

UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS
FACULTAD QUÍMICA - FARMACIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



MAESTRÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL

**DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA ZONA
SURESTE DE LA CIUDAD DE SANTA CLARA**

(Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Gestión Ambiental)

Autora: Ing. Gladys María Alfonso Vizcaíno

Tutora: Dra. C. Ing. Mayra Caridad Morales Pérez

**Santa Clara
2009**

UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS
FACULTAD DE QUÍMICA - FARMACIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



MAESTRÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL

**DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA ZONA
SURESTE DE LA CIUDAD DE SANTA CLARA**

(Tesis presentada en opción al Título Académico de Máster en Gestión Ambiental)

Autora: Ing. Gladys María Alfonso Vizcaíno

Tutora: Dra. C. Ing. Mayra Caridad Morales Pérez

Consultante: Dr. C. Ing. Iván Rodríguez Rico

**Santa Clara
2009**



Bersanierto

“Utilícese toda la ciencia necesaria para un desarrollo sostenido, sin contaminación. Páguese la deuda ecológica y no la deuda externa (...)”

Fidel Castro Ruz



gradecimientos

Expresar agradecimientos es hoy para mí una obligación, a todos aquellos que con su apoyo incondicional han contribuido conmigo,

Muchas gracias a todos.



**A mi hijo, por ser mi mayor tesoro.
A mi esposo, por ser la luz que ilumina.
A mi mamá, por ser el bebé que cuido.**



Resumen



RESUMEN

En el presente trabajo se realizó un diagnóstico de la calidad del aire en la zona sureste de la ciudad de Santa Clara mediante un análisis integrado de las emisiones en las principales fuentes de esta área, las inmisiones en espacios abiertos y calles principales, la modelación de la dispersión y la evaluación de categorías de impacto contempladas en el Eco-indicador 99. Se comprobó que la calidad del aire es aceptable en la zona de acuerdo a la NC 111: (2004) “Reglas para la vigilancia de la calidad del aire en asentamientos humanos”, no obstante los resultados de las mediciones experimentales y de la dispersión resultaron que, el agente contaminante con mayor efecto perjudicial es el dióxido de azufre (SO_2) y el área de mayor concentración de contaminantes es el Hospital “Arnaldo Milián Castro”. En la evaluación de los indicadores ambientales, las categorías afectadas fueron el cambio climático, acidificación y respiración por inorgánicos, esta última con una mayor incidencia y la fuente que más tributó a esta categoría fue la Batería Grupos Electrógenos.



Summary



Summary

SUMMARY

In the present work a diagnosis of the air quality in the south-east zone of Santa Clara city was made by means of an integrated analysis of the emissions on main sources in this area, the inmissions in open spaces and main streets, the modelling of the dispersion and the evaluation of the categories impact included in the Ecoindicador 99. The results demonstrated an acceptable air quality in this zone according to NC111:(2004) "Rules for the observation of air quality in human establishment", but the results of the experimental measurements and the dispersion evidenced that the polluting agent with greater detrimental effect is sulphur dioxide (SO_2) and the area of greater contaminants concentration is "Arnaldo Milián Castro" hospital. In the evaluation of environment indicator the affected categories were climatic change, acidification and breathing by inorganic, the last was the greater incidence and the source which affect was the Electric Generator in this category.



Indice



ÍNDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL DE LA INVESTIGACIÓN	7
1.1 Introducción.....	7
1.2 La contaminación y el ambiente	7
1.2.1 El problema ambiental en Cuba	9
1.2.2 Situación ambiental en Villa Clara.....	11
1.3 La atmósfera como receptor y difusor de la contaminación	11
1.4 Efectos de la contaminación atmosférica	16
1.5 Transporte y destino de los contaminantes atmosféricos.....	17
1.5.1 Importancia de la meteorología en la contaminación del aire	18
1.6 Aspectos relacionados con la instrumentación	21
1.7 Normas de calidad del aire.....	23
1.8 Modelos de dispersión atmosférica	23
1.8.1 Clasificación de los modelos	26
1.9 Gestión de la calidad del aire	27
1.10 Conclusiones del primer capítulo.....	29
2. MATERIALES Y MÉTODOS	31
2.1 Introducción.....	31
2.2 Caracterización del área objeto de estudio práctico	31
2.3 Evaluación experimental de las emisiones.....	33
2.3.1 La generación distribuida de la electricidad	35
2.3.2 Cálculo del flujo de los gases de combustión.....	36



Índice

2.4 Análisis de los resultados de las emisiones	38
2.5 Medición experimental de las inmisiones	41
2.5.1 Análisis de los resultados de las inmisiones.....	44
2.6 Indicadores Ambientales	46
2.7 Conclusiones del segundo capítulo	50
3. DISPERSIÓN DE LOS CONTAMINANTES.....	52
3.1 Introducción.....	52
3.2 Modelo Gaussiano.....	52
3.3 Aplicación de la metodología de cálculo por la NC 39: (1999)	54
3.3.1 Cálculo de la dispersión de contaminantes calientes expulsados a la atmósfera bajo condiciones meteorológicas desfavorables.....	54
3.3.2 Modelo físico-matemático utilizado para la modelación de la dispersión por la Norma Cubana (MDNC).....	56
3.4 Modelación de la dispersión por el software ISCST3	60
3.4.1 Índices de la calidad del aire	62
3.5 Conclusiones del tercer capítulo	63
CONCLUSIONES.....	65
RECOMENDACIONES	66
BIBLIOGRAFÍA.....	67
ANEXOS	74



Introducción



INTRODUCCIÓN

A lo largo de toda la historia, el uso por el hombre de los recursos naturales en su beneficio produce afectaciones que en su magnitud amenazan el futuro del planeta. Mediante el desarrollo de la ciencia y la tecnología se ha transformado el mundo. El nivel de vida del hombre se ha elevado pero a la par se ha incrementado la generación de residuos, lo cual origina uno de los problemas capitales que tiene planteado la humanidad es la contaminación.

La Revolución Industrial aceleró la emisión a la atmósfera de grandes cantidades de sustancias gaseosas y partículas procedentes de la producción y del uso de combustibles para obtener energía y la transportación; fue así que en los primeros años del siglo XIX la contaminación atmosférica causada por la industria se identificara como un problema, ocasionado fundamentalmente por los requerimientos de energía **(PNUMA, 2002)**.

El deterioro continuo de la calidad del aire condujo a la celebración de diferentes convenciones internacionales. De forma general, en sus inicios la respuesta de los gobiernos, los investigadores y los organismos internacionales fue lenta y pesimista respecto a la posibilidad de dar solución a los inconvenientes, lo que propició que estos se agravaran. En los años siguientes, la conciencia creciente de la comunidad mundial acerca de los problemas de la contaminación propició un cambio en los gobiernos, que movilizó también a organismos internacionales.

