnología adecuada para tales propósitos. La selección del dispositivo filtrante más adecuado se hace en función de la composición y la distribución granulométrica del polvo (material particulado), generado por el proceso productivo.

Como hemos señalado anteriormente, la contaminación industrial esta caracterizada por el vertido de los contaminantes al medio ambiente. Sin embargo el medio ambiente esta compuesto por diferentes elementos o componentes, entre los cuales se encuentra la atmósfera.

En este contexto es necesario señalar lo siguiente:

- Existen muchos contaminantes en el aire. En el caso del proceso en estudio, una causa de generación de los mismos es la combustión incompleta en el proceso de obtención de calor para el secado de la materia prima; las impurezas del combustible, una inadecuada relación aire-combustible o temperaturas de combustión incorrectas son causas de formación de productos secundarios(contaminantes), como; monóxido de carbono, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, cenizas finas e hidrocarburos no quemados, todos presentes en los gases emitidos a la atmósfera.
- La presencia de material particulado en la contaminación atmosférica y en el aire ambiente del área de trabajo es generado fundamentalmente

por los procesos mecánicos (secado, trituración, cribado etc.), que definen la actividad productiva, y porque no existe un sistema de manejo del material particulado.

- El presente trabajo se refiere específicamente al estudio de la contaminación por polvo en suspensión (material particulado en suspensión) sobre el componente ambiental atmósfera, para lo cual es necesario especificar, las fuentes significativas que emiten contaminantes a la atmósfera y definir los parámetros o indicadores adecuados que permitan medir su comportamiento a través del tiempo.

El Centro de Investigaciones Siderúrgicas (CIS) surge como planta piloto para las investigaciones preliminares del proyecto de la Siderurgia del norte de Oriente. Al demostrarse la inviabilidad del mismo, la planta piloto devino centro de Investigación-producción. Por una parte se utilizaba la antigua planta piloto para la investigación de los residuos minerales del proceso Carón del níquel, por otra se instala una planta de preparación mecánica de minerales, destinada a la clasificación y molienda de diferentes tipos de carbón. Este proceso productivo genera diferentes impactos que actúan sobre factores ambientales, alterando su estado normal, entre los cuales podemos destacar como más significativo; la generación de polvo.

No se ha encontrado datos en la literatura que puedan usarse para conocer la cantidad de polvo emitido en una instalación como la de estudio, ya que ésta depende, entre otros factores, del grado de trituración y de las características técnicas de la instalación.

Sin embargo aceptando las evidencias que aporta la observación y otras técnicas utilizadas para la identificación de impactos y fuentes generadoras de contaminantes al aire, y teniendo en cuenta que la instalación procesa un promedio de hasta 10 000 toneladas al año de carbón de diferentes granulometrías, que existen serias limitaciones en el diseño del sistema para la captación de polvo, etc., se puede pensar que un porcentaje mínimo de emisiones de polvo contaminaría el ambiente laboral, los suelos y la vegetación en el entorno de la instalación, y que en presencia de condiciones favorables afectará a la zona aledaña.

En Cuba, el Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente (CITMA) ha concebido, dentro de sus objetivos estratégicos en la esfera del medio ambiente, el fortalecimiento del Sistema de Control y Gestión Ambiental en correspondencia con los problemas y necesidades nacionales y territoriales.

En consecuencia con dichos objetivos, resulta necesario elevar la gestión ambiental a un plano superior en el nivel empresarial. En términos prácticos significa el diseño e implantación de Sistemas de Monitoreo de los aspectos ambientales de las entidades que tributen al Sistema Nacional de Monitoreo Ambiental (SNMA).

En este contexto el Ministerio de la Industria Sidero-Mecánica y la Electrónica (SIME), del cual forma parte el CIS, ha implantado una estrategia para poder abordar y solucionar los problemas de agresión ambiental existentes en sus

centros y empresas productoras para lo cual ha identificado entre sus principales problemas: la carencia de sistemas de monitoreo de afluentes y desechos en las entidades.

Esto ha conllevado a que dentro de los principales lineamientos y acciones de la política ambiental del SIME estén: la caracterización y monitoreo de las emisiones a la atmósfera de las industrias altamente contaminantes.

Calidad del aire: Es necesario señalar que la contaminación del aire es definida como cualquier condición atmosférica, en que las sustancias presentes producen un efecto adverso medible en la salud del ser humano, de los animales y vegetales, o un daño físico en los materiales. Los niveles o categorías de la contaminación de la atmósfera (Calidad del Aire) son caracterizados por las concentraciones de las sustancias contaminantes en espacio y tiempo, dadas en mg/m³ a temperatura y presión normalizadas (TPN) (NC 111:2002).

Material particulado: El material particulado se divide frecuentemente en diferentes clases, que incluyen polvo fino (menor que 100 µm de diámetro), polvo grueso (más de 100 µm de diámetro), vapores (0,001-1 µm de diámetro) y neblinas (0,1-10 µm de diámetro). El material particulado de acuerdo al tamaño tiene una vida media en suspensión que varía desde unos cuantos segundos hasta varios meses. Las partículas entre 0,1 y 1 µm tienen velocidades de asentamientos pequeñas. Las partículas mayores que 1 µm tienen velocidades de asentamientos significativas pero aún pequeñas. Las partículas por encima de 20 µm tienen grandes velocidades de asentamientos y se eliminan del aire por gravedad fundamentalmente.

Dentro de los contaminantes atmosféricos importantes que se monitorean comúnmente están: los sólidos totales en suspensión PST (menor que 100 µm de diámetro), partículas en suspensión de ≤ 10 µm de diámetro aerodinámico PM10 (polvo fino, fracción respirable) y las partículas con 2,5 micrómetros o menos de diámetro aerodinámico PM2,5 (polvo fino, fracción respirable). La razón fundamental de esta especificación se debe a que las partículas más pequeñas son más peligrosas para la salud de los seres humanos porque son capaces de alcanzar la zona inferior de los pulmones.

Objetivo general

Desarrollo del Sistema de Monitoreo de la calidad del aire del CIS.

Objetivos específicos

Como objetivos específicos se plantearon los siguientes:

1. Precisar cualitativa y cuantitativamente la influencia negativa de la contaminación producida por la actividad productiva del CIS, sobre el componente ambiental «atmósfera» en el entorno de la planta de producción.
2. Establecer y/o definir los parámetros (indicadores ambientales), que permitan monitorear los impactos ambientales producidos por el material particulado en suspensión, emitido a la atmósfera, generado por el proceso productivo del CIS.
3. Evaluar la conformidad de las operaciones que conforman el proceso

productivo en cuanto a los patrones y normas establecidos para el control de los contaminantes (material particulado en suspensión).

4. Definir el proceso de dispersión que sufren los contaminantes (material particulado), emitidos a la atmósfera.

Materiales y métodos

A lo largo del trabajo se desarrolla un proceso de elaboración metodológica, que finalmente culmina en el diseño del Sistema de Monitoreo.

La metodología aplicada para el muestreo, mediciones y análisis de los contaminantes (material particulado), esta basado en la literatura especializada, los Objetivos Estratégicos del CITMA en la Esfera del Medio Ambiente, las resoluciones contenidas en el Sistema Nacional de Monitoreo Ambiental (SNMA), y la investigación desarrollada en el cuerpo de la tesis. Entre los métodos utilizados se encuentran:

1. Técnicas de identificación y medición de los impactos producidos por el polvo de carbón (material particulado) emitido a la atmósfera. Para la identificación de los elementos impactantes (acciones) y de las variables ambientales impactadas se emplean un grupo de herramientas de gran valor para la toma de las decisiones tales como: encuestas (realizadas en la comunidad aledaña al Centro), método de las matrices causa-efecto, encuentros con expertos de temas de los residuales y medioambientales.
2. Modelo físico-matemático para el cálculo de la dispersión de polvo de carbón en la atmósfera: Los modelos de dispersión permiten calcular la concentración de contaminantes a nivel del suelo y a diversas distancias de la fuente, sirven para predecir como los contaminantes se dispersan en la atmósfera, determinar zonas de influencia de los mismos y puntos donde debe realizarse su monitoreo. Para aplicar el modelo del transporte y dispersión de contaminantes del aire es necesario recopilar información del punto de emisión (altura, contaminante emitido etc.) y de los factores meteorológicos.
3. Selección de los parámetros a monitorear: En el monitoreo de emisiones a la atmósfera, se pueden medir varios parámetros, la selección de estos dependerá de los objetivos del monitoreo, de los insumos utilizados, de la tecnología empleada, para lo cual se seleccionarán los indicadores más importantes, en nuestro caso se evalúa la información existente sobre el proceso de producción, además se parte de los indicadores establecidos por el CITMA a través del Sistema Nacional de Monitoreo Ambiental para caracterizar la calidad del aire y los utilizados por otras entidades.

Los gases de combustión (arrastrando el polvo), del proceso de preparación mecánica del carbón son colectados y conducidos por ductos y emitidos a la atmósfera a través de la única chimenea (altura 20 m, diámetro 0,30 m), existente. Los parámetros definidos para el caso de la Chimenea son: Caudal, PTS y PM10. La elección esta en correspondencia con el alcance de este trabajo.

4. Principios de selección de los sitios de muestreo: Para la elección de los puntos de muestreo en esta zona se tiene en cuenta las características de las fuentes emisoras, la concentración de los agentes contaminantes en las emisiones de combustión procedentes del proceso y lo definido en el punto 2.

5. Método de muestreo del material particulado emitido a la atmósfera en el proceso de producción del CIS: El método escogido para el muestreo clasifica dentro de los métodos basados en la sedimentación preliminar, los mismos permiten determinar la concentración másica del polvo elemento indispensable para establecer los niveles de contaminación existentes. La muestra resultante de su aplicación da la posibilidad de determinar la composición granulométrica del polvo recolectado (material particulado), elemento importante para el cumplimiento de los objetivos trazados en el trabajo.

El equipo utilizado consta de un tubo muestreador (simbol) que sirve para la toma de muestras. Las muestras se toman in situ en un orificio situado en la chimenea por el cual se introduce el equipo para poder determinar la concentración del material particulado emitido a la atmósfera, lo cual se realiza tomando el peso del simbol antes y después de la toma de muestra. Además consta de un medidor con conectores de plástico; la escala de lectura es en pulgadas de agua y de pies por minutos, (tubo pitot de 8 pulgadas), termómetro y medidor de caudal.

Para el muestreo se consideran los siguientes elementos: concentración del material particulado, condiciones del proceso, medición de la velocidad y flujo de gases y medición de la temperatura de los gases de salida. La metodología empleada corresponde a la instrucción para trabajos peligrosos SDT-CC-I-06 "Determinación de Pérdidas de Polvo". Implantado por el Sistema de Gestión de la Calidad (SGC) de la empresa del Níquel Rene Ramos Latour de Nicaro.

El caudal en la chimenea se determina a través del registro de velocidades utilizando un manómetro tipo U y tubo pitot. El tiempo de muestreo se determina en 30 min: NC 39: 1999. Calidad del aire. Requisitos higiénico-sanitarios.

6. Método de caracterización granulométrica del polvo de carbón emitido y determinación de las concentraciones: Hasta este punto se identifican y definen las fuentes generadoras de la contaminación en el área de estudio, los sitios de muestreo y la recolección de muestras representativas de la contaminación. Ahora queda por definir los métodos para determinar las concentraciones de los contaminantes (polvo en suspensión), en las emisiones y las características granulométricas de los mismos, teniendo como premisas: las características del contaminante, su estado físico, el cumplimiento de los objetivos trazados y posibilidades objetivas de acceso a las técnicas.

El más conveniente, por lo fácil de su aplicación, precisión de los resultados y estar disponible para el CIS, es el método de difracción láser.

Desarrollo

Resultado del diagnóstico del estado de la calidad del aire en el CIS

Utilizando las técnicas de identificación y medición de los impactos (encuestas a la población aledaña, método de la matriz causa-efecto, entrevistas con expertos sobre el tema), se pudo determinar las principales acciones e impactos generados por el proceso productivo del CIS.

Acciones impactantes más significativas (fuentes generadora):

Contaminación en el área de secadero. En esta zona se genera polvo en la descarga del material secado a la banda transportadora, incrementando el riesgo de enfermedades respiratorias por la cantidad de polvo (material particulado), en suspensión en el área laboral.

Trituración y cribado

El proceso de preparación mecánica del CIS consta de las operaciones de secado, trituración y cribado por tamaños sobre la materia prima: coque metalúrgico y/o carbón antracita. Esta es una de las operaciones fundamentales que más aporta a la contaminación del ambiente laboral.

La trituración del carbón se realiza en una trituradora de cono, la cual se conecta a una instalación de cribado que retiene las partículas de tamaño superior a las especificaciones que se desean obtener para que vuelvan a ser trituradas, las partes mencionadas integran el equipo CMD-271. Las partículas de tamaño adecuado son recogidas en una tolva intermedia de donde son llevadas al área de ensacado por bandas transportadoras. Durante todo este proceso es donde hay una mayor generación de polvo, que impactan directamente el medio ambiente laboral y la zona aledaña al proceso y donde no existe un sistema para aspirar el polvo generado por el equipo. Contaminación por los transportadores de banda.

Los transportadores de banda presentes en el proceso productivo, al no estar hermetizados, también generan emisiones de polvo que ayudan a incrementar la contaminación general. Además la auto trituración del material producto del frotamiento entre los pedazos de carbón, los choques contra las paredes de los equipos (tolvas y secadero). Todo lo anterior contribuye al incremento de la generación de polvos.

Contaminación de polvo en los gases de combustión

El polvo contenido en los gases de combustión tecnológicos y de ventilación del proceso de preparación mecánica de minerales emitidos a la atmósfera, contienen una cantidad no determinada de material particulado. De acuerdo con su formación y características físico- químicas clasifican como polvos mecánicos.

Las partículas del polvo mecánico son relativamente grandes: de unos micrones a unas decenas de micrones. Por su composición química y de fase el polvo mecánico es muy similar al material de carga o entrada. La emisión de

partículas sólidas en suspensión en los gases de combustión también se forman como consecuencia del calentamiento del carbón en pedazos dentro del horno lo que provoca que el material se agriete y se desmenuce, provocando que halla una disminución en el tamaño medio de los pedazos de carbón y un aumento de los polvos en sus diferentes clasificaciones los cuales son arrastrados por el aire proveniente del Ventilador de tiro forzado y emitidos a la atmósfera.

La emisión admitida de partículas sólidas en suspensión en los gases de combustión debe ser inferior a 100 mg/m³. Su separación se consigue por los métodos bien conocidos como son los ciclones, filtros de mangas, electrofiltros, etcétera.