En el año 1972 se celebró la Primera Conferencia sobre el Ambiente Humano de la Organización de Naciones Unidas (ONU), en Estocolmo, donde en conjunto con los movimientos públicos se persuadió a muchos gobiernos a desarrollar una legislación para limitar las emisiones de contaminantes químicos-tóxicos al ambiente, así como la introducción de nuevas tecnologías y políticas con este fin. Como resultado de dichas acciones, en algunos países desarrollados se redujeron los problemas de la contaminación industrial.

En 1982 se creó la Comisión Mundial de Ambiente y Desarrollo, la cual intensificó el trabajo relacionado con temas del ambiente y la salud. Así el informe “Nuestro futuro común”, en 1987, estableció pautas fundamentales en los problemas ambientales e hizo un llamado al “desarrollo sostenible”, para satisfacer las



Introducción

necesidades de las generaciones presentes sin comprometer la satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras. Otros eventos importantes en la conservación del ambiente, son el desarrollo de las cumbres mundiales de Río de Janeiro (1992) y la de Johannesburgo (2002), donde se ha evidenciado la necesidad de mejorar la calidad del aire y alcanzar un desarrollo social donde prevalezca la equidad (**Dickson, 1990 y Yassi, 2002**).

En Cuba, de 1971 a 1980 se produce un proceso acelerado de desarrollo industrial y del transporte, que provoca el aumento de la contaminación y las emisiones tóxicas al medio ambiente. Esto conduce al establecimiento de una legislación ambiental en el país y se realizan algunos estudios sobre la contaminación del aire, fundamentalmente en Ciudad de La Habana para determinar los niveles de monóxido de carbono en algunas vías de tránsito, excediendo considerablemente las concentraciones establecidas en la **NC: 39 (1999)**.

El programa cubano contra la contaminación ambiental es realizado por el Sistema Nacional de Vigilancia de la Contaminación Atmosférica (SINVCA) evidenciando que existen áreas en el territorio nacional, con alto nivel de contaminación del aire como las ciudades de Nicaro y Cienfuegos, Santiago de Cuba y Matanzas con muy alto y con niveles extremos en Moa, Nuevitas, Mariel y Ciudad de la Habana.

El sistema de monitoreo del aire en Cuba, fundamentalmente por carencias económicas no se ha extendido completamente hacia otras localidades del país. Sin embargo, en la actualidad se reporta en la propuesta de norma **NC 55: (2008)** que el nivel de la calidad del aire en la ciudad de Santa Clara es mala pero no existe un estudio sistemático e integral para conocer los niveles de calidad del aire y su efecto en las diferentes zonas que la componen. Algunos autores como **Quintana, Herrera y Jáuregui (2005); Domínguez y Morales (2007) y Suárez (2008)**, han desarrollado estudios sobre esta temática en algunos lugares de la Ciudad, pero en la zona sureste se han ubicado nuevas fuentes generadoras de contaminantes al aire y no se han desarrollado estudios



Introducción

recientes. Lo planteado anteriormente motiva la selección de esta área de la ciudad como **objeto de estudio práctico** de la investigación.

Las principales fuentes emisoras de contaminantes al aire que se distinguen en esta Zona son la Torrefactora de café “Manuel Ascunce Doménech”, calderas pirotubulares para la generación de vapor en la red hospitalaria, el sistema de generación distribuida con motores diesel y el transporte, lo cual ocasiona la exposición local o comunitaria por emisiones e inmisiones. En la actualidad existe un desconocimiento de los niveles de contaminación y el impacto de la calidad del aire, constituyendo esta la **situación problemática** que fundamenta esta investigación.

Lo anterior hace referencia a la ausencia de un diagnóstico integral de las emisiones e inmisiones de contaminantes en la Zona, que permita obtener los niveles de concentración y la dispersión que provocan en el aire. Esto constituye un **problema científico** aún no resuelto en este contexto, que necesita la aplicación de métodos del mismo carácter.

Las consideraciones anteriores han contribuido a formular como **hipótesis general** de la investigación lo siguiente:

Es posible realizar un diagnóstico integral en la zona objeto de estudio práctico que permita conocer la calidad del aire mediante mediciones in situ de las inmisiones y emisiones de las principales fuentes, modelación de la dispersión y evaluación de las categorías de impacto y daño ocasionado mediante la aplicación del Eco-Indicador 99.

La formulación de esta hipótesis queda comprobada si:

1. La aplicación de la metodología establecida en la Norma Cubana: 39/ 1999 “Calidad del aire”, posibilita diagnosticar los niveles de emisión y dispersión en un momento dado por las diferentes fuentes estudiadas en esta zona de la ciudad.
2. La evaluación por el software SimaPro v7.1 da la contribución de las emisiones a las categorías de impacto por el modelo Eco-indicador 99.

En concordancia con la hipótesis planteada, el **objetivo general** de esta investigación consiste en: realizar un diagnóstico integral de la calidad del aire en



Introducción

la zona sureste de la ciudad de Santa Clara, que permita analizar los niveles de emisiones de contaminantes en las fuentes ubicadas en el área, modelar la dispersión tomando en cuenta los factores meteorológicos y determinar los impactos y daños de las emisiones a la salud y al ecosistema.

Para el logro de este objetivo general se proponen los **objetivos específicos** siguientes:

1. Confeccionar un marco teórico referencial a partir de una revisión bibliográfica del estado del arte y la práctica sobre las temáticas de contaminación atmosférica.
2. Identificar las principales fuentes emisoras de contaminantes ambientales y analizar los niveles de emisión obtenidos por evaluación experimental en las mismas.
3. Obtener experimentalmente los niveles de inmisiones utilizando analizadores automáticos.
4. Evaluar experimentalmente la emisión de las Baterías de Grupos Electrónicos diesel del Emplazamiento Santa Clara Industrial.
5. Evaluar indicadores medioambientales mediante el modelo Eco-indicador 99 a través del software SimaPro V7.1.
6. Modelar la dispersión de los contaminantes mediante la norma cubana, utilizando los softwares MDNC e ISCST3.

La **novedad científica** de la investigación se enmarca en el desarrollo y adaptación, sobre bases científicas; de una metodología para la evaluación de la calidad del aire y la simulación del comportamiento de las emisiones en la atmósfera con la adaptación de un modelo de dispersión de la Agencia de Protección del Ambiente (EPA), basado en las características climatológicas y topográficas del área. Además en el estudio se aporta la integración de las emisiones e inmisiones no contempladas en las bibliografías consultadas.

La investigación realizada cuenta principalmente con valores teóricos, metodológicos, prácticos y sociales fundamentados en lo siguiente:

El **valor teórico** que sustenta la investigación permite la actualización de los conocimientos en relación de los conceptos obtenidos en la revisión bibliográfica



Introducción

para la confección del marco teórico referencial, derivado de la consulta de la literatura nacional e internacional actualizada sobre los temas de contaminación atmosférica, los contaminantes, sus efectos y transporte, normas de calidad del aire y modelos de dispersión existentes. También se puede emplear como material de consulta en próximas investigaciones sobre el tema.

En el aspecto **metodológico** su valor se manifiesta a través de la aplicación de un diagnóstico integral de la calidad del aire en la zona sureste de la ciudad de Santa Clara el cual contiene conceptos y herramientas pertinentes para el análisis de las emisiones e inmisiones de contaminantes y modelación de la dispersión. Con esto se responde a demandas exigidas por legislaciones ambientales del CITMA para reducir el impacto ambiental de contaminantes al aire en Cuba.

El **valor social** de la investigación radica en la contribución al Sistema de Vigilancia de la Contaminación Atmosférica de una información actualizada del tema y los posibles episodios de contaminación ambiental en la comunidad.

En el ambiente **práctico**, el trabajo constituye una herramienta para los especialistas que trabajan en la gestión de la calidad del aire, de manera integral y con potencialidades para su extensión del diagnóstico en otras áreas.

En el desarrollo de la investigación se emplean varios **métodos y técnicas** entre los que se encuentran los de carácter empírico a través de entrevistas y la observación directa fundamentalmente. Se hace uso también de métodos teóricos incluyendo: el Análisis y Síntesis mediante el análisis comparativo, la revisión bibliográfica y de la documentación especializada y el Sistémico-Estructural para determinar las variables que inciden en el sistema, la descomposición de los elementos que lo forman con sus relaciones. Otro método empleado fue el experimental mediante mediciones directas. También se utilizan software como el SimaPro v7.1, MDNC y el ISSCT3 de la EPA para la evaluación de indicadores y la modelación de la dispersión respectivamente.

Los datos e informaciones utilizados en el trabajo, se suministraron oficialmente por investigaciones del Centro de Estudios de Energía y Tecnologías Ambientales (CEETA), trabajos de diplomas de la Universidad Central de Las



Introducción

Villas, informaciones del Centro Meteorológico Provincial, mediciones realizadas por el Centro Nacional de Investigaciones del Petróleo y el personal de la Batería Grupo Electrónico Santa Clara Industrial.

Para su presentación esta tesis se ha estructurado en tres capítulos; en el primero de ellos se sintetiza toda la fundamentación teórica de la investigación sobre la contaminación del aire, la medición de sus índices de calidad y modelos de dispersión existentes. En el segundo capítulo se realiza una valoración de los resultados de las emisiones e inmisiones de contaminantes gaseosos, que se comparan con los parámetros establecidos en la Norma Cubana y se evalúan indicadores medioambientales. En el tercer capítulo se hace una evaluación de la dispersión por la Norma Cubana y una modelación integral de las fuentes seleccionadas en la Zona. Además, se arriban a conclusiones, se proponen recomendaciones para implementar acciones concretas en futuros estudios, se detalla la bibliografía consultada y los anexos correspondientes.



Capítulo I

Marco Teórico Referencial de la Investigación



1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

Este capítulo tiene como objetivo realizar un análisis teórico de la importancia de la calidad del aire. Se hace una revisión del estado del arte y de la práctica de esta temática contemplando conceptos, definiciones, los efectos de los contaminantes sobre el hombre, su transporte en la atmósfera y la situación ambiental en Cuba. Se profundiza además en las tendencias actuales de la medición de los índices de calidad del aire y la modelación de la dispersión de contaminantes. El cuerpo de este Marco Teórico Referencial sustenta las bases teórico-prácticas de la investigación y en la Figura 1 se presenta el hilo conductor seguido para su construcción.

1.2 La contaminación y el ambiente

Desde la época primitiva el hombre ha incidido en el equilibrio ecológico del planeta. Se puede afirmar que los primeros asentamientos humanos tenían en cuenta el medio ambiente, su ubicación y crecimiento dependían de la presencia de aquellos recursos naturales capaces de satisfacer sus necesidades. Siglos más tarde, el surgimiento de la industria trajo consigo innumerables residuos sólidos, líquidos y gaseosos que se expulsaban al medio. Las ciudades crecían y las industrias quedaban atrapadas en la trama formando parte de sus estructuras.

Dentro de los diferentes conceptos de contaminación ambiental, **Wark (1990) y Díaz (1998)** lo definen como la alteración o trastornos de los distintos medios o ambientes naturales (atmósfera, agua, suelo, etc.) por la presencia de sustancias o formas de energía extrañas, que rompen el equilibrio ecológico y destruyen o dañan a las especies animales y vegetales.

Los problemas asociados a este tema deben ser enfocados desde un punto de vista holístico. No hay forma de resolver el problema de un medio sin considerar también los otros. Hay casos en los que los contaminantes persisten no obstante los esfuerzos que se hacen para su eliminación, tal es el caso de la presencia de sustancias tóxicas y residuos peligrosos, como lamentables realidades de la era industrial.