Impactos más significativos

Los impactos más significativos que actúan sobre el medio ambiente se relacionan a continuación:

- Generación de polvo de carbón en el proceso de cribado y trituración de la materia prima, que contamina fundamentalmente el medio laboral y eventualmente la zona cercana a la planta.
- Contaminación del aire en el medio laboral producto de la generación de polvos por salideros y falta de hermeticidad.
- Contaminación laboral por el polvo generado en la transportación por la banda y en las descarga de la misma (descarga en la zona de embase, descarga a la banda en la salida del secadero).
- Contaminación del aire atmosférico por la emisión por chimenea de polvo.
- Deterioro de la flora por la deposición de grandes cantidades de polvo sobre el suelo en zonas cercanas a la planta de producción.

Análisis de la dispersión de contaminantes (material particulado), en la atmósfera

Factores claves en la posible distribución y magnitud de la contaminación en el entorno de la Planta de producción lo constituyen en primer lugar el tamaño de las partículas presentes en las emisiones, las condiciones físico-geográficas de su ubicación, el régimen de vientos existente en la zona etc. Para el análisis de la dispersión se parte de las condiciones del clima, debido a la influencia determinante que poseen sobre los resultados del modelo.

La determinación de la contaminación atmosférica se realiza a escala local (NC 111: 2002) En esta escala la dispersión de los contaminantes depende fundamentalmente de las características climáticas: velocidad y dirección del viento la temperatura ambiente y los parámetros que definen la fuente emisora.

Se realizaron estimaciones de la dispersión de los contaminantes tanto para el carbón para insuflado como para el de ajuste, principales productos finales del proceso productivo. Para el cálculo de la concentración máxima y la distancia

entre la fuente (chimenea), y el punto donde se ubica esta, se utilizó un programa en MICROSOFT EXCEL 2002, confeccionado por el grupo de calidad del aire del departamento de Física y el Centro de estudios del Medio Ambiente del ISMM Antonio Núñez Jiménez, de Moa, basado en el algoritmo de cálculo contenido en la norma cubana NC 93-02-202: 1987. Requisitos higiénicos sanitarios: Concentraciones máximas admisibles, altura mínima de expulsión y zonas de protección sanitaria.

Como resultado de la modelación se obtuvo el perfil de las concentraciones del contaminante a nivel del suelo, según la línea central en la dirección predominante del viento y condiciones climáticas desfavorables, para los procesos de obtención de carbón para insuflado y carbón para ajuste respectivamente (Figs. 1 y 2).

Dispersión de contaminante en la atmósfera en el proceso de obtención de carbón para insuflado

Teniendo en cuenta las características del proceso de obtención de carbón de insuflado se obtienen los siguientes resultados.

La concentración máxima se obtiene a 41 metros de la fuente ($19,51 \text{ mg/m}^3$), superando lo estipulado por la norma cubana (NC 93-02-202: 1987), que es de $0,15 \text{ mg/m}^3$. Además según nuestro modelo teórico la contaminación, por polvo, supera lo estipulado, para el caso de la producción de carbón para insuflado, hasta una distancia de 1 171 m en la dirección predominante del viento.

Tabla 1. Parámetros para el cálculo de la dispersión de partículas bajo condiciones desfavorables. Carbón para insuflado

Parámetros	Símbolo	Unidad	Valor
Constante de estratificación térmica atmosférica.	A	-	200
Flujo máximo de la sustancia contaminante	M	g/s	21,31
Coefficiente de precipitación del contaminante.	F	-	3
Parámetro (f)	f	Ms-2 °C-1	0,76
Coefficiente de condición de emisión (m)	m	-	0,94
Velocidad específica	Vm	m/s	0,67
Coefficiente de condición de emisión (n)	n	-	1,83
Altura de la chimenea	H	m	20,00
Temperatura del gas	Tg	°C	70,00
Temperatura del aire	Ta	°C	24,00
Diferencia de Temperatura $\Delta T = Tg - Ta$	ΔT	°C	46,00
Caudal total de la mezcla de aire y gas	V	m^3/s	0,48

Diámetro de la boca de la chimenea	D	m	0,30
Velocidad de salida de la mezcla de gases y aire	W	m/s	6,81
Concentración Máxima	Cm	mg/m ³	19,51
Velocidad Critica del viento	Um	m/s	0,67
Distancia desde la Chimenea al punto donde Cm	Xm	m	41
Coeficiente (do)	d ₀	-	0,50
Coeficiente (d)	d	-	4,18

Leyenda:

- Datos físicos de la chimenea; altura (H); diámetro de la boca (D).
- Parámetros utilizados para el cálculo, tomados de la NC 93-02-202: 1987 e incluidos en el programa de cálculo; constante de estratificación; (A) coeficiente de precipitación del contaminante en el aire (F); parámetro (f); Coeficientes de condiciones de emisión a la atmósfera de la mezcla de gases y aire (m) y (n); Velocidad Critica del viento (Um); Distancia desde la Chimenea al punto donde Cm es máxima (Xm); Coeficiente (do); Coeficiente (d).
- Datos obtenidos en la metodología de toma de muestra; flujo máximo de la sustancia contaminante expulsada al aire (M); Velocidad específica del contaminante (Vm); Temperatura del gas (Tg); Temperatura del aire (Ta); Diferencia de Temperatura $\Delta T = Tg - Ta$; Caudal total de la mezcla de aire y gas (V); Velocidad de salida de la mezcla de gases y aire (W).
- Datos calculados por el programa; concentración máxima (Cm); distancia desde la chimenea al punto donde Cm (Xm).

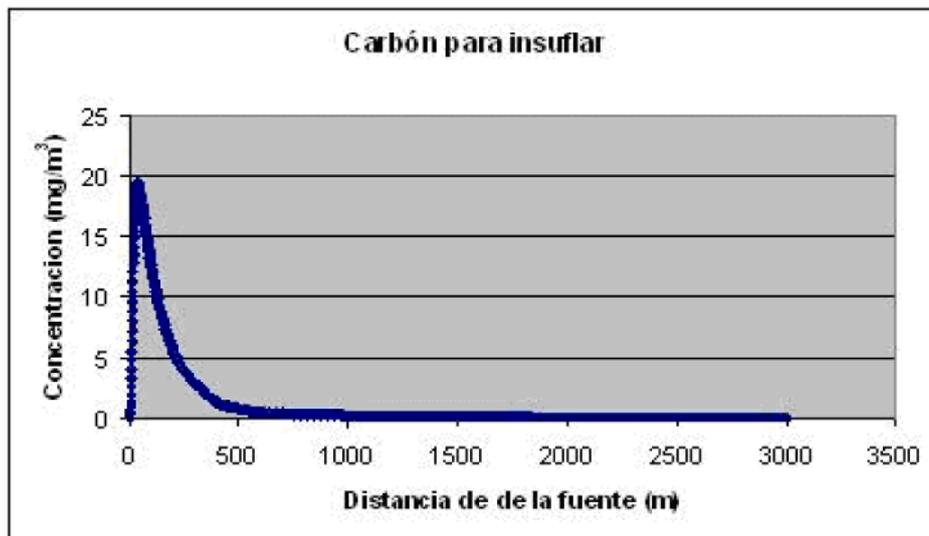


Fig. 1. Concentración de polvo emitido por chimenea según NC 93-02-202: 1987.

Dispersión de contaminante en la atmósfera: carbón para ajuste

Teniendo en cuenta los datos característicos del proceso para obtener **carbón para ajuste** se obtiene los siguientes resultados.

La concentración máxima de contaminantes (PTS), se obtiene a 48 m de la fuente ($57,83 \text{ mg/m}^3$), superando lo estipulado por la norma cubana que es de $0,15 \text{ mg/m}^3$. Además según nuestro modelo teórico la contaminación, por polvo, supera el límite establecido, hasta una distancia de 2 521 m, en la dirección predominante del viento (Fig. 2).

Tabla 2. Parámetros para el cálculo de la dispersión de contaminantes bajo condiciones desfavorables. Carbón para ajuste

Parámetros	Símbolo	Unidad	Valor
Constante de estratificación	A	-	200
Flujo máximo	M	g/s	75,86
Coefficiente de precipitación	F	-	3
Parámetro (f)	f	$\text{Ms}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	0,22
Coefficiente de condición de emisión (m)	m	-	1,08
Velocidad específica	Vm	m/s	0,83
Coefficiente de condición de emisión (n)	n	-	1,63
altura de la chimenea	H	m	20,00
Temperatura del gas	Tg	$^\circ\text{C}$	130,00
Temperatura del aire	Ta	$^\circ\text{C}$	24,00
Diferencia de Temperatura $\Delta T = Tg - Ta$	ΔT	$^\circ\text{C}$	106,00
Caudal de la mezcla de aire y gas	V	m^3/s	0,40
Diámetro de la boca de la chimenea	D	m	0,30
Velocidad de salida	W	m/s	5,60
Concentración Máxima	Cm	mg/m^3	57,83
Velocidad crítica del viento	Um	m/s	0,83
Distancia desde la chimenea al punto donde Cm	Xm	m	48,00
Coefficiente (d)o	d _o	-	0,50
Coefficiente (d)	d	-	4,81

Leyenda:

Se aplica lo expuesto en la leyenda de la tabla 1, con los datos obtenidos para el caso de la obtención de carbón para ajuste.

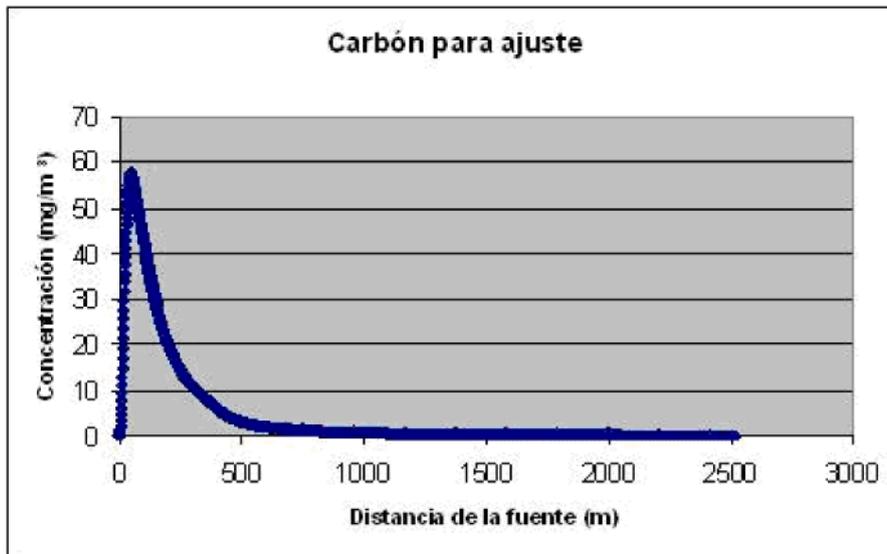


Fig. 2. Concentración de polvo emitido por chimenea según NC 93-02-202: 1987.

La información obtenida hasta aquí es de gran ayuda para la evaluación del impacto de los contaminantes a la atmósfera, pero no resuelve el problema de la definición de la distribución espacial de este, así como la interrelación del proceso de propagación con la ubicación físico-geográfica de la planta y su entorno.

Para dar solución a esta problemática se utilizó la información de los vientos dada por rumbos atendiendo a la frecuencia de ocurrencia y a la velocidad media histórica. En la tabla 3 se brindan los parámetros utilizados. Con esta información se realizó el cálculo del factor eólico para tantos perfiles de concentración (10 KM) como rumbos de vientos utilizados y se regularizó una rejilla con paso 3x3 m con el empleo de un interpolador Krigging (Fig. 3.1).

Tabla 3. Parámetros de viento utilizados para el cálculo del factor eólico

Rumbo	Frecuencia, %	Velocidad media, km/h
N	1	21
NNE	14	20
NE	18	20
ENE	22	26
E	8	22
ESE	6	18
SE	4	14
SSE	1,3	14
S	1	1

SSW	0,9	0,3
SW	1,5	0,1
WSW	4	0,1
W	5	0,1
WNW	2,5	0,2
NW	1	0,1
NNW	2	0,5

Para el cálculo de la sombra topográfica (líneas de visibilidad) se empleó el Modelo Digital del Terreno MDT elaborado por la Agencia de Investigaciones Regionales de GEOCUBA. Esta información es valiosa pues permitió definir el límite de propagación de los contaminantes atendiendo a la barrera que produce el relieve y que evita la mayor propagación de este; no obstante las zonas aledañas a esta pudieran estar seriamente afectadas por las partículas emitidas. Con una línea gruesa de color marrón se representó en la figura 3.1 una barrera muy próxima a la isolínea de concentración igual a $0,15 \text{ mg/m}^3$.

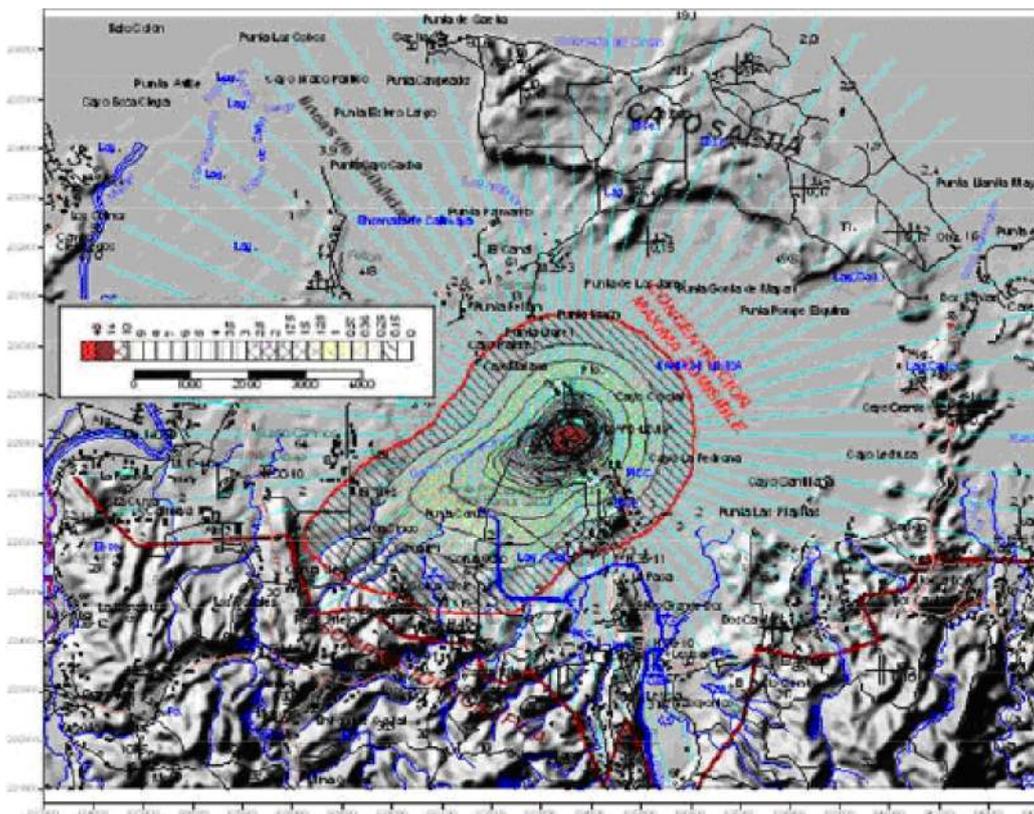


Fig. 3.1. Mapa de dispersión de contaminantes en las zonas aledañas.