Capítulo 1. Marco Teórico Referencial

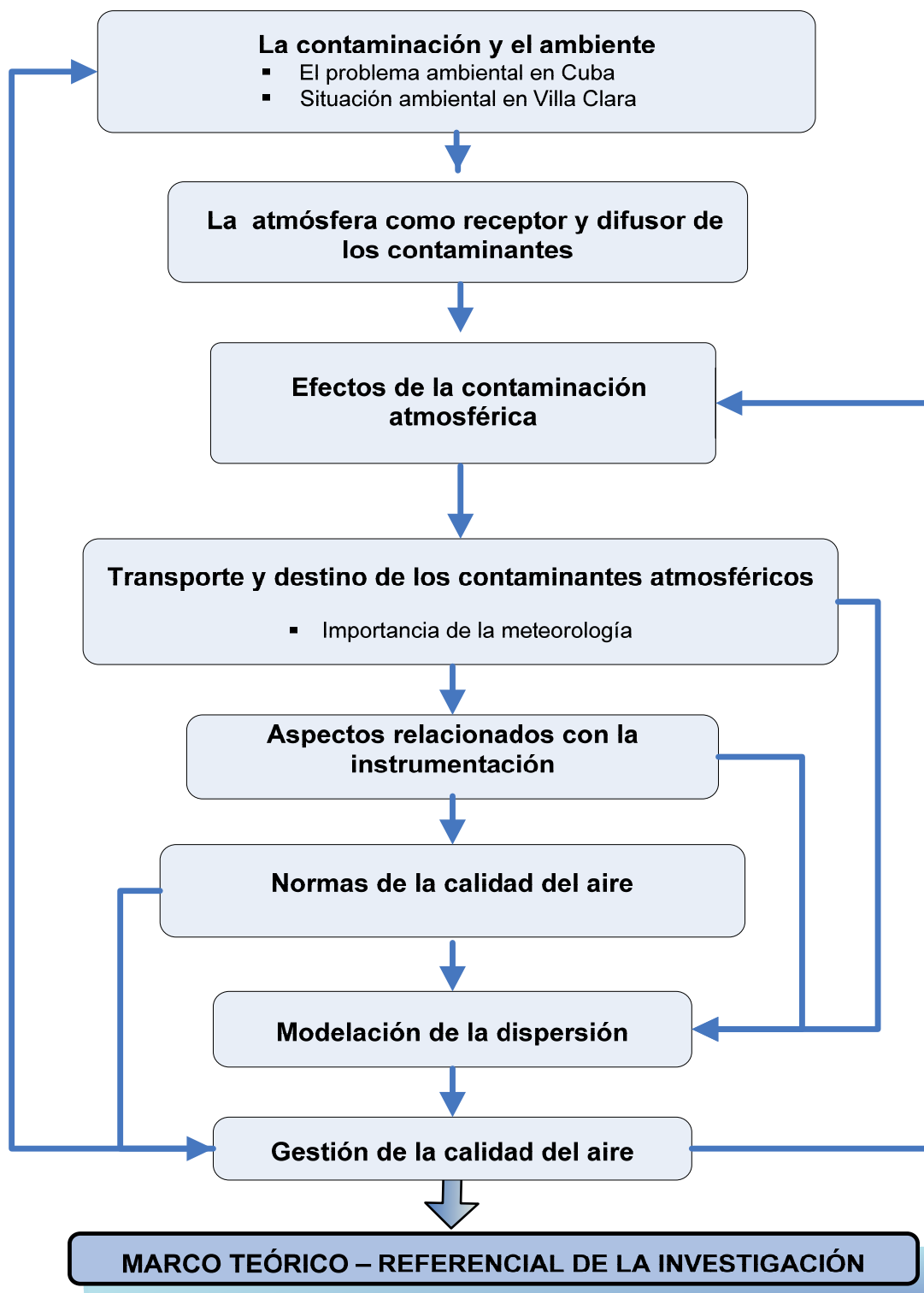


Figura 1. Hilo conductor seguido para la construcción del Marco Teórico Referencial de la investigación. Fuente: Elaboración propia



El **Tabloide Universidad para todos (2006)**, plantea que a partir de la década de los años ochenta del siglo XX, se dio un salto cualitativo en la consideración de la problemática ambiental, al darse a conocer las teorías sobre el agotamiento de la capa de ozono y el recalentamiento de la atmósfera terrestre, lo que ha llevado la consideración del impacto ambiental a una dimensión global. A la luz de la discusión científica sobre la veracidad de estas teorías, la humanidad ha tomado conciencia de que el planeta es la casa común, cuya degradación tarde o temprano repercute sobre todos.

Dentro de los eventos que se desarrollaron para enfrentar esta problemática se pueden citar los trabajos del Club de Roma en 1968, la reunión de Estocolmo en 1972 donde se pretendía un modelo de desarrollo que unificara la economía y la ecología, la fundación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), los convenios sobre cambios climáticos y biodiversidad y la “Cumbre de Río” en 1992. En este último, Cuba presentó un informe donde **Castro (1992)** alertó: “la solución no puede impedir el desarrollo a los que más lo necesitan y la realidad es que todo lo que hoy contribuye al subdesarrollo y a la pobreza constituye una violación flagrante de la ecología”.

Actualmente los países desarrollados son grandes emisores de contaminantes, entre ellos el CO₂, debido al desarrollo industrial que tienen, tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Emisiones de CO₂ por grupos de países. Fuente: IPCC (2005)

Países	Emisiones de CO ₂ 2004 (%)	Emisiones de CO ₂ históricas 1850 - 2002 (%)
Países desarrollados	63,1	76,0
EE.UU.	20,9	29,3
Países subdesarrollados	36,9	24,0
Total	100	100

Por su parte, **Stern (2006)** plantea que los países subdesarrollados son saqueados y carecen de la tecnología adecuada para proteger su ambiente,



además de recursos para llevar a cabo estudios sobre sus propias condiciones climáticas llegando a imitar, en algunos casos, lo realizado por los países del primer mundo sin tener en cuenta la latitud y sus condiciones, lo cual repercute de forma negativa en la economía del país.

Gómez (2003) y **Geo América Latina y el Caribe (2003)**, expresan que la contaminación del aire constituye hoy, uno de los principales problemas ambientales de las ciudades del mundo, tanto en los países desarrollados como en los de mayor atraso tecnológico; en los primeros, por un alto volumen y diversificación de la producción industrial y un flujo intenso de vehículos automotores mientras que en los segundos es por causa del desarrollo no planificado de las escasas industrias, el uso de tecnologías obsoletas en la producción, los servicios y el transporte, la mala calidad del saneamiento básico y el crecimiento urbanístico no planificado.

1.2.1 El problema ambiental en Cuba

El estado cubano desarrolla una política encaminada a salvaguardar el medio en que vive. **CITMA (2005 a)** aprobó la Estrategia Ambiental Nacional (EAN) en el período 2006-2010 que contiene un marco normativo que se respalda en lo siguiente:

- La Constitución de la República de Cuba del 24 de febrero de 1976 que estableció la soberanía nacional sobre el Medio Ambiente y los recursos naturales del país, así como la necesidad de su protección.
- Creación de la Comisión Nacional para la protección del Medio Ambiente y conservación de los recursos naturales, 1976.
- Promulgación de la Ley 33 del 10 de enero de 1981 “De protección del Medio Ambiente y del uso racional de los recursos naturales”.
- Promulgación del decreto Ley 118 de enero de 1990 “Estructura, organización y funcionamiento del Sistema Nacional de Protección del Medio Ambiente y su órgano rector”.
- Modificación en 1992 del artículo 27 de la Constitución de la República, fortaleciendo la idea de la integración del Medio Ambiente con el desarrollo económico y social sostenible.



Capítulo 1. Marco Teórico Referencial

- Aprobación del programa nacional de Medio Ambiente y Desarrollo, adecuación cubana de la Agenda 21 en 1993.
- Creación del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA), en 1994.
- Publicación el 11 de junio de 1997 de la Ley No. 81 “Del Medio Ambiente”, que tiene como objeto establecer los principios que rigen la política ambiental y las normas básicas para regular la gestión ambiental del estado y las acciones de los ciudadanos y la sociedad en general, a fin de mantener el medio ambiente y contribuir a alcanzar los objetivos del desarrollo sostenible del país.

En este documento, los principales problemas ambientales identificados en el país son (**Ley No 81, 1997**):

- Degradación de los suelos.
- Afectaciones a la cobertura forestal.
- Contaminación.
- Pérdida de la diversidad biológica.
- Carencia de agua.

En Cuba, los autores **Díaz Véliz (1998)**, **Díaz Machado (2001)** y **Colectivo de autores (2008)**, expresan que la contaminación del aire tiene sus causas en las deficiencias de algunos aspectos relacionados con la planificación territorial de los asentamientos humanos, las industrias, la utilización de tecnologías obsoletas en las actividades productivas y otras fuentes como el transporte automotor.

En la EAN de 2006-2010 se caracteriza el problema de la contaminación y se plantea la ausencia de tratamiento para las emisiones, inadecuado control sobre los niveles de ruido que se generan y poca difusión sobre los efectos nocivos que provoca sobre la salud y el comportamiento social, el mal estado técnico del transporte y la carencia de normas técnicas sobre emisiones, además no se dispone de un sistema de monitoreo adecuado sobre las emisiones a la atmósfera (**CITMA, 2005 a**).



Los objetivos hasta el 2010 en cuanto a las emisiones a la atmósfera y contaminación sonora van dirigido a prevenir, reducir y controlar la contaminación para mejorar la calidad de vida de la población y las acciones y metas se concretan en monitorear las emisiones, elaborar normas de emisión para las principales actividades productivas, cumplir con el programa nacional para la disminución de consumo de sustancias agotadoras de la capa de ozono, potenciar las investigaciones sobre la contaminación atmosférica y sus efectos, impulsar las prácticas de producción más limpias, fortalecer el sistema de vigilancia y control provocada por fuentes móviles, buscar tecnologías que ofrezcan una mayor eficiencia en los procesos de generación y uso de la energía, identificar e implementar soluciones asociadas a los ruidos y otras vibraciones, utilizar protecciones sonoras en todos los diseños arquitectónicos, etc.

1.2.2 Situación ambiental en Villa Clara

Los principales problemas ambientales del aire en la provincia identificados por **CITMA (2005 b)** en la actualidad se encuentran la presencia de vapores, gases de combustión, polvo y otras partículas en suspensión dada por el uso de combustible de mala calidad, existencia de tecnologías contaminantes, malas condiciones técnicas del transporte automotor y combustión de residuales sólidos. Además existen varios grupos poblacionales expuestos a fuentes fijas de contaminantes atmosféricos que no cuentan con adecuadas zonas de protección sanitaria.

En el área urbana de la ciudad de Santa Clara, o fuera de ella pero con influencias sobre la misma existen 84 fuentes fijas, las que emiten fundamentalmente los gases derivados de la combustión (CO , CO_2 , NO_2 , SO_2 y material particulado). Algunos son potenciales emisores de gases tóxicos, polvos y malos olores según plantea la autora **Cruz (2004)**.

1.3 La atmósfera como receptor y difusor de la contaminación

Los autores **Berlyland (1975)** y **Martín (1999)** definen a la atmósfera como una capa gaseosa que rodea el globo terráqueo. Esta es transparente y no resulta fácil señalar exactamente su espesor, ya que no posee una superficie superior



Capítulo 1. Marco Teórico Referencial

definida que la limite, sino que se va haciendo menos densa a medida que aumenta la altura, hasta ser imperceptible. Ella constituye un recurso natural indispensable para la vida y se clasifica como un recurso renovable. Sin embargo, su capacidad de renovación es limitada, ya que depende de la actividad fotosintética de las plantas, por la cual se devuelve el oxígeno a la atmósfera.

El aire es el medio continuo que transporta y dispersa los contaminantes vertidos a la atmósfera, es una mezcla homogénea de gases y aerosoles. Este es un elemento vital del proceso de la respiración celular de animales y plantas, por lo que puede decirse que sin aire, no hay vida. Los principales componentes del aire seco a nivel del mar son el nitrógeno (78.1%), oxígeno (20.1%), argón (0.9%), dióxido de carbono (0.03%) y el resto de otros gases. El aire puede manifestar diversas calidades: desde un aire altamente oxigenado a la orilla del mar a un aire contaminado en las ciudades, caracterizado por la presencia de gases de mayor o menor toxicidad, y de partículas contaminantes (**Rivas, 2000**). Varios autores han dado diversas definiciones de la contaminación atmosférica entre los que se encuentran: **Wark (1990)**, **Cifuentes (1996)**, **Álvarez (1998)**, **Martín (1999)**, **Novo (1999)**, **Álvarez-Arenas (2000)**, **Zaror (2000)** y **Pichs (2008)**.

En el caso del autor **Álvarez (1998)** brinda una definición muy sencilla de ésta, al considerarla como: cualquiera de los gases presentes en ella, con proporciones superior a la considerada como normal, así como la determinación de sustancias existentes en la misma, contrarias al bienestar de las personas y perjudicial a los bienes que ha creado el hombre o la naturaleza en su conjunto.

La contaminación atmosférica puede tener un carácter global según lo expresa **Álvarez-Arenas (2000)**, cuando los efectos ligados al foco se sufren en las inmediaciones del mismo, o planetario, cuando por las características del contaminante, se ve afectado el equilibrio general del planeta y zonas alejadas a las que contienen los focos emisores.

Los principales mecanismos de contaminación atmosférica planteados por **Cifuentes (1996)** y **García (1997 a)** son: los procesos que implican combustión,



tanto en industrias como en automóviles y calefacciones residenciales, que generan dióxido y monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y azufre, entre otros contaminantes. Igualmente, algunas industrias emiten gases nocivos en sus procesos productivos, como cloro o hidrocarburos in quemados. Las emisiones de dióxido de carbono e hidrocarburos, dos de los principales contaminantes liberados, contribuyen al calentamiento global ya que la presencia elevada de estos productos hace que la radiación reflejada quede atrapada en la atmósfera.

Novo (1999), expresa que se conocen como contaminantes atmosféricos a ciertas sustancias o compuestos cuya presencia en el aire, en determinados valores de concentración, podrían ser dañinos para las diferentes formas de vida. A continuación se presenta una breve descripción dada por varios autores de los contaminantes más importantes que se presentan en la atmósfera.

Partículas:

Se clasifican en función de su tamaño según **Novo (1999)**, que determina fundamentalmente si quedan en suspensión en el aire o se depositan. El material particulado existente en el aire, corresponde a partículas sólidas y líquidas que se encuentran en suspensión en la atmósfera. Su composición química depende de su origen y generalmente constituyen una mezcla de sustancias diversas. Muchas provienen de procesos naturales y son transportadas debido a la acción del viento.