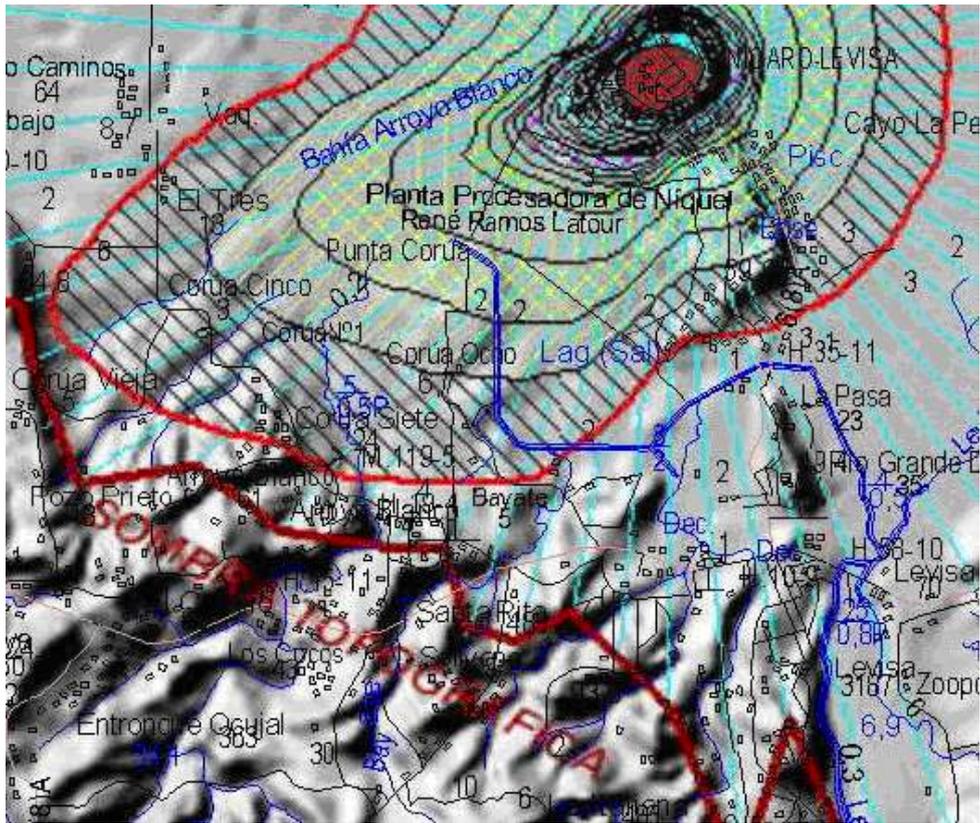


Fig. 3.2. Ampliación de la figura III.5. Muestra las zonas más afectadas.

Cálculo de las concentraciones y caracterización granulométrica del polvo generado por el proceso productivo del CIS

Concentraciones del polvo en las emisiones por chimenea.

Fueron tomadas dos muestras según la metodología descrita en el punto 5 (Materiales y métodos).

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Parámetros de la fuente principal de emisión de partículas a la atmósfera y resultados de la toma de muestra

Producto	Fuente	Altura, m	Diámetro, m	Temp. gases de salida, oC	Flujo total, m ³ /min	Muestra, g
Carbón ajuste	Chimenea	20	0,30	70	28,85	13,3094
Carbón insuflado	Chimenea	20	0,30	130	23,72	57,1864

Se obtuvieron dos muestras representativas: una por cada producto final obtenido en la planta.

A cada muestra se le realizó un análisis por el método de Difracción de rayos láser para determinar las características granulométricas. Se determinaron las concentraciones del material particulado en los siguientes rangos: $\leq 5,00 \mu\text{m}$; $\leq 10 \mu\text{m}$; $\leq 50 \mu\text{m}$ (Tabla 5).

Tabla 5. Concentración de las muestras de polvo emitidas a la atmósfera para cada producto obtenido. Resultados del análisis granulométrico

No	Lugar de muestreo	Material particulado				
		Tipo de producto	Concentración emitida, mg/m^3	$\leq 5 \mu\text{m}$, %	$\leq 10 \mu\text{m}$, %	$\geq 20 \mu\text{m}$, %
1	Chimenea	Carbón para insuflar (antracita)	191 914,78	6,45	13,28	71,61
2	Chimenea	Carbón para ajuste (coque)	44 308,26	11,90	21,70	54,77

Proceso de obtención de carbón para insuflar: Análisis de los resultados

- El polvo emitido a la atmósfera posee una concentración de $191\,914,78 \text{ mg}/\text{m}^3$ resultado que supera con creces lo admitido internacionalmente ($100 \text{ mg}/\text{m}^3$; Banco Mundial) (Tabla 5).
- Lo anterior representa para nuestro proceso, teniendo en cuenta el tiempo de operación, pérdidas de 8% del material alimentado.
- La producción de carbón para insuflar asciende como promedio a las 3 200 TM al año, de acuerdo a las pérdidas mencionadas, representan 256 TM/año de polvo de diferentes granulometrías emitidos a la atmósfera.
- Según los resultados del análisis granulométrico 13,28% de las partículas que conforman las 256 TM de polvos emitidas a la atmósfera al año clasifica como PM10. Esto representa la emisión de 34 TM de polvos finos o fracción respirable a la atmósfera al año.
- De acuerdo al mismo análisis granulométrico 71,61% de las partículas que conforman las 256 TM de polvos emitidas a la atmósfera al año clasifican como polvos sedimentables, significa la emisión de 183 TM de polvos gruesos o sedimentables a la atmósfera al año (Tabla 5).

Proceso de obtención de carbón para ajuste: Análisis de los resultados

- Concentración del material particulado emitida: 44 308,26 mg/m³ (Tabla 5).
- Lo anterior representa para nuestro proceso, teniendo en cuenta el tiempo real de operación, pérdidas de 2,30% del material alimentado.
- La producción de carbón para ajuste asciende como promedio a las 1 200 TM al año, lo que representa 27,6 TM/año de polvos de diferentes granulometrías emitidos a la atmósfera.
- Según los resultados del análisis granulométrico 21,70% de las partículas que conforman las 27,6 TM de polvos emitidos a la atmósfera al año clasifican como PM10. Significa la emisión de 5,99 TM de polvos finos o en suspensión a la atmósfera al año.
- De acuerdo al mismo análisis granulométrico 54,57% de las partículas que conforman las 27,6 TM de polvos emitidos a la atmósfera al año clasifican como polvos sedimentables, esto representa la emisión de 15 TM de polvos gruesos o sedimentables a la atmósfera al año.

Podemos resumir que se emite una gran cantidad de polvo fino (fracción respirable; partículas $\leq 10 \mu\text{m}$) al aire atmosférico. Estas partículas son las más importantes para el análisis del impacto pues por sus tamaños tienden a formar suspensiones mecánicamente estables en el aire, pudiendo ser trasladadas a grandes distancias por la acción de los vientos, causando diferentes efectos en zonas distantes de las fuentes de emisión.

En el caso de las emisiones de polvo sedimentable; estas partículas permanecen en suspensión en el aire durante períodos de tiempo relativamente cortos, sus efectos son más acusados en las proximidades de las fuentes que las emiten en nuestro caso los mismos se pueden observar en el área circundante de la planta de producción donde se depositan eliminando la flora.

La presencia mayoritaria, en los gases por chimenea, de partículas superiores a los $10 \mu\text{m}$ que como se ha dicho constituyen los polvos sedimentables esta dada por el arrastre de los polvos mecánicos que surgen en los procesos de desagregación mecánica de los minerales como el nuestro.

La concentración de material particulado emitido a la atmósfera tanto en la obtención de carbón para insuflar como en la de carbón para ajuste (Tabla 6), supera lo establecido internacionalmente (100 mg/m^3).

Tabla 6. Concentración del material particulado emitido a la atmósfera. Límite máximo permisible

Parámetro (material particulado)	Valores	
	CIS	Banco Mundial
Carbón ajuste	191 914,78 mg/m ^{3*}	100 mg/m ^{3***}
Carbón insuflado	44 308,26 mg/m ^{3**}	100 mg/m ^{3***}

Leyenda:

* Emisión de partículas por chimenea (obtención de carbón insuflado).

** Emisión de partículas por chimenea (obtención de carbón ajuste).

*** Fuente: <http://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtualData/Tesis/Ingenie/>

Como se puede comprobar la concentración de partículas sólidas en los gases que emitimos a la atmósfera, en el caso de nuestro proceso productivo, supera en demasía el límite establecido para tales efectos afectando la calidad del aire en el entorno de la empresa.

Etapas para la ejecución del Sistema de monitoreo

A partir de la experiencia acumulada en la investigación se propone un conjunto de etapas para la ejecución del monitoreos de la calidad del aire (material particulado emitido a la atmósfera), del CIS.

Conclusiones

1. Las concentraciones de material particulado emitido a la atmósfera supera los valores máximos establecidos por el Banco Mundial (no tenemos regulaciones respecto ha este aspecto en el país).
2. Se proponen los indicadores PTS y PM10, como adecuados para establecer el estado de la calidad del aire en el las emisiones a la atmósfera.
3. Las concentraciones de polvo en suspensión (PTS), (PM10), presentes en las emisiones a la atmósfera superan lo establecidas por normas nacionales y/o internacionales afectando la calidad del aire en el entorno de la planta de producción.
4. Con los análisis realizados se obtuvo: las fuentes de mayor generación de polvo, el tamaño de las partículas de los elementos contaminantes y la concentración de los mismos
5. Los modelos teóricos utilizados en el trabajo permitieron definir la zona de impacto del polvo emitido a la atmósfera por nuestra instalación.

Recomendaciones

1. Crear las condiciones técnicas necesarias para la vigilancia sistemática del polvo sedimentable y gases de combustión por constituir un indicador indirecto de contaminación del aire.
2. Desarrollar un estudio de factibilidad económica para la inversión del sistema de captación de polvos y/o depuración de gases.
3. Implementar un Sistema de Gestión Ambiental en la organización para el control sistemático de su desempeño ambiental.

Modelación de la dispersión de contaminantes atmosféricos emitidos por el tráfico vehicular en una vía de Ciudad de La Habana

Modeling of the dispersion of atmospheric pollutants emitted by road traffic in a street in La Habana

*Por M.Sc. Ernesto Paz Ortega, Dr. José de Jesús Rivero Oliva
M.Sc. Leonor Turtós Carbonell, Lic. Madeleine Sánchez Gácita,
M.Sc. Elieza Meneses Ruiz, Ing. Norberto Díaz Rivero y Dr. Saturnino Píre*

Resumen

El impacto que producen las emisiones de contaminantes atmosféricos generados por el transporte por carretera puede considerarse eminentemente negativo, puesto que se producen generalmente en zonas con alta densidad de habitantes y prácticamente a nivel del terreno, trayendo como consecuencias directas afectaciones a la calidad de vida de la población. La modelación de cómo se dispersan estos contaminantes emitidos permite analizar estrategias con vistas a reducir las emisiones y afectaciones generadas por este sector. En el presente trabajo se efectúa el cálculo de las concentraciones incrementales de los contaminantes atmosféricos generados por el tráfico vehicular en una vía de Ciudad de La Habana y se representa su distribución espacial. Se realiza una comparación entre las concentraciones obtenidas para 1 y 24 horas, y se muestran cuáles son los contaminantes que más aporte realizan a la polución ambiental, el porcentaje que estas concentraciones representan de acuerdo con la norma vigente de «Calidad del aire» y, por último, se tienen en cuenta los valores obtenidos de concentraciones anuales y los valores guía de la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Palabras clave: Contaminación atmosférica, calidad del aire.

Abstract

The impact produced by the emissions of atmospheric pollutants generated by road traffic can be considered as highly negative, since it takes place generally in areas of high population density and at ground level, causing as direct consequence a decrease in the quality of life of the population. Modeling how these pollutants are dispersed allows analyzing strategies focused on reducing emissions and the environmental impacts associated to this sector. In this paper we present the calculations of the incremental concentrations of the atmospheric pollutants generated by the road traffic in a road in La Habana and the representation of its spatial distribution. The paper also shows a comparison of the concentrations obtained during 24 hours, the pollutants with the highest contribution to the environmental pollution, the percentage that these concentrations represent according to

the Air Quality standard in effect, and finally, the yearly concentration values obtained and the values guide of the World Health Organization (WHO) were taken into account.

Keywords: Atmospheric pollution, air quality

Introducción

Las emisiones que genera el transporte por carretera representan un porcentaje elevado de las emisiones totales de los contaminantes principales definidos en la Norma Cubana 111/2002. *Calidad del aire. Reglas para la vigilancia de la calidad del aire en asentamientos humanos* [NC 111/2002]: dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), partículas en suspensión totales o material particulado (PM), partículas en suspensión de ≤ 10 μm de diámetro aerodinámico (PM₁₀), monóxido de carbono (CO) y ozono (O₃); y de otros contaminantes, como los compuestos orgánicos volátiles (COV). El O₃ no se emite directamente (no es un contaminante primario), sino que se forma por efecto fotoquímico a partir de los NO_x en presencia de COV. La contribución de estos a la contaminación atmosférica a escala local y sus concentraciones incrementales en los alrededores de las vías, pueden calcularse mediante modelos de dispersión.

Adicionalmente, casi una cuarta parte de las emisiones de efecto invernadero del mundo relacionado con la energía es producida por el sector del transporte, y las tres cuartas partes de estas son producidas por vehículos automotores. Sin embargo, estos contaminantes tienen efecto global (cambio climático) y su modelación debe realizarse con modelos de circulación general de la atmósfera.

La calidad del aire suele considerarse como uno de los temas principales en la gestión medioambiental y en los procesos de sostenibilidad, ya que tiene una incidencia directa sobre la salud de las personas y el medio ambiente, tanto a nivel global como local.

La Unión Europea estima que por efecto de la contaminación local, básicamente por las partículas en suspensión de pequeño tamaño, fallecen prematuramente 250 000 ciudadanos europeos cada año [Benson, 1999].

En la Estrategia Ambiental Nacional 2007-2010 [Ministerio...], en el Capítulo IV del anexo único de la Resolución No 40/2007, del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba, se plantea dentro de los objetivos específicos «prevenir, reducir y controlar la contaminación originada por las emisiones a la atmósfera».

La Norma Cubana NC 39:1999 de Calidad del aire [NC 39:1999], establece las concentraciones máximas admisibles (C_{ma}) en la atmósfera de varias sustancias contaminantes, pero no propone ninguna metodología para evaluar la dispersión de contaminantes emitidos por fuentes lineales móviles. En lo referente a los modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos, la Norma no ha sufrido cambios durante los últimos veinte años y, por tanto, ya no se encuentra al nivel del estado del arte en este

campo. Como consecuencia de esta insuficiencia, los estudios de impacto ambiental que se realizan en el país aplican modelos y criterios muy diversos, por lo que sus resultados pueden sub o sobre-valorar las concentraciones máximas de acuerdo con las condiciones específicas del estudio.

La NC 111/2002 antes mencionada, supone una relación entre el índice de calidad del aire y las posibles implicaciones sanitarias relacionadas con cada categoría de calidad, de acuerdo con las veces que las concentraciones de los diferentes contaminantes atmosféricos superan la respectiva Cma establecida en la NC 39/99 (Tabla 1).

Tabla 1. Relación entre el índice de calidad del aire y posibles implicaciones sanitarias relacionadas con cada categoría de calidad dada en la Norma Cubana 111/2002. Calidad del aire. Reglas para la vigilancia de la calidad del aire en asentamientos humanos

Índice	Categoría	Comentarios
0-79	Buena	No sobrepasa 79% del valor de la Cma prescrito en la NC 39:1999. 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).
80-139	Aceptable	No supera 139% 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.
140-199	Deficiente	Sobrepasa entre 140-200% el valor de la Cma prescrito en la NC 39:1999. Ligeramente 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, sólo detectables mediante investigaciones muy específicas y sensibles.
200-299	Mala	Supera entre dos y tres 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 de morbilidad. Da lugar a una «Situación de atención».

300-499	Pésima	Supera entre tres y cinco veces el valor de la Cma. En dependencia del incremento de la concentración del contaminante y el tiempo de exposición continua, aumenta 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 cinco 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».

En Ciudad de La Habana sólo existe una estación de monitoreo de calidad de aire, por lo que no es representativa para todos los lugares de la ciudad. La ausencia de una red de medición de calidad del aire es una de las limitaciones de todo estudio de contaminación atmosférica en Cuba, puesto que no es posible tener la contaminación de fondo existente, por lo que sólo se modela el aporte específico de las fuentes contaminantes.

Los contaminantes atmosféricos están sometidos generalmente a tres procesos: emisión, transmisión e inmisión. La emisión es la expulsión de un contaminante desde una fuente a la atmósfera. La transmisión describe la distribución y las posibles transformaciones químicas, y la inmisión no es más que la cantidad o concentración de un contaminante que es recibido por un receptor y por ende es también registrado por cualquier equipo de medición. Receptores son los seres humanos, plantas y animales, pero también edificios y otros bienes.

La previsión y cuantificación del impacto ambiental atmosférico, se realiza mediante la aplicación de un software de cálculo capaz de realizar una modelación suficientemente representativa de los procesos de emisión y dispersión de los contaminantes, en las dimensiones temporal y espacial.

La necesidad de abordar la problemática de la contaminación atmosférica mediante el análisis de los resultados obtenidos, a partir de los modelos de dispersión atmosférica, resulta una solución aconsejable por su rapidez y bajos costos de ejecución. Pero también los modelos son imprescindibles para evaluar fuentes en la etapa de proyecto y para comparar estrategias de reducción, además de determinar la contribución de una fuente en los niveles de calidad del aire. Los modelos son la única vía de evaluar el impacto a escala local, regional y global de determinada fuente.

Si bien es cierto que cualquier simulación matemática de un fenómeno tan complejo como lo es la dispersión atmosférica nunca es totalmente exacta, no es menos cierto que los resultados de un modelo de este tipo constituyen un instrumento válido para ser aplicado en la decisión de la planificación y en la adopción de medidas correctoras. Con ellos se

identifica y se disciernen aquellas zonas con mayor incidencia de la contaminación atmosférica.

Con la tendencia general que existe al incremento de la urbanización e industrialización, la población urbana está sujeta a la exposición crónica de los contaminantes presentes en el aire; además, la existencia y/o la combinación de los contaminantes pueden ser la causa de diferentes enfermedades. Largas exposiciones a bajas concentraciones de contaminantes pueden estar relacionados con daños a la salud, tales como enfermedades respiratorias y cardiovasculares; irritación en los ojos, nariz y garganta; agravamiento de enfermedades existentes como el asma y afectaciones al desarrollo de determinados trabajos y actividades físicas [Contribución...].

Estudios de salud [Rabl y Spadaro, 2000] han identificado un número de efectos adversos asociados a la contaminación del aire; por ejemplo, enfermedades respiratorias como bronquitis crónica, enfisema pulmonar, cáncer de pulmón, asma bronquial e infecciones respiratorias, irritación de los ojos asociada con altas concentraciones de partículas y oxidantes fotoquímicos como los formaldehídos, aldehídos e hidrocarburos oxigenados. Estudios epidemiológicos han demostrado que la exposición a partículas finas produce un incremento de las enfermedades respiratorias y bronquitis crónica y la frecuencia de los ataques de asma, decrecimiento de la función pulmonar e incremento de la tasa de mortalidad, aún para cortos períodos de exposición. Otros contaminantes, como los óxidos de azufre (SO_x), están identificados con un rol importante en la bronquitis crónica y hay pequeñas evidencias que lo relacionan con enfisema pulmonar. El NO₂ se relaciona con enfermedades del pulmón y en largas exposiciones con cáncer del pulmón. Existen contaminantes que son altamente cancerígenos, como el benceno, incluido en las evaluaciones realizadas.

La inexistencia de una red de monitoreo de contaminantes atmosféricos en Cuba imposibilita caracterizar la contaminación atmosférica presente tanto en zonas urbanas como rurales y como consecuencia no permite establecer los niveles de contaminación existentes, así como el estado actual de la calidad del aire, por lo que no es posible conocer si se está cumpliendo la norma vigente de calidad del aire en ninguna zona del país.

El desarrollo de metodologías para estimar la concentración de contaminantes generados por fuentes móviles [Pal, 1999], está muy relacionado con el conocimiento acerca del régimen de vientos imperantes y la estabilidad atmosférica, ya que la concentración de contaminantes guarda una relación directa con el número de fuentes que estén emitiendo, pero es inversamente proporcional a la intensidad del viento. La permanencia de los contaminantes está relacionada con la capacidad de la atmósfera para dispersarlos, con su reactividad y con el lavado que efectúa la lluvia, que contribuye a disminuir la concentración de contaminantes, además de otros factores.

Hoy en día aún existe un conocimiento incompleto de todos los procesos físicos y químicos involucrados en el transporte, dispersión, transformación y deposición de los contaminantes. Esto es debido a que la turbulencia atmosférica está en función de un gran número de factores de estabilidad, los cuales no pueden ser totalmente cubiertos por los modelos.

Materiales y métodos

La contaminación atmosférica existente en determinado lugar puede ser estimada a partir del conocimiento de las características de las fuentes emisoras, tales como su ubicación, tipos de contaminantes que son emitidos, tipos de combustibles utilizados, régimen de funcionamiento, datos meteorológicos, características del relieve y geometría, entre otros.

Conociendo estas características se pueden calcular las emisiones efectuadas en un período y realizar la representación de la distribución espacial de los contaminantes, concentración y áreas que afectan, pudiéndose establecer el nivel de aporte de cada contaminante a la polución total presente en cualquier lugar de interés.

La necesidad de realizar estudios de contaminación atmosférica en las ciudades y de las afectaciones que específicamente provoca el sector del transporte, llevaron a considerar que la vía estudiada presentara un flujo vehicular alto y que fuera un caso tipo para poder realizar posteriormente una generalización del trabajo.

Fue imprescindible entonces realizar la identificación de esta vía y sus características, tales como ancho, cantidad de vías, pendientes, carriles no utilizados para el tráfico, velocidades permisibles, paradas de autos y ómnibus, paradas por semáforos, tipos de autos que circulan, cantidad de los mismos por tipo, perfil de manejo por la vía, combustibles utilizados, características del combustible, cantidad de autos con dispositivos para reducción de emisiones, cantidad de autos con acondicionadores de aire, estado técnico del vehículo y tipo de vía. Se utilizaron también los datos meteorológicos para Ciudad de La Habana y datos de topografía.

La dispersión de los diferentes contaminantes emitidos por fuentes móviles [Benson, 1999], puede ser modelada de manera adecuada mediante sistemas de cómputo. Muchos de ellos, como los propuestos por la EPA, en carácter de código libre, y mejorados mediante versiones sucesivas. Tal es el caso de CALINE 2, CALINE 3, CAL3QHC, CAL3QHCR y CALINE 4 [U. S. EPA, 1995].

En el presente trabajo fue utilizado el programa CAL3QHCR [Eckhoff y Braverman, 1995], cuyos nuevos algoritmos de cálculo lo hacen superior a los restantes programas, al incorporar factores que no habían sido suficientemente considerados y que influyen en la dispersión de los contaminantes. Este software es capaz de procesar de manera conjunta los datos meteorológicos horarios de un período largo (normalmente un año), las emisiones de la flota de vehículos y el volumen de tráfico para cada hora de todos los días de la semana, al permitir definir hasta siete perfiles (uno

para cada día de la semana), con datos para las 24 horas. Tiene en cuenta, adicionalmente, las señalizaciones del tránsito (semáforos) y las colas de autos en los mismos, por lo que permite modelar intercepciones.

El CAL3QHCR presenta gran flexibilidad y permite realizar las evaluaciones de dos condiciones del tráfico: la primera, cuando existe flujo libre tiene en cuenta factores de emisión (g/vehículo-distancia recorrida) y el flujo vehicular (cantidad de vehículos por unidad de tiempo); y la segunda, cuando existe una intercepción regulada por semáforo, donde se utilizan además de los datos anteriormente mencionados el ciclo de las señalizaciones y las condiciones del tráfico vehicular. En esta segunda condición, los factores de emisión se expresan en g/hora.

El modelo puede evaluar perfiles de emisiones horarias diferentes para cada día de la semana, pero asume que todas las semanas del año son similares. CAL3QHCR reporta como salida para cada receptor, las concentraciones promedios anuales y las concentraciones máximas para 1, 8 y 24 horas dentro del período de datos meteorológicos evaluados, teniendo en cuenta o no el valor de la contaminación de fondo. Presenta los primeros cinco valores máximos horarios del año, independientemente que existan otros días con esos mismos valores. También incluye una tabla con la duración de las calmas con sus respectivas frecuencias.

El CAL3QHCR es un modelo de dispersión gaussiana. Este modelo consiste en dividir la vía en segmentos, los que son considerados como elementos de la vía, cada uno de los cuales produce concentraciones incrementales que se van sumando para formar la concentración total estimada del contaminante dado en un receptor en particular. La distancia del elemento al receptor se mide sobre una recta perpendicular, trazada desde el receptor hasta el eje central de la vía. El primer elemento se conforma como un cuadrado con lados iguales al ancho de la vía y su posición es determinada por el ángulo entre la vía y la dirección del viento (Fig. 1).

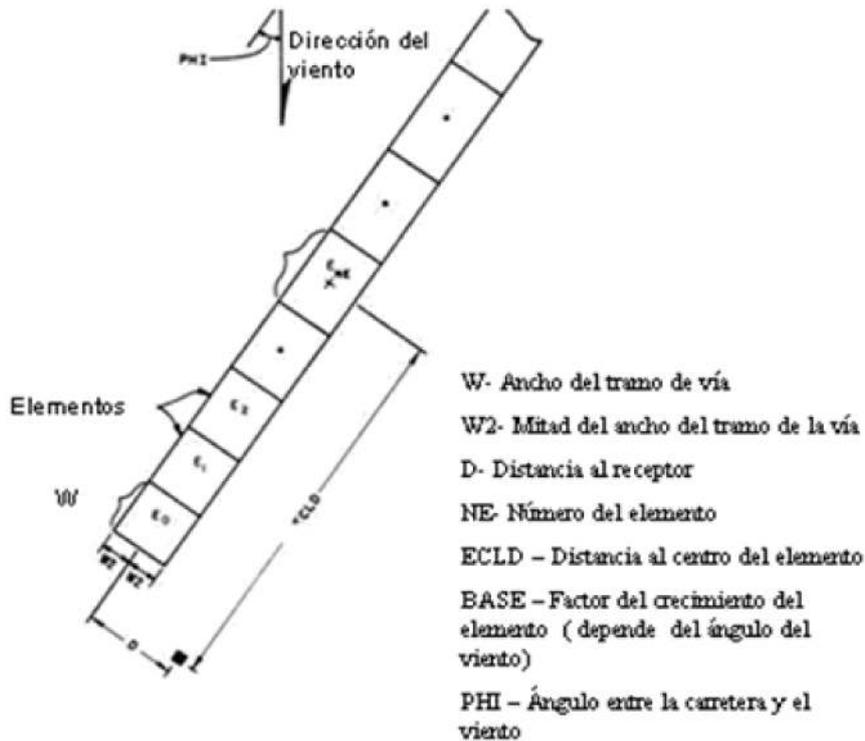


Fig. 1. Esquema de la formulación gaussiana de un elemento.

Cada elemento es modelado como una fuente lineal finita equivalente (EFSL), ubicada perpendicularmente a la dirección del viento y centrada en su punto medio. El penacho de emisiones tiene forma gaussiana, en dirección al viento desde el elemento. La longitud y orientación del EFSL se determinan como funciones del tamaño del elemento y el ángulo (PHI) entre el promedio de la dirección del viento y la alineación de la carretera. La longitud de cada elemento se describe por la ecuación siguiente:

$$EL_{NE} = W \cdot BASE(NE - 1), \text{ m} \quad (1)$$

Donde:

EL: Longitud del elemento.

W: Ancho del tramo de la vía.

NE: Número de elementos.

BASE: Factor de crecimiento del elemento.

BASE = 1,1 para PHI < 20°.

BASE = 1,5 para 20° ≤ PHI < 50°.

BASE = 2,0 para 50° ≤ PHI < 70°.

BASE = 4,0 para PHI ≥ 70°.

El modelo de pluma gaussiana para fuentes lineales presenta un algoritmo de dispersión ajustado, que tiene en cuenta la turbulencia cerca de las vías [Bailey].

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

Donde:

C: Concentración incremental en el punto x, y, z ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

q: tasa de emisión de la fuente (kg/s).

u : Velocidad promedio del viento (m/seg).

σ_y y σ_z : Parámetros de la dispersión vertical y transversal.

H: Altura de emisión (m).

Zona de mezcla

Se define una zona de mezcla, la cual es una zona de emisiones y turbulencia uniforme que se encuentra directamente sobre la vía más tres metros a cada lado (sólo incluye las sendas donde existe circulación, no se consideran las aceras ni las zonas donde los autos estén estacionados). Este ancho adicional es sumado debido a la dispersión horizontal inicial que es transmitida a los contaminantes por la estela dejada por los vehículos.