Además, **Austin (1992) y De Nevers (1998)** plantean también que las partículas son originadas por una gran gama de procesos tecnológicos. Las partículas sólidas de tamaño pequeño que se encuentran dispersas en la atmósfera pueden mantenerse suspendidas por largo tiempo, debido a su baja velocidad de sedimentación. Las partículas sólidas de mayor tamaño tienen una velocidad de sedimentación mayor y permanecen menos tiempo en la atmósfera. Estas partículas son eliminadas por retención y arrastre con las gotas de lluvia. Muchas partículas son químicamente inertes, pero pueden absorber sustancias químicas activas presentes en la atmósfera.



Se dividen frecuentemente en diferentes clases, que incluyen polvo fino (menor que $100\mu\text{m}$ de diámetro), polvo grueso (más de $100\mu\text{m}$ de diámetro), vapores ($0.001\text{-}1\mu\text{m}$ de diámetro) y neblinas ($0.1\text{-}10\mu\text{m}$ 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 $1\mu\text{m}$ tienen velocidades de asentamientos pequeñas. Las partículas mayores que $1\mu\text{m}$ tienen velocidades de asentamientos significativas pero aún pequeñas. Las partículas por encima de $20\mu\text{m}$ tienen grandes velocidades de asentamientos y se eliminan del aire por gravedad fundamentalmente.

La **OMS (2004)** plantea que los contaminantes atmosféricos que se monitorean comúnmente están: los sólidos totales en suspensión PST (menor que $100\mu\text{m}$ de diámetro), partículas en suspensión de $\leq 10\mu\text{m}$ de diámetro aerodinámico PM_{10} (polvo fino, fracción respirable) y las partículas con $2,5$ micrómetros o menos de diámetro aerodinámico $\text{PM}_{2.5}$ (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.

Compuestos de azufre:

Los más importantes son el dióxido de azufre (SO_2) y el trióxido de azufre (SO_3). Su principal fuente antropogénica es la combustión de combustibles fósiles ricos en azufre, ejemplo carbón, petróleo, fuel oil y diesel).

Compuestos inorgánicos del carbono:

Según **Ayes (2003)**, los más importantes son los óxidos (CO y CO_2), el primero es el contaminante más abundante en la capa inferior de la atmósfera sobre todo en el entorno de grandes ciudades. El CO_2 se encuentra en aire limpio de modo natural, sin embargo, la producción elevada en las actividades humanas conlleva un incremento de su concentración que puede ser considerada como contaminación y las alteraciones producidas en su ciclo pueden dar lugar a una modificación del clima terrestre (efecto invernadero).



Compuestos de Nitrógeno:

La mayor parte de los óxidos de nitrógenos, que genéricamente se denominan NO_x , se forman por la oxidación del nitrógeno atmosférico durante los procesos de combustión a temperaturas elevadas. Éstos son el óxido nitroso (N_2O), monóxido de nitrógeno (NO), dióxido de nitrógeno (NO_2) y el amoníaco (NH_3).

Ozono:

No es un contaminante primario sino que es generado en el aire como resultado de la acción de la luz solar sobre el NO_2 . Su perfil de concentración aumenta con la altura por descargas eléctricas, las radiaciones X y ultravioletas.

Hidrocarburos:

Esta categoría engloba una amplia gama de contaminantes primarios compuestos por carbonos e hidrógeno. Los más conocidos son los Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC), los hidrocarburos aromáticos (PAH), donde en su mayoría están relacionados con el benceno y además se encuentran también los Halocarburos (CFC's) que son compuestos de cloro y flúor que deben su fama por la acción directa provocada a la capa de ozono.

En la Tabla 2 se describen los principales contaminantes asociados a las diferentes fuentes de contaminación.

Tabla 2. Principales contaminantes emitidos por cada fuente. Fuente: Elaboración propia

Fuente de contaminación	Tipo de contaminante
Transporte	Dióxido de azufre(SO_2), Óxido de nitrógeno(NO_x), Hidrocarburo(Hc) y Partículas suspendidas (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$)
Industrias e instalaciones de servicios	Dióxido de azufre(SO_2), Óxido de nitrógeno (NO_x), Hidrocarburo(Hc) y Partículas suspendidas(PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$)
Suelo, vegetación, etc.	Partículas suspendidas (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$)
Reacciones fotoquímicas	Ozono a partir de emisiones de Hc y NO_x



1.4 Efectos de la contaminación atmosférica

Los efectos producidos por la contaminación atmosférica planteados por **Wagner (1996)**, **Schwartz (1997)**, **Gutiérrez, Romieu y Zaror (2000)** son resultados de:

- Agresividad del contaminante ante la sensibilidad del receptor.
- Niveles de concentración alcanzados.
- Tiempo de exposición.

En función de los receptores hay que diferenciar:

- Seres humanos.
- Materiales y construcciones.
- Ecosistemas.

Romieu (1996), **García (1997 b)**, **Schwartz (1997)**, **OPS (1999)** y la **OMS (2004)** afirman que la contaminación de la atmósfera en los seres humanos es más sensible en las personas de edad avanzada y los niños. El SO_2 y las partículas son los principales responsables de las molestias respiratorias, los NO_x en particular en las formas más estables del NO_2 producen lesiones respiratorias crónicas. Los Hidrocarburos experimentalmente se ha demostrado que tiene efectos mutágenos y cancerígenos. El CO reacciona con la hemoglobina humana, disminuyéndose la capacidad de la sangre para el transporte de oxígeno desde los pulmones hasta los tejidos y en concentraciones elevadas puede ocasionar la muerte. El ozono así como otros oxidantes fotoquímicos produce irritaciones en los bronquios y en los ojos.

En el ambiente físico y socioeconómico tiene impactos negativos, pues produce pérdidas debido a la corrosión, alteración y deterioro de materiales diversos y de sus revestimientos de protección.

La contaminación del aire según **Seoanez (1997)** y **Universidad para todos (2006)**, también provoca numerosas consecuencias negativas de gran incidencia en los ecosistemas, las cuales pueden agruparse de la siguiente forma:

- Problemas ambientales globales (incremento del efecto invernadero, el cambio climático asociado y el agotamiento de la capa de ozono).
- Problemas ambientales regionales (acidificación de la lluvia y el aire).



- Problemas ambientales locales (industrias, transporte, asentamientos humanos y el uso de la energía).

1.5 Transporte y destino de los contaminantes atmosféricos

Una vez que los contaminantes son emitidos, tiene lugar una serie de procesos que van a cambiar en el tiempo y en el espacio. Los factores que determinan la dispersión de los contaminantes fundamentalmente según **Zaror (2000)** y **Clavelo (2004)** son:

1. Parámetros de la fuente.
2. Parámetros meteorológicos.

En los parámetros de la fuente, estos autores afirman que la concentración es proporcional a la cantidad de contaminante emitido y que la concentración en la superficie es menor cuanto mayor es la altura de la fuente. La concentración depende de la cantidad total de gases liberados así como de su temperatura y velocidad.