El modelo parte de asumir que los contaminantes emitidos desde los vehículos que circulan a lo largo de un segmento de vía pueden ser representados como una fuente lineal de emisiones y que dichos contaminantes son dispersados de acuerdo con una distribución gaussiana, definida dentro de una zona de mezcla sobre la vía objeto de estudio.

Dentro de la zona de mezcla se asume que la turbulencia mecánica creada por el movimiento de los autos y la turbulencia térmica creada por los gases calientes del escape de los vehículos son los mecanismos de dispersión dominantes. Las evidencias indican que esto es válido para todos los casos, excepto para condiciones atmosféricas muy inestables. Dado que las emisiones originadas por el tráfico vehicular son liberadas a una altura muy próxima al nivel del terreno y tomando en cuenta que la validez del modelo se circunscribe a condiciones atmosféricas predominantemente neutras y estables, es razonable modelar la dispersión vertical inicial como una función de la turbulencia dentro de la zona de mezcla.

Tiempo de permanencia de un contaminante dentro de la zona de mezcla

Se define el tiempo de permanencia de un contaminante en la zona de mezcla:

$$TR = \frac{W^2}{U * \text{sen}(PHI)}, PHI \geq 45^\circ$$

$$TR = \frac{W^2}{U * \text{sen}(45)}, PHI < 45^\circ, \text{ seg} \quad (3)$$

Donde:

W2: Mitad del ancho de la vía.

U: Velocidad del viento.

Para direcciones del viento oblicuas y elementos más largos, se asume que la pluma está suficientemente dispersa a partir de una distancia igual a la mitad del ancho de la vía, de modo que la zona de mezcla turbulenta ya no predomina.

La ecuación utilizada para relacionar la dispersión vertical inicial y el tiempo de permanencia de un contaminante es:

$$\sigma_{z1} = 1,8 + 0,11TR, \text{ m} \quad (4)$$

Donde:

σ_{z1} : Dispersión vertical inicial.

TR : Tiempo de residencia de un contaminante.

Esto fue obtenido de la base de datos de General Motors y fue ajustado en el modelo para un promedio de tiempo de 30 minutos.

$$\sigma_{z1-t} = \sigma_{z1-30} \left(\frac{t}{30} \right)^{0,2}, \text{ m} \quad (5)$$

Donde:

t : Tiempo promedio en minutos.

El valor de la dispersión inicial vertical es considerado independiente de la rugosidad del terreno y la estabilidad de la clase atmosférica.

El parámetro de dispersión vertical es asumido como constante e igual a σ_{z1} sobre la zona de mezcla a una distancia W_{MIX} desde el punto medio de la fuente lineal finita en la dirección del viento (Fig. 2).

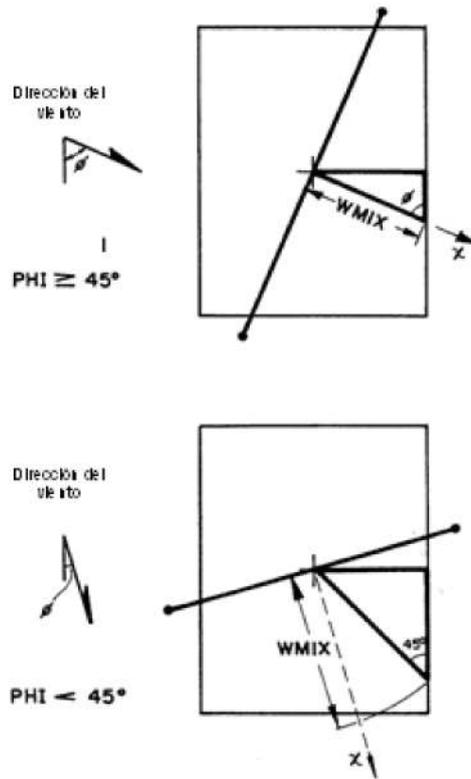


Fig. 2. Geometría del elemento para determinar W_{MIX} .

$$\begin{aligned}
 W_{mix} &= W / [\text{sen}(\text{PHI})], \text{PHI} \geq 45^\circ \\
 W_{mix} &= W / [\text{sen}(45^\circ)], \text{PHI} < 45^\circ
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Para un escenario de condiciones meteorológicas, rugosidad y tiempo promedio dados, se utilizan las mismas curvas de dispersión vertical para todos los elementos que conforman la vía. Esta consideración resulta válida tomando en cuenta que la dispersión vertical inicial ocurre siempre en la mitad de la vía que parte del centro del elemento en la misma dirección del viento.

σ_{10} es ajustada para la rugosidad de la superficie Z_0 y el período de promediación t por la fórmula siguiente:

$$\sigma_{10,ATM,Z_0} = \sigma_{10} * (ATM / 30)^{0.2} * (Z_0 / 10)^{0.07}, \text{ m}
 \tag{7}$$

Donde:

ATM: Tiempo promedio (minutos).

Z_0 : Rugosidad de la superficie (cm).

Los valores de rugosidad (Z_0) recomendados para diferentes categorías de uso del suelo se aportan en la tabla 2.

Tabla 2. Valores de rugosidad del relieve para diferentes usos de suelo

Tipo de superficie	Z₀ (cm)
Lodo suave y llano	0,001
Asfalto, pavimento	0,002
Lecho seco de un lago	0,003
Desierto suave	0,03
Hierba (5-6 cm)	0,75
Hierba (4 cm)	0,14
Alfalfa (15.2 cm)	2,72
Hierba (60-70 cm)	11,4
Trigo (60 cm)	22,0
Maíz (220 cm)	74,0
Huerto de cítricos	198,0
Bosque de abetos	283,0
Uso de suelo en la ciudad	
Casas familiares	108,0
Apartamentos residenciales	370,0
Oficinas	175,0
Distrito Central de Negocios	321,0
Parques	127,0

CAL3QHCR tiene por defecto capacidad para modelar hasta 120 tramos y 60 receptores en el plano X,Y,Z, aunque estos límites pueden ser modificados en el programa de ser necesario. La ubicación del tramo es especificada mediante sus coordenadas iniciales y finales. El programa permite modelar múltiples fuentes y receptores, así como curvas y segmentos con variación en los factores de emisión. El ángulo que caracteriza la dirección del viento se expresa en términos de azimut, de 0 a 360°. El programa suma automáticamente la contribución de cada tramo a cada receptor. La rugosidad de la superficie y las variables meteorológicas, tales como estabilidad atmosférica, velocidad y dirección del viento, se consideran constantes sobre el área de estudio.

Los receptores se localizan por sus coordenadas X,Y,Z, y no deben ser colocados dentro de la zona de mezcla correspondiente al tramo de flujo libre. Esto significa que los receptores deben estar situados fuera del ancho total de la vía, considerando además los 3 m adicionales a cada lado de la misma. La zona de mezcla es considerada como un área de emisiones y turbulencia uniforme. Los 10 m de altura del tramo de vía no son aplicables para establecer la altura de los receptores; para éstos se puede establecer la altura que se desee.

En la mayoría de las aplicaciones se asume que la altura de éstos es igual a la altura de respiración, es decir, 1,8 m.

En lugares como avenidas, donde la distancia de las edificaciones a la vía es pequeña, se acepta que los receptores sean colocados sobre la vía.

La estimación de la concentración de los contaminantes es directamente proporcional al factor de emisión (FE) usado como entrada de datos al programa, por lo que la precisión de los resultados del análisis de calidad del aire a microescala es dependiente de la precisión del FE usado. Para su cálculo se usó el programa IVE y como entrada de datos se utilizaron los siguientes:

1. Altitud sobre el nivel del mar: Se asume 0 en toda la ciudad.
2. Uso de acondicionadores de aire en los autos (porcentaje de equipos que se encienden a 27 °C).
3. Política de inspección y mantenimiento: Dado que los equipos de medición de los gases de escape no están mayoritariamente disponibles y que las inspecciones técnicas de los vehículos se centran actualmente en los requisitos de seguridad vial y no en los medioambientales, se asume la opción más desfavorable, es decir, la ausencia total de una política de inspección y mantenimiento (Opción "None").
4. Características de la gasolina y el diésel: Se asumen las opciones y valores suministrados por CUPET.
5. Composición de la flota de vehículos: Se adoptaron aquellas categorías de vehículos, predeterminadas en el software IVE, con los mayores factores de emisión, es decir, aquellas sin ninguna tecnología para el control de las emisiones. Sobre la base de un conteo vehicular general, para cada una de las cuatro vías objeto de estudio, se determinaron las cantidades de vehículos correspondientes a las categorías definidas por el propio programa.
6. Datos meteorológicos: Se requieren los valores de temperatura ambiente y humedad relativa para cada una de las 24 horas del día. Los cálculos de las emisiones se realizaron para un día promedio del año. En consecuencia, se estimaron los valores medios anuales de la temperatura y humedad para cada hora del día, a partir de un año de datos meteorológicos horarios, medidos en la estación de Casablanca para el 2006 (Fig. 3). En el software Power_Bins.exe se implementó una opción para la lectura de un fichero de datos meteorológicos y la determinación de los valores medios de temperatura y humedad relativa en cada hora del día.
7. Datos de estructura de Power Bins de los vehículos: Las emisiones dependen del estilo de conducción del vehículo, dado por su característica de velocidad contra tiempo. De esta característica se derivan diferentes estados posibles de potencia-estrés de motor, con factores de emisión diferentes, los cuales son variables para un mismo vehículo y entre tipos de vehículos. Los posibles estados antes mencionados se dividen en 60 categorías (0-59) de Power Bins. Las categorías inferiores a 12 corresponden al motor en desaceleración, mientras que las superiores a 12 están asociadas al motor en aceleración o con determinada velocidad de crucero constante. El valor de 12 es el que corresponde al motor en

marcha, con el auto detenido, a bajas revoluciones.

El valor de Power Bin también depende de la pendiente de la vía que puede ser cero, negativa (bajada) o positiva (subida). Las pendientes negativas reducen el estrés y disminuyen el valor de Power Bins, mientras que las subidas generan valores mayores.

8. Estructura media de Power Bins, representativa del total de vehículos monitoreados correspondientes al estilo de conducción dado.

Las variables que más afectan los factores de emisión son: promedio de velocidad en el tramo de vía, condiciones técnicas de los vehículos y temperatura ambiente.

Tramo de flujo libre

Un tramo de flujo libre se define como aquel segmento recto de la vía con ancho, altura, volumen de tráfico, velocidad de tráfico y factor de emisión constantes; debe cumplirse que la longitud del tramo sea mayor que su ancho. La definición de un nuevo tramo resulta necesaria cuando hay cambios en el ancho de la vía, en el volumen del tráfico, en la velocidad del tráfico o en el factor de emisión de los vehículos.

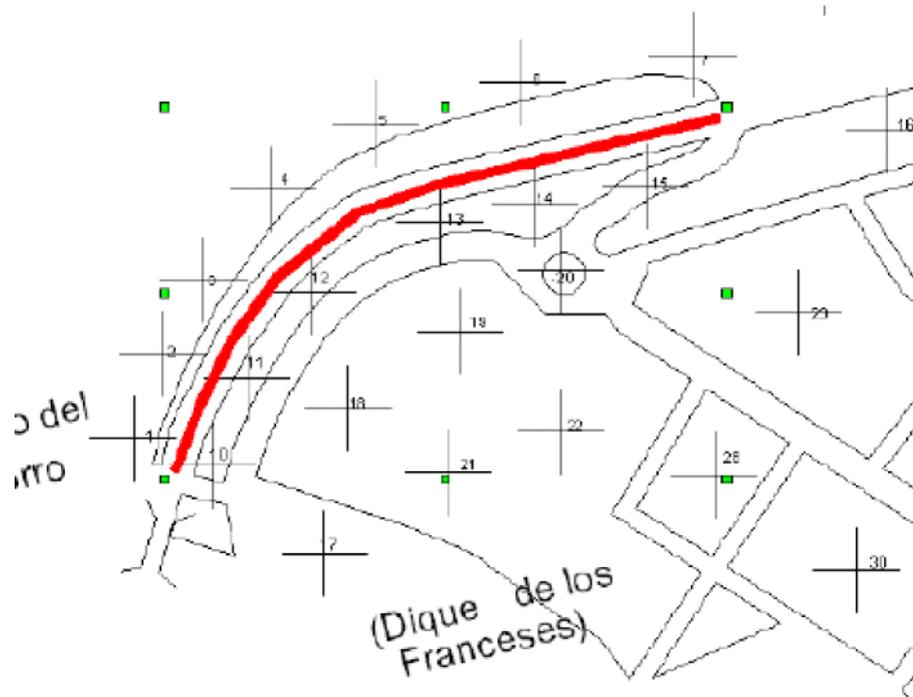


Fig. 3. Vía Monumental (en rojo tramo modelado)

Tramo de cola

Un tramo de cola se define como aquel segmento recto, con ancho y emisiones constantes, en el cual los vehículos permanecen detenidos por un período de tiempo. La localización del tramo viene dada por las coordenadas del punto X1,Y1 en el cual comienza la cola de los vehículos y que corresponde a una intercepción. El final del tramo se establece arbitrariamente en cualquier punto de la línea donde se ha formado la cola.

El propósito de establecer el punto final de la cola es sólo determinar su dirección. La longitud de la cola se estima internamente por el programa teniendo en cuenta el volumen de tráfico y la capacidad de aproximación.

Los parámetros de entrada que son requeridos para determinar la longitud de las colas son: volumen de tráfico en el tramo, ciclo del semáforo, ciclo de luz roja, y el intervalo de tiempo perdido (tiempo de la fase de la luz amarilla). También se requiere especificar los siguientes parámetros: tasa de flujo de saturación (vehículos por hora en el tiempo efectivo de la luz verde), tipo de señal de tráfico (por tiempo fijo (1), actuada (2) o semiactuada (3)) y tipo de arribo de los vehículos (desde la peor condición = 1, hasta más favorable = 5; la condición 1 es la peor y refleja un patrón denso de autos arribando al inicio de la fase de luz roja; la condición 2 es no favorable y refleja un patrón denso o disperso arribando durante la fase de luz roja; la condición 3 es una condición promedio donde los arribos son aleatorios; la condición 4 es moderadamente favorable, donde existe un arribo de autos denso o disperso durante la fase de luz verde, y la condición 5 es la más favorable, existiendo un patrón denso de arribo al inicio de la fase de luz verde).

A veces la distancia desde una intercepción a la siguiente es tan pequeña que la cola calculada por el modelo se extiende más allá de la próxima intercepción. Cuando esto ocurre el programa trunca la cola en un punto, que corresponde al inicio de la próxima intercepción. Debe tenerse en cuenta que el punto final de la cola define la longitud máxima que se estima podría alcanzar la misma. El ancho del tramo está determinado directamente por la ancho de la vía donde los vehículos están detenidos, no necesitándose adicionar los tres metros antes mencionados para el caso de flujo libre.

Capacidad de una intercepción

La capacidad de una línea de aproximación a una intercepción es determinada aplicando el tiempo efectivo de la luz verde a la tasa de flujo de saturación. La tasa de flujo de saturación representa el máximo número de vehículos a través de una línea de aproximación a una intersección, asumiendo que la línea de aproximación tiene 100% del tiempo real como tiempo efectivo de luz verde. Este programa permite la entrada por defecto, como tasa de flujo de saturación para representar una intercepción urbana, 1 600 vehículos. Esta tasa de flujo de saturación varía sustancialmente dependiendo de las condiciones del tráfico de un sitio específico y su geometría.

La capacidad de aproximación por líneas de una intercepción es calculada como:

$$C = SFR * \frac{(CAV - RAVG - K1 - YFAC)}{CAVG} \quad (8)$$

Donde:

C: Capacidad horaria por línea (veh/hr/línea).

SFR: Tasa de flujo de saturación (veh/línea/hr de tiempo de luz verde).
CAVG: Longitud del ciclo del semáforo (seg).
K1: Tiempo de demora en la salida de los autos (seg) (promedio 2 seg).
YFAC: Intervalo de tiempo perdido (representa el tiempo de luz amarilla (seg)).

Tipos de tramos

CAL3QHCR no debe ser usado en áreas donde el relieve alrededor de la vía sea tan irregular que cause gran variabilidad espacial en las condiciones meteorológicas.

De modo general, las secciones de carreteras elevadas pueden ser clasificadas como de tipo *fill* (relleno) o tipo *bridge* (puente). Para un puente, el aire por encima y por debajo de la fuente contaminante fluye de manera no perturbada. Para las secciones de puentes el valor de la altura de emisión (*H*) se toma como la altura real de la vía sobre la superficie del terreno. En cambio, para secciones de relleno (*fill*) el software establece automáticamente el valor de *H* como cero.

En este último caso, se asume que el flujo de aire sigue el contorno del terreno con un comportamiento laminar no perturbado. Esta suposición se considera razonable hasta valores de la pendiente del relleno con razón 2:1 (cuyo valor efectivo es aún más gradual cuando los flujos de viento golpean la vía con ángulos horizontales del viento poco acentuados) y para condiciones atmosféricas estables (que eliminan el efecto de la turbulencia inducida por irregularidades de la superficie).

Para secciones con depresiones fuertes (*depressed section*), con más de 1,5 m de profundidad, se incrementa apreciablemente el tiempo de permanencia de los contaminantes dentro de la zona de mezcla. De la base de datos Los Angeles se deriva el siguiente factor que toma en cuenta este efecto:

$$DSTR = 0,72 * ABS(H)0,83 \quad (9)$$

Esta corrección conduce a un parámetro de dispersión vertical inicial mayor hacia los bordes de la carretera.

El incremento del tiempo de permanencia, caracterizado por un promedio más bajo de la velocidad del viento, produce concentraciones extremadamente altas en la zona de mezcla. La velocidad del viento se ajusta linealmente al valor ambiental existente fuera de la depresión del terreno, a una distancia de $3H$ en la dirección del viento desde los límites de la zona de mezcla. A esta distancia el efecto que predomina es el de los valores más altos de la dispersión vertical inicial, produciéndose concentraciones más bajas que en una sección equivalente cuando no hay depresión del terreno (*at grade*).

Para sectores con depresiones del terreno, la mayor altura de la dispersión vertical inicial coincide con la mayor concentración de contaminantes en la zona de mezcla. De esto se concluye que los efectos de túnel y remolino disminuyen la tasa de transporte de contaminantes fuera de la zona de mezcla de la sección deprimida. Este incremento del tiempo de residencia eleva la concentración de contaminantes dentro de la zona de mezcla. Las menores concentraciones observadas en la carretera en dirección al viento fueron atribuidas a la mayor extensión de mezcla vertical que ocurre dentro de la zona de mezcla por causa del mayor tiempo de residencia. Consecuentemente, el tiempo de residencia fue ajustado para obtener altos valores de concentraciones dentro o cercanos a la zona de mezcla y bajos valores para receptores que estén fuera de la sección deprimida. Por tanto, bajo estas condiciones, los menores valores de concentración se obtienen para receptores en la dirección del viento, como si se encontraran ubicados en una sección al nivel del terreno. Excepto en lo que se refiere a este ajuste, el programa trata a las zonas de depresión de la misma forma que las secciones al nivel del terreno.

Velocidad de decaimiento y deposición

La velocidad de deposición es una medida de la razón de cambio con la cual puede ser absorbido o asimilado un contaminante por una superficie. Esto supone el proceso de difusión, sin turbulencia, de una molécula de contaminante a través de una capa laminar que cubre la superficie.

La velocidad de decaimiento es la velocidad a la cual una partícula cae con respecto a sus alrededores. Esta es la velocidad física de la partícula en dirección hacia abajo. Para la mayoría de las situaciones a una clase de partículas con una velocidad de decaimiento dada, se le asigna la misma velocidad de deposición.

Efectos de la topografía

La formulación gaussiana usada asume que el flujo del viento es horizontal, homogéneo y existen condiciones atmosféricas estables, para diferentes topografías. Elementos de la topografía pueden re-direccionar o canalizar los vientos, resultando en una significativa variabilidad espacial de la velocidad y dirección del viento. Lugares situados cerca de colinas y valles también son propensos a tener frecuentes cambios en la dirección del viento, causados por un diferencial de calor de la superficie. Por lo anterior, este modelo debe ser usado con mucho cuidado en terrenos con topografía compleja.

Datos de entrada del programa CAL3QHCR

Los datos de entrada suministrados al programa fueron los siguientes:

1. Nombre de la vía.
2. Tiempo promedio.
3. Rugosidad del relieve.
4. Velocidad de decaimiento.
5. Velocidad de deposición.
6. Número de receptores.
7. Factor de conversión de escala.

8. Fecha de inicio de los datos meteorológicos para el procesamiento.
9. Fecha final de los datos meteorológicos para el procesamiento.
10. Número de la estación de datos de superficie.
11. Año de los datos meteorológicos.
12. Número de la estación meteorológica de datos de aire superior.
13. Año de los datos de aire superior.
14. Selección de la variante Rural o Urbano.
15. Nombre de los receptores.
16. Determinación del tipo de flujo (libre o controlado).
17. Nombre de cada tramo.
18. Coordenada inicial del tramo.
19. Coordenada del final del tramo.
20. Altura de la fuente de emisión (autos).
21. Ancho de la zona de mezcla.
22. Número de vías.
23. Hora.
24. Concentración de fondo.
25. Volumen del tráfico promedio en flujo libre (veh/hr).
26. Factor de emisión para flujo libre (g/veh-mi).
27. Ciclo completo del semáforo (seg).
28. Tiempo de duración de la luz roja (seg).
29. Tiempo de duración de la luz amarilla (seg).
30. Coordenadas de los receptores (x,y,z).
31. Especificación de la opción en que correrá el programa (si flujo libre o controlado por semáforo).
32. Modo para el que el programa calculará la dispersión (C, S, P).
33. Patrones para los días de la semana.
34. Descripción de las intersecciones (nombres dados).
35. Cantidad de conexiones a ser procesadas.
36. Número de la conexión.
37. Volumen de autos en cola (veh/hr).
38. Factor de emisión para los vehículos en cola (g/veh-hr).
39. Volumen de vehículos para la saturación de la vía (veh/hr/vía).
40. Tipo de señalización (por tiempo, actuada o semiactuada).
41. Velocidad de aproximación.

Limitaciones y recomendaciones del modelo

1. Se requiere de la entrada de nuevos datos cada vez que exista un cambio en el ancho de la carretera, del volumen del tráfico, velocidad de los autos o del factor de emisión.
2. La longitud del tramo de vía debe ser siempre mayor que su ancho.
3. Es necesario tomar segmentos superiores a 300 m desde la intercepción e incluirlos en la geometría del sitio. Tramos que estén más allá de 300 m desde el receptor tendrán una menor contribución a los resultados.
4. Para situaciones de sobrecapacidad, donde las colas sean más largas que la configuración física de la vía, el usuario deberá revisar las condiciones de tráfico asumidas o limitar la longitud de la cola por las coordenadas finales del tramo de vía.

5. En un sitio específico donde el tiempo de luz amarilla sea desconocida se asumirá por defecto 2 segundos.
6. La altura de la fuente debe estar siempre entre -10 y $+10$ m. El programa no está validado fuera de estos rangos.
7. La altura del receptor debe ser siempre mayor que la altura de la vía, excepto para secciones elevadas de carreteras donde se asume el transporte de la pluma sobre un plano horizontal.
8. La limitación de los 10 m no se aplica a los receptores, los cuales pueden estar colocados a cualquier altura sobre la vía.
9. La velocidad del viento debe ser como mínimo 1 m/s.
10. Los coeficientes de rugosidad de la superficie varía entre 3 y 400 cm. Una tabla provee estos valores para las diferentes categorías de uso de suelo.
11. El promedio del tiempo debe estar dentro del rango de 30 a 60 min. El valor más común es de 60 min.

Vial propuesto y aplicación del modelo

Vía Monumental (salida del Túnel hacia Habana del Este)

Se encuentra situada en Ciudad de La Habana, al Norte de la Bahía de La Habana (Fig. 4), hacia las afueras de la ciudad. Es considerada como una arteria principal de cuatro carriles, con separador central y pavimento de hormigón hidráulico en buen estado. Presenta un fuerte movimiento vehicular por servir de enlace al centro de la ciudad con la zona este de la capital donde se ubican grandes núcleos poblacionales (repartos Bahía, Camilo Cienfuegos, Alamar, la zona turística de Guanabo y Santa María del Mar).

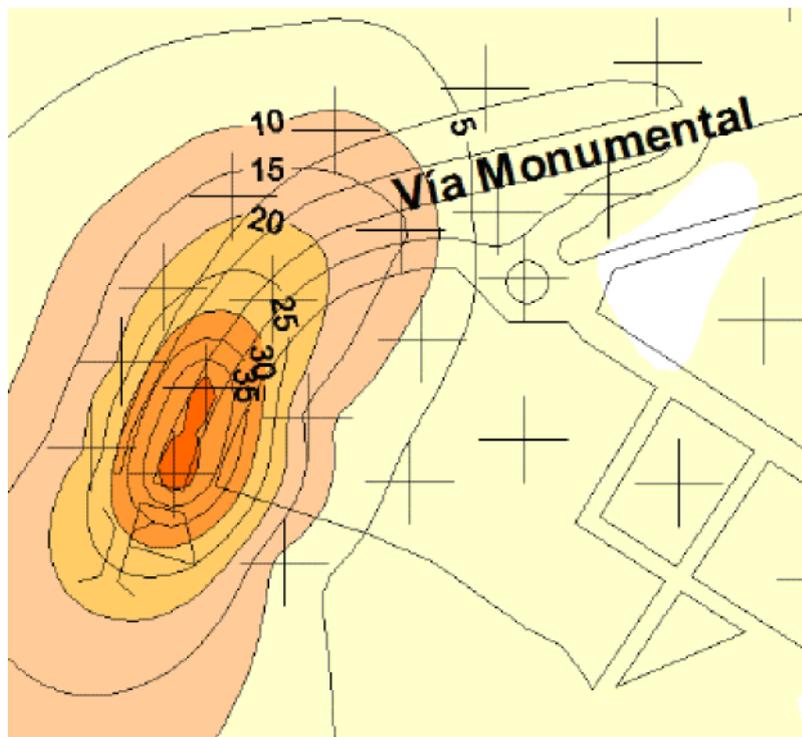


Fig. 4. Vía Monumental (en rojo tramo modelado).

La vía está emplazada en una zona costera desprovista de edificaciones. Aunque se trata de una zona ubicada en un terreno alto, una parte del tramo de vía analizado es considerado como una sección hundida y otra parte como a nivel del terreno. Al inicio del tramo, es decir, dentro del túnel, la altura respecto al nivel del terreno es negativa, de -10 m, pero con un ascenso progresivo, hasta llegar al nivel del terreno en el punto final del tramo, a la salida del túnel que conduce hacia Habana del Este. La velocidad de circulación de los vehículos por esta vía es aproximadamente de 50 km/h. La zona de estudio abarcó una longitud de 500 m a partir de la salida de la bahía hacia el interior del túnel.

En esta zona los vientos están presentes todos los días del año, presentando velocidades variables durante todo el día. La ausencia de edificaciones o vegetación alta implican que no existe una desviación significativa en la dirección del viento a nivel del suelo.

Resultados

Se exponen en la tabla 3 los valores de las concentraciones máximas obtenidas para los contaminantes CO, SO₂, PM, NO₂, acetaldehídos, formaldehídos, NH₃ y benceno para 1 y 24 horas en cada una de las vías modeladas y su comparación con las Cma de la Norma Cubana de Calidad del Aire (NC 39:1999). Esta Norma contiene Cma instantáneas para 20 minutos en lugar de para una hora. Posteriormente se modela, mediante el software SURFER 8, la distribución espacial del promedio anual de estos contaminantes para todos los casos de estudio, observándose las zonas de mayor concentración y el área de influencia de cada contaminante.

Tabla 3. Concentraciones máximas obtenidas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y porcentaje que representa de las respectivas Cma horarias y diarias según la NC 39:1999

Contaminante	Período	Cma ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Vía Monumental	% respecto a la norma
CO	20 min	5 000	1 013,87	20,27
	24 hr	3 000	205	6,8
SO ₂	20 min	500	8,46	1,7
	24 hr	50	1,78	3,5
PM	20 min	150	3,48	2,3
	24 hr	50	0,754	1,5
NO ₂	20 min	85	194,7	229
	24 hr	40	35,8	89
Acetaldehídos	20 min	10	0,093	0,9
	24 hr	10	0,216	0,2
Formaldehídos	20 min	35	2,48	7
	24 hr	35	0,502	1,4
NH ₃	20 min	200	1,49	0,7

	24 hr	200	0,322	0,16
Benceno	20 min	1 500	12,42	0,8
	24 hr	800	2,68	0,3

En las figuras de la 5 a la 12 se representan las distribuciones de las concentraciones obtenidas de los diferentes contaminantes evaluados.

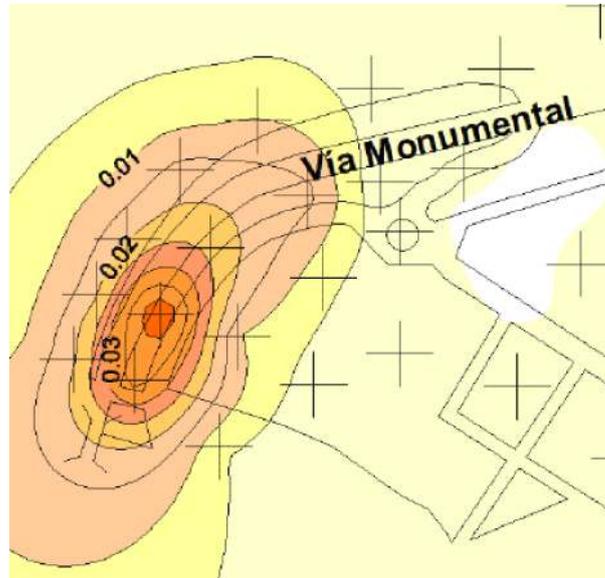


Fig. 5. Concentración promedio anual de monóxido de carbono ($\mu\text{g}/\text{m}_3$).