En los parámetros meteorológicos hay dos factores que están estrechamente ligados con la contaminación atmosférica planteados por **Novo (1999)**, **Zaror (2000)**, **Bluett et al. (2004)** y **Clavelo (2004)**: la dirección y la velocidad del viento y un tercero que influye en la dispersión que es la turbulencia.

La calidad del aire local según estos mismos autores, varía ampliamente, aún cuando las tasas de emisión de contaminantes gaseosos permanezcan relativamente constantes, debido a que una gran parte de los contaminantes atmosféricos son eliminados a través de varios mecanismos físicos y químicos naturales que son:

- Dispersión física.
- Absorción debido a la lluvia.
- Transformaciones fotoquímicas.

Dispersión física:

Los vientos permiten la dispersión de los gases arrastrándolos en dirección horizontal y vertical. La facilidad con que los contaminantes se dispersan verticalmente, está determinada principalmente, por la forma como la



temperatura del aire varía con la altura, lo que es resultante de un complejo balance térmico local. La capacidad de dilución del ambiente aéreo está limitada por la velocidad del viento y por la altura que pueden alcanzar las emisiones gaseosas. Debido a la dispersión, la concentración del contaminante a nivel de suelo varía con la distancia desde el punto de emisión, existiendo un punto o zona de mayor concentración, que representa la zona de máximo impacto debido a tales emisiones.

Absorción debido a la lluvia:

Los componentes de mayor solubilidad en agua serán eliminados por las lluvias y transferidos al suelo y a los cuerpos acuáticos. Su impacto dependerá de la cantidad de contaminantes absorbidos, y las características del área afectada por las precipitaciones. Los sólidos finos serán arrastrados fácilmente por las lluvias, sin que presenten un mayor impacto ambiental posterior. Sin embargo, la lluvia ácida (pH 4-6), formada debido a la absorción de óxidos de azufre y nitrógeno, puede afectar seriamente las tierras forestales y de cultivo, al bajar el pH del suelo, inhibiendo o destruyendo los microorganismos y la flora existente.

Transformaciones fotoquímicas:

En este punto, **Zaror (2000)** menciona que los procesos fotoquímicos atmosféricos transforman los contaminantes volátiles a través de una compleja cadena de reacciones fotoquímicas, dichas reacciones pueden dar origen a contaminantes secundarios nocivos, particularmente en áreas urbanas con altos niveles de contaminación.

1.5.1 Importancia de la meteorología en la contaminación del aire

Como la atmósfera es el medio en el que se liberan los contaminantes, el transporte y la dispersión de estas descargas depende en gran medida de parámetros meteorológicos. La meteorología se usa para predecir el impacto ambiental de una nueva fuente de contaminación del aire y para determinar el efecto de las modificaciones de las fuentes existentes en la calidad del aire (**OMS, 2004**).

Para realizar actividades relativas a la planificación de la calidad del aire, **Bluett et al. (2004)** afirma que es imprescindible comprender la meteorología de la



Capítulo 1. Marco Teórico Referencial

contaminación del aire y su influencia en la dispersión de las sustancias contaminantes. Los planificadores emplean este conocimiento para ayudar a localizar las estaciones de monitoreo de contaminación y para desarrollar planes de implementación orientados al cumplimiento de los estándares de calidad del aire en exteriores.

Cuando la atmósfera es incapaz de dispersar adecuadamente las emisiones que se reciben en un área dada, ya sea porque estas son excesivas o porque las condiciones meteorológicas son desfavorables a la dispersión estas pueden alcanzar niveles capaces de provocar afectaciones al hombre, los animales, la vegetación o al clima. En estos casos, los organismos gubernamentales encargados deben actuar rápidamente para asegurar que los contaminantes no se concentren en niveles inaceptables en el aire y se deben reducir inmediatamente las emisiones a la atmósfera.

La dirección e intensidad del viento (convección horizontal) según **Novo (1999)**, **Zaror (2000)**, **Bluett et al. (2004)** son factores que determinan las zonas que van a recibir las emisiones y con qué intensidad, es decir que a mayor fuerza del viento, mayor posibilidad de mezcla y de dilución, lo que representará menores concentraciones en el suelo. Sin embargo, en algunos casos pueden producirse recirculaciones del viento que generan una circulación en un espacio casi cerrado del aire contaminado, como consecuencia de los efectos aerodinámicos.

La inestabilidad de la atmósfera (convección vertical) determina la facilidad con que las emisiones se diluyen en sentido vertical. La capacidad de difusión vertical de la atmósfera está determinada por la variación vertical de temperatura. El aire se calienta al estar en contacto con una superficie (tierra, mar) y a medida que el aire se va alejando de esa fuente de calor se va enfriando. Si el gradiente térmico existente conlleva que la temperatura del aire se enfría más de prisa a medida que la altura aumenta, la inestabilidad atmosférica es buena y la mezcla vertical del aire será muy favorable a la dispersión. Si el gradiente térmico existente conlleva que la temperatura del aire aumenta a medida que aumenta la altura la dilución vertical se encuentra con



Capítulo 1. Marco Teórico Referencial

una barrera térmica, por lo que la dispersión de contaminantes se hará con muchas dificultades y conduce a grandes episodios de altas concentraciones.

La turbulencia es otro factor de la dispersión de los contaminantes que plantean **Zaror (2000)** y **Bluett et al. (2004)**. Ocurre cuando el movimiento del viento es altamente irregular y se debe a que los coeficientes de difusión turbulenta son de orden de magnitud mucho mayor que los correspondientes a la difusión molecular.

Para el estudio de la dispersión turbulenta se han desarrollado dos teorías básicas según estos autores: Teoría K o gradiente de difusión K y Teoría estadística. La experiencia pone de manifiesto que la concentración decae exponencialmente en las direcciones transversales a la dirección del viento de lo que se deduce que la concentración tiene distribuciones estadísticas normales tanto en y como en z. Esta idea sustenta la teoría estadística de la turbulencia.

Se han dado multitud de criterios para categorizar la turbulencia, uno de ellos es el de **Bueno et al. (1997)** donde los índices más utilizados son los de Pasquill, que establecen seis categorías de estabilidad, desde la A hasta la F siendo la A la más inestable. Parten de la consideración conjunta de la radiación solar y de la velocidad del viento.