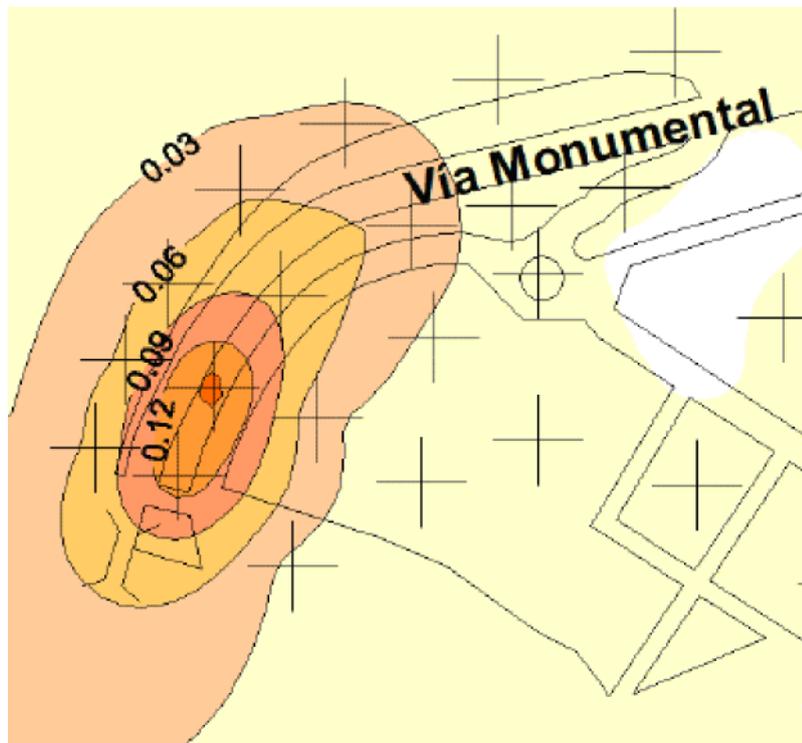


Fig. 6. Concentración promedio anual de acetaldehídos ($\mu\text{g}/\text{m}_3$).

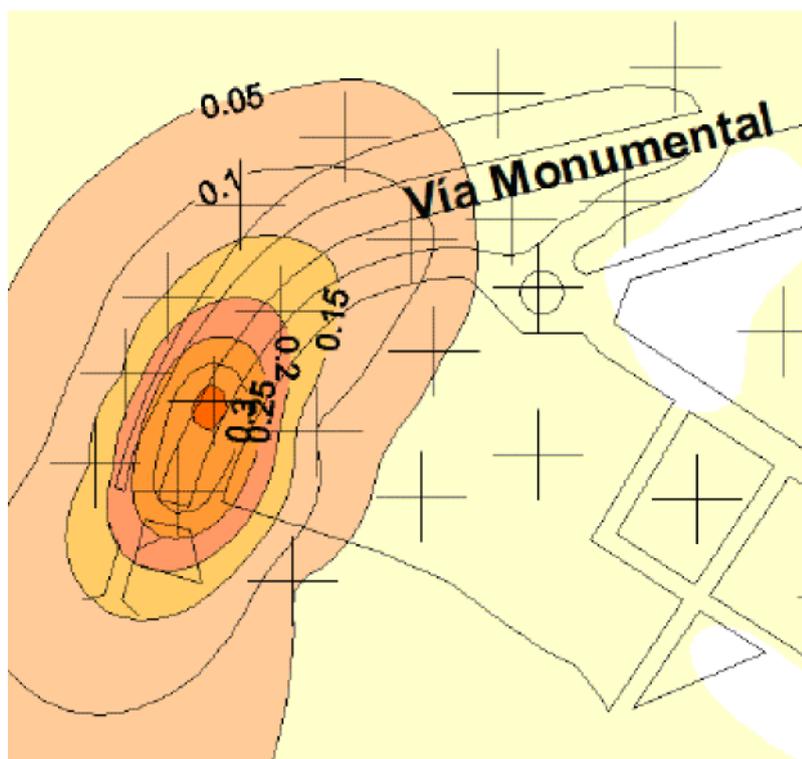


Fig. 7. Concentración promedio anual de material particulado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

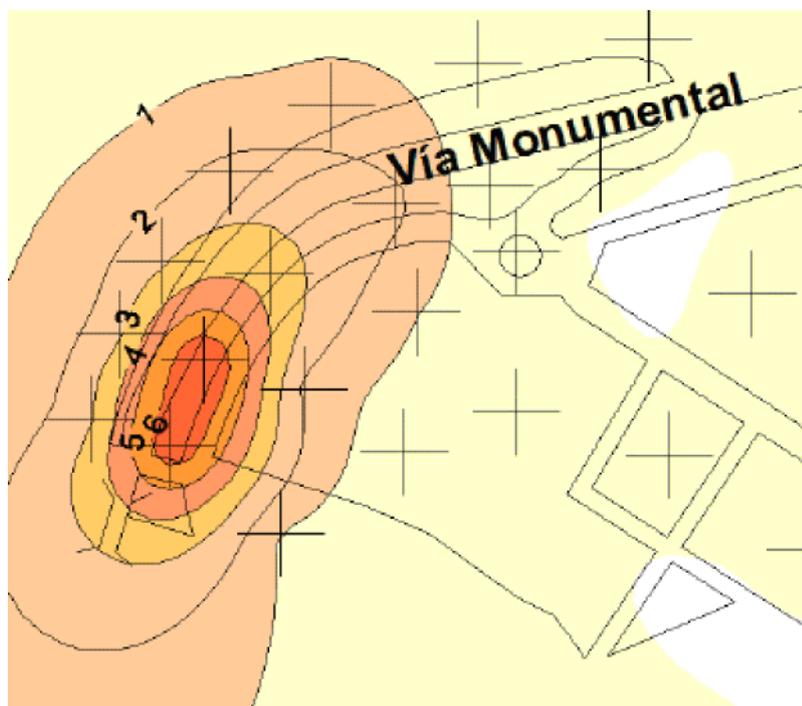


Fig. 8. Concentración promedio anual de SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

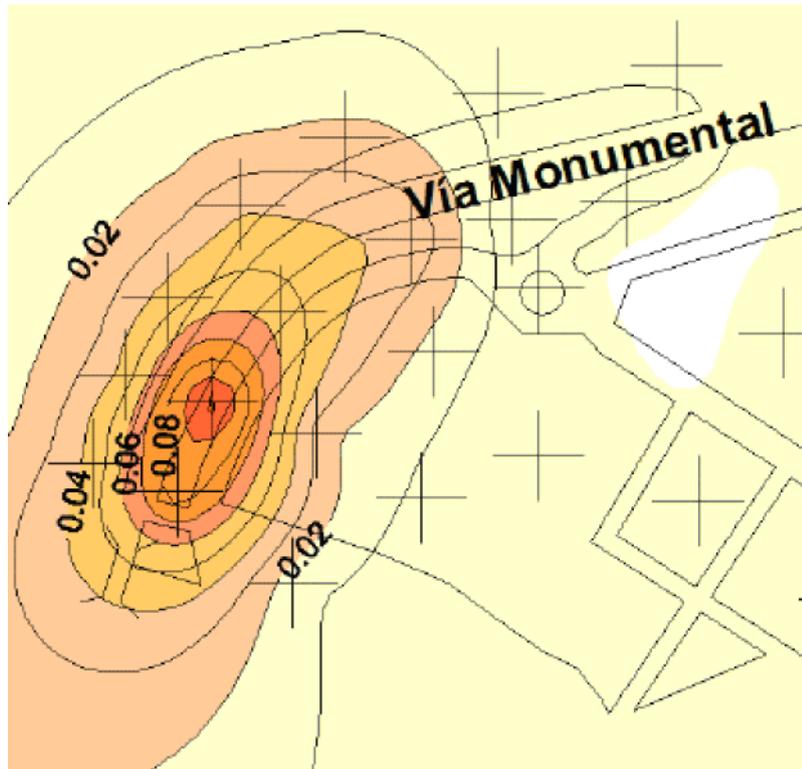


Fig. 9. Concentración promedio anual de NO₂ (µg/m₃).

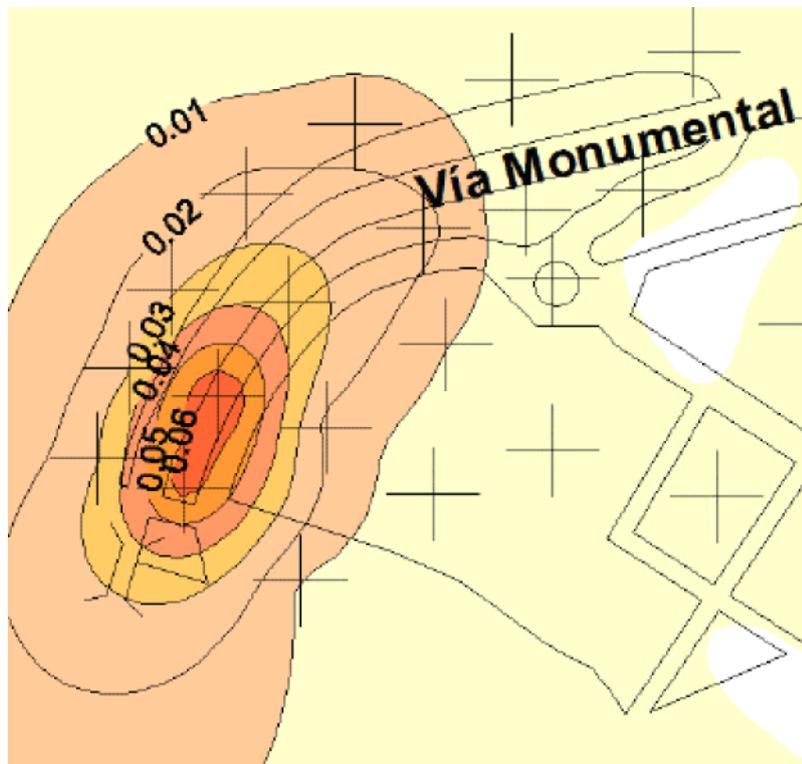


Fig. 10. Concentración promedio anual de formaldehídos (µg/m₃).

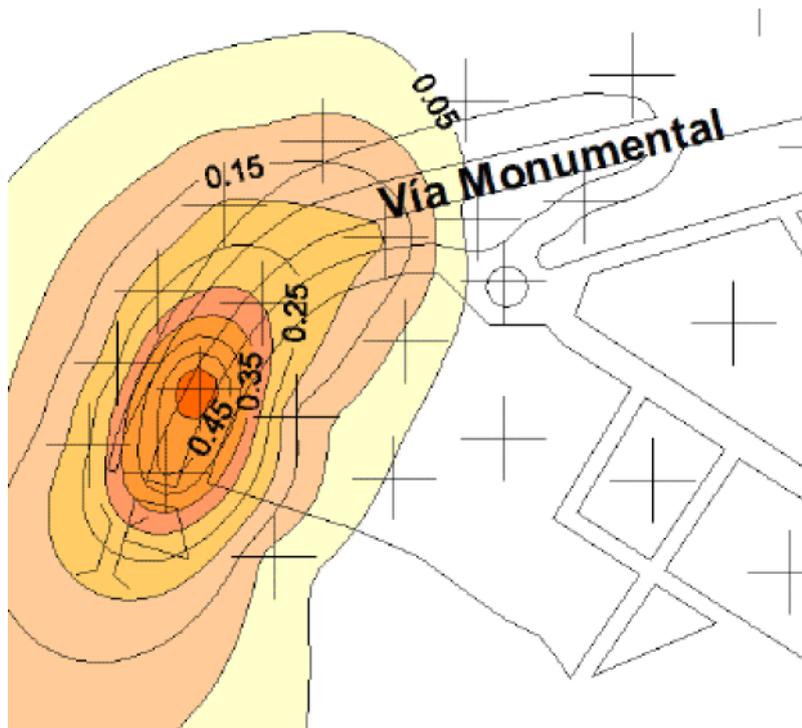


Fig. 11. Concentración promedio anual de NH_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

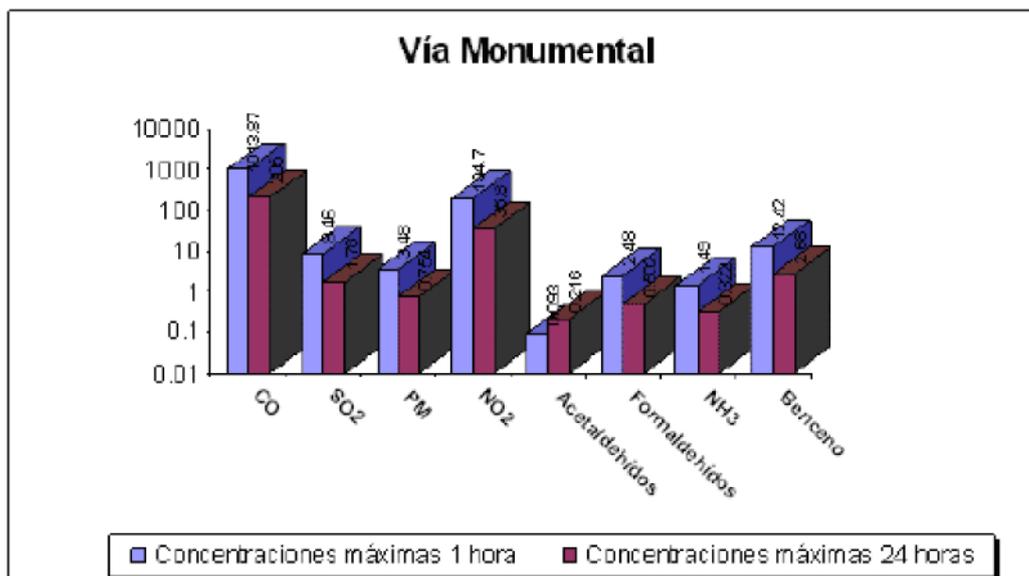


Fig. Fig. 12. Concentración promedio anual de benceno ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

En las figuras de la 13 a la 15 se puede observar el aporte a la contaminación total de cada contaminante que es emitido y es evaluado en este trabajo para 1 y 24 horas, y se comparan respectivamente con la concentración máxima admisible presente en la NC 39:1999.