El autor **Zaror (2000)** plantea que para fines de modelación, la estabilidad atmosférica se clasifica en base a los criterios establecidos por Pasquill y Gifford, que consideran 6 categorías de estabilidad que se presentan en la Tabla 3, de acuerdo a la velocidad del viento, nubosidad y radiación solar:

Tabla 3. Categorías de estabilidad de la atmósfera. Fuente: Zaror (2000)

Categoría	Estabilidad
A	Atmósfera muy inestable
B	Atmósfera moderadamente inestable
C	Atmósfera levemente inestable
D	Atmósfera neutra
E	Atmósfera moderadamente estable
F	Atmósfera estable



La Tabla 4 muestra las condiciones meteorológicas correspondientes a cada clase de estabilidad atmosférica, de acuerdo a Pasquill y Gifford planteadas por el autor **Zaror (2000)**.

Tabla 4. Clasificación de estabilidad atmosférica de acuerdo a Pasquill y Gifford. Fuente: Zaror (2000)

Velocidad de viento (m/s) (a 10m de altura)	Radiación solar durante el día			Nubosidad nocturna	
	Fuerte	Moderada	Baja	Nublado (> 4/8)	Claro (<3/8)
<2	A	A-B	B	E	F
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

1.6 Aspectos relacionados con la instrumentación

La **OMS (2004)** establece que los métodos de monitoreo del aire se dividen en cuatro tipos genéricos principales con diferentes costos y niveles de desempeño. Estos incluyen los muestreadores pasivos y los activos, los analizadores automáticos y los sensores remotos, que se ampliarán seguidamente

Muestreadores pasivos:

Estos ofrecen un método simple y eficaz en función de los costos para realizar el sondeo de la calidad del aire en una determinada área. A través de la difusión molecular a un material absorbente para contaminantes específicos, se recoge una muestra integrada durante un determinado periodo. Los bajos costos por unidad permiten muestrear en varios puntos del área de interés, lo cual sirve para identificar los lugares críticos donde hay una alta concentración de contaminantes, como las principales o las fuentes de emisión y donde se deben realizar estudios más detallados. Para aprovechar al máximo esta técnica, se debe contar con un diseño cuidadoso del estudio y vigilar los procedimientos de aseguramiento y control de calidad seguidos en el laboratorio durante el análisis de la muestra.



Muestreadores activos:

Las muestras de contaminantes se recolectan por medios físicos o químicos para su posterior análisis en el laboratorio. Por lo general, se bombea un volumen de aire a través de un colector, como un filtro o una solución química, durante un determinado periodo y luego se retira para análisis. Hay una larga historia de mediciones con muestreadores, lo que provee datos valiosos de línea de base para análisis de tendencias y comparaciones. Los sistemas de muestreo para gases, el condicionamiento de muestras, los sistemas de ponderación para el Material Particular en Suspensión (MPS) y los procedimientos de laboratorio son factores claves que influyen en la calidad de los datos finales.

Analizadores automáticos:

Los analizadores automáticos pueden proporcionar mediciones de alta resolución (generalmente en promedios horarios o mejores) en un único punto para varios contaminantes (SO_2 , NO_2 , CO), así como para otros contaminantes importantes. La muestra se analiza en línea y en tiempo real, generalmente a través de métodos electro ópticos: absorción de ultravioleta (UV) o infrarrojo (IR); la fluorescencia y la quimioluminiscencia son principios comunes de detección. Para asegurar la calidad de los datos de los analizadores automáticos, es necesario contar con procedimientos adecuados para el mantenimiento, la operación y el aseguramiento y control de calidad.

Sensores remotos:

Estos son sensores desarrollados recientemente que usan técnicas espectroscópicas de larga trayectoria para medir las concentraciones de varios contaminantes en tiempo real. Los datos se obtienen mediante la integración entre un detector y una fuente de luz a lo largo de una ruta determinada. Los sistemas de monitoreo de larga trayectoria pueden cumplir un papel importante en diferentes situaciones de monitoreo, principalmente cerca de las fuentes. Para obtener datos significativos con estos sistemas, es necesario contar con procedimientos adecuados para la operación, calibración y manejo de datos. Seguidamente, en la Tabla 5 se presentan las ventajas y desventajas de cada uno de los métodos de monitoreo.



Tabla 5. Técnicas de monitoreo del aire con sus ventajas y desventajas. Fuente: Elaboración propia

Instrumentación	Ventajas	Desventajas
Muestreadores pasivos	Muy económicos. Muy simples. Se pueden colocar en números muy grande. Útiles para sondeos, mapeos y estudios de línea de base. No dependen de cables de electricidad.	No se han probado para algunos contaminantes. Por lo general suministran promedios mensuales y semanales. Requieren mano de obra intensiva para su funcionamiento y análisis. Lento rendimientos de datos.
Muestreadores activos	Económicos. De fácil manejo. Cuentan de base de datos históricos. Operación y rendimiento confiables.	Suministran promedios diarios. Requieren de mano de obra intensiva para recolección y análisis de muestras. Requieren de análisis de laboratorio.
Analizadores automáticos	Han sido debidamente probados. Alto rendimiento. Datos horarios. Información en línea.	Sofisticados. Costosos. Demandan alta calificación. Altos costos.
Sensores remotos	Útiles cerca de la fuente. Mediciones de componentes múltiples. Proporcionan datos en función de la ruta y del rango de concentración.	Muy sofisticados y costosos. Soporte, operación, calibración y validación difíciles. No se pueden comparar fácilmente con mediciones puntuales. Visibilidad atmosférica e interferencia.



1.7 Normas de calidad del aire

Para cada contaminante se han establecido guías y normas que cuantifican los límites de concentración en el aire. Según **Barceló (1986)** y **Romero, Diego y Álvarez (2006)**, las guías son recomendaciones para los niveles de exposición a contaminantes atmosféricos a fin de reducir los riesgos o proteger de los efectos nocivos. Las normas establecen las concentraciones máximas permisibles de los contaminantes atmosféricos durante un período definido. Son los valores límites diseñados con un margen de protección ante los riesgos. La finalidad de las normas es proteger la salud humana (normas primarias) y proteger el bienestar del ser humano y los ecosistemas (normas secundarias). En Cuba la norma vigente sobre calidad del aire para zonas habitadas es la **NC 39: (1999)**, que refleja las concentraciones máximas admisibles de algunas sustancias contaminantes. (Ver Anexo 1).

Dicha norma establece los requisitos higiénicos sanitarios en cuanto a las concentraciones máximas admisibles de sustancias químicas contaminantes del aire y los radios mínimos admisibles de las zonas de protección en torno a las empresas industriales y otras, pero también se establece la metodología de cálculo de la dispersión y los cálculos de la sombra aerodinámica de edificaciones y de la dispersión de sustancias contaminantes dentro de la misma.

La **NC 111: (2004)** establece las reglas para el desarrollo de la vigilancia de la calidad