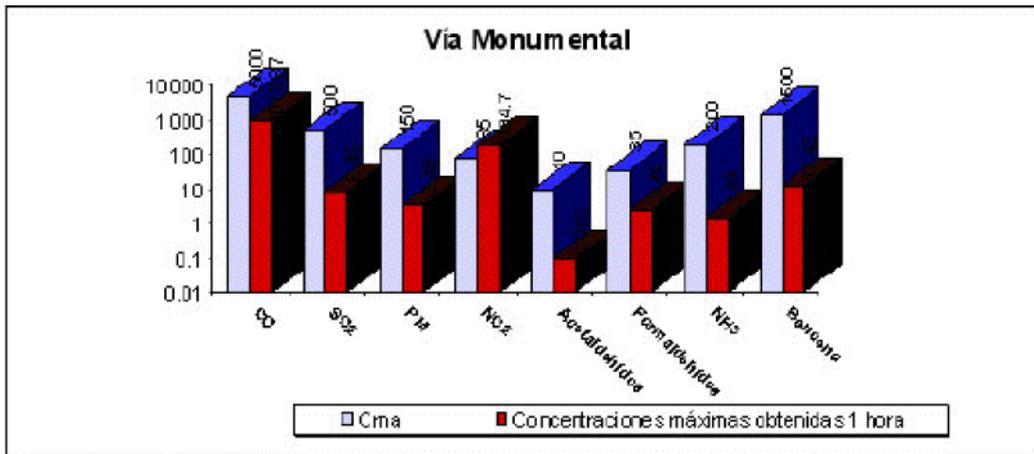


Fig. 13. Concentraciones de los contaminantes obtenidas para 1 hora y 24 horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

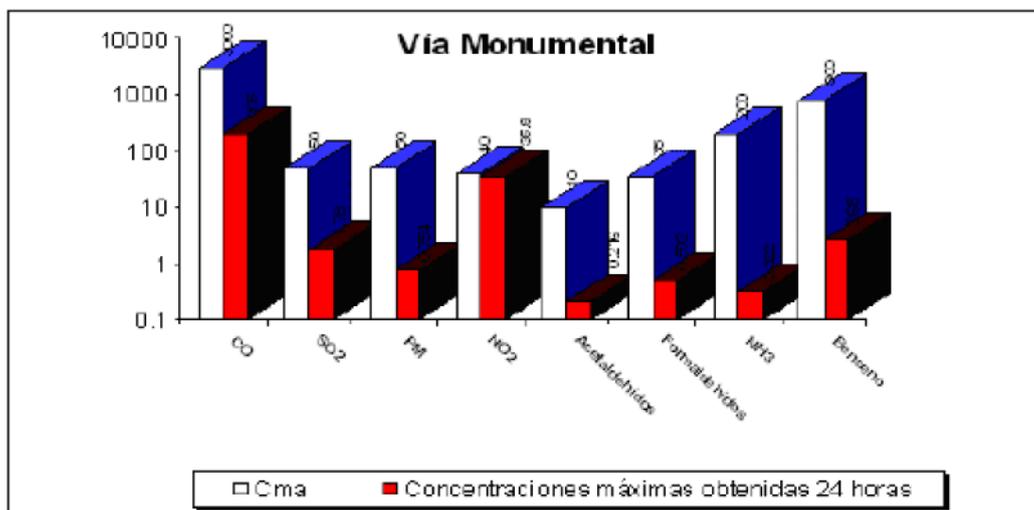


Fig. 14. Comparación de los valores obtenidos para 1 hora con la concentración máxima admisible de la norma vigente ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

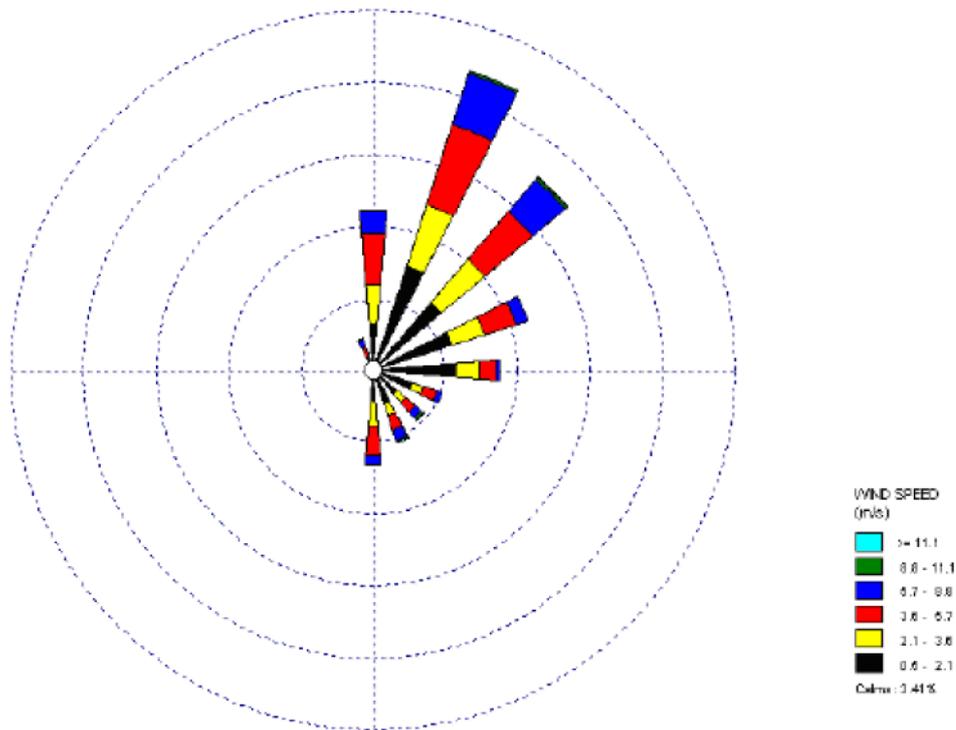


Fig. Fig. 15. Comparación de los valores obtenidos en 24 horas con la concentración máxima admisible de la norma vigente ($\mu\text{g}/\text{m}_3$).

Discusión de los resultados

En la Vía Monumental las principales concentraciones se producen hacia la salida del túnel (Figs. 5-12); esto se debe a diferentes factores, como son:

1. Dirección predominante de los vientos que incide en el transporte de los contaminantes.
2. Efecto que produce el relieve hacia la salida del túnel, debido a que hacia esta zona la vía se clasifica como sección deprimida, por lo que el tiempo de residencia de los contaminantes en esta área es mucho mayor que en otro tipo de vía.
3. Los efectos de túnel y remolino que se producen en este tipo de vía hacen que la tasa de transporte de los contaminantes sea menor, por lo que se mantienen más tiempo en el lugar.
4. Aumento de la aceleración de los autos hacia la salida del túnel debido a la pendiente que genera un aumento del estrés del motor con el consiguiente aumento del consumo de combustible y, por tanto, de emisiones, siendo el factor de emisión más alto en este tramo de vía.
5. Disminución de la velocidad de 70 km/h obligatoria para el paso por dentro del túnel a 50 km/h hacia su salida. Esta disminución de velocidad trae como consecuencia que disminuya la turbulencia mecánica y la mezcla, aumentando la dispersión vertical inicial.

Analizando los gráficos obtenidos (Figs. 12-14) se puede concluir ver que el monóxido de carbono es el contaminante que mayor concentración incremental presenta y, aunque no sobrepasa el valor propuesto por la

NC 39:1999, realiza un gran aporte a la contaminación atmosférica total presente en sus alrededores.

El dióxido de nitrógeno es el contaminante que se expresa con mayores afectaciones, debido que a pesar de presentar menores concentraciones que el monóxido de carbono, sus valores alcanzan o superan la NC 39:1999 (no se ha considerado su reactividad con los COV y otros mecanismos de descomposición).

Comparando los valores promedios de concentraciones anuales obtenidos para los contaminantes atmosféricos, con los valores guías de la Organización Mundial de la Salud, (Tabla 3), se observa que aunque ninguno sobrepasa los valores guías, el NO₂ tiene una contribución importante, partiendo del hecho que sólo se ha modelado un pequeño tramo de vía, los datos de partida para este modelo en gran parte fueron obtenidos por criterios de expertos y no por mediciones in situ, lo que hace que exista un margen de error en esta estimación.

Analizando las concentraciones horarias de NO₂ vemos que estas superan en más de dos veces (+200%) el valor de la concentración máxima admisible, por lo que de acuerdo con la tabla 1, para este contaminante la calidad del aire para una hora puede considerarse mala en algunos receptores y para 24 horas puede considerarse aceptable, pues las concentraciones para este período se elevan a 89 y 82%, respectivamente.

Conclusiones

1. El cálculo de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos a partir del uso del software CAL3QHCR, permitió definir el impacto del tráfico vehicular a la calidad del aire en zonas cercanas a la vía modelada, pudiéndose estimar el nivel de contaminantes que aportan las emisiones del transporte a la contaminación total que existe en esa área, demostrándose con ello la eficacia del uso de este modelo para el cálculo de las concentraciones y la dispersión de contaminantes, por lo que su uso constituye una excelente herramienta para su aplicación en las condiciones de Cuba.
2. Se representó espacialmente el promedio anual de diferentes contaminantes atmosféricos producidos por el tráfico vehicular, mostrándose las zonas de mayor influencia en el perímetro de la vía seleccionada, lo que permitirá ampliar su uso para vías con características similares y observar los sectores residenciales y poblacionales que hoy están siendo afectados por la emisión de contaminantes debido al tráfico vehicular.
3. El monóxido de carbono es el contaminante que más aporta a la polución, produciendo concentraciones importantes en las vías estudiadas, que aunque no sobrepasa los valores límites de la Norma Cubana de Calidad del Aire, representa una alta concentración para un pequeño tramo de vía modelado.

4. El dióxido de nitrógeno constituye el segundo contaminante por las concentraciones que se presentan.

Este contaminante es uno de los principales causantes de afectaciones a la salud humana, principalmente por su contribución a la formación de ozono troposférico y aerosoles de nitrato. De acuerdo con la NC 33:1999, las concentraciones máximas admisibles horarias en la Vía Monumental son superadas. Para la Norma de 24 horas, sus concentraciones son bastante altas, llegando a ser 89%, lo que representa una gran contribución partiendo del hecho de que sólo se está modelando un pequeño tramo de la vía.

Bibliografía

- BAILEY, CHAD. *Modeling Mobile Source Air Toxics Hot Spots*. U. S. EPA Office of Transportation and Air Quality Air Toxics Center, s/a.
- BENSON, PAUL E. *CALINE 3: A Versatile Dispersion Model for Predicting Air Pollutant Levels Near Highways and Arterial Streets*. Office of Transportation Laboratory. California Department of Transportation (Report No. FHWA/CA/TL-79/23), 1999.
- Contribución a la educación y la protección ambiental*. Volumen 2, VII Taller, ISBN 959-7136-09-0.
- ECKHOFF, PETER A. Y THOMAS N. BRAVERMAN. *User's guide to cal3qhc version 2.0 (cal3qhc user's guide)*. U. S. Environmental Protection Agency. Office of Air Quality Planning and Standards. Technical Support Division Research Triangle Park, North Carolina 27711, 1995.
- MINISTERIO DE CIENCIA TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE. *Estrategia Ambiental Nacional 2007-2010*. Capítulo IV del Anexo único. Proyección: Objetivos estratégicos, acciones y metas hasta el 2010 apéndice 4.1.3.c) Emisiones a la atmósfera y contaminación sonora. Principales planes y programas. Programas y estrategias ambientales de los diferentes sectores de la economía. Plan Nacional para la Introducción de la Producción más Limpia en la Gestión Ambiental Empresarial.
- NC 111/2002. *Calidad del aire. Reglas para la vigilancia de la calidad del aire en asentamientos humanos*. La Habana: Comité Estatal de Normalización.
- NC 39:1999. Sistema de normas para la protección del medio ambiente. Atmósfera, Requisitos higiénicos sanitarios: Concentraciones máximas admisibles, alturas mínimas de expulsión y zonas de protección sanitaria. La Habana: Comité Estatal de Normalización.
- PAL ARYA, S. *Air Pollution, Meteorology and Dispersion*. Department of Marine, Earth, and Atmospheric Sciences. North Carolina State University, 1999.
- QUEROL, XAVIER, ET AL. *Calidad del aire urbano, salud y tráfico rodado*. Instituto de Ciencias de la Tierra Jaime Almera. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2006.
- RABL, ARI Y JOSEPH V. SPADARO. «Health Cost and Automobile Pollution», en *Revue Francaise d'Allergologie et d'Immunologie Clinique*, Vol 40 (1) 55-59. París: Centre d'Énergetique, 2000.
- U. S. EPA. *User's Guide for CAL3QHC Version 2: A Modeling Methodology for Predicting Pollutant Concentrations Near Roadway Intersections*. EPA-454/R-92-006, (Revised). U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC 27711, 1995.

Eco Solar es una publicación científica electrónica trimestral para los especialistas de las fuentes renovables de energía. Se dedica a la promoción de temas relacionados con la energética, las energías alternativas, la física ambiental, la arquitectura bioclimática, el impacto sobre el medio ambiente la educación ambiental, la termoconversión, la eficiencia energética, y las energías de origen hidráulico, fotovoltaico, eólico, solar, biomasa y ciencias relacionadas.

DIRECTOR GENERAL:

Dr. Luis Bértiz Pérez.

DIRECTOR:

Lic. Manuel Álvarez
González.

EDITOR:

Lic. Alejandro Montecinos
Larrosa.

CORRECCIÓN:

M Sc. Roberto Manzano
Díaz.

Ing. Jorge Santamarina

DISEÑO ELECTRÓNICO:

D.I. Antonio Romillo Polaino.

TRADUCCIÓN:

Lic. Lázaro O´Farril Lazo.

CONSEJO ASESOR:

Dr. Luis Hernández (Energía fotovoltaica)

Dr. Conrado Moreno Figueredo (Energía
eólica)

Lic. Bruno Henríquez Pérez (Física
ambiental)

Dr. Jorge Luis Paretas (Energía hidráulica)

Dr. Dania González Couret (Arquitectura
bioclimática)

Dr. Jorge Guardado (Biomasa)

Dr. Sergio Corp Linares (Energía solar
térmica)

Lic. Leonor Turtós Carbonell (Impacto
ambiental)

Lic. Alejandro Montecinos Larrosa (Energía
humana)

Lic. Ricardo Bértiz Valle (Educación
ambiental)



**SOCIEDAD CUBANA PARA LA PROMOCIÓN
DE LAS FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA Y EL RESPETO
AMBIENTAL**

Calle 20 no. 4113, esquina a 47, Miramar, Playa,
Ciudad de La Habana, Cuba. Código Postal: 11300.

Teléfono: (537) 205-9949.

Apartado postal: 6611, CP: 10600, Ciudad de La Habana, Cuba.

e-mail: editora@cubasolar.cu

<http://www.cubasolar.cu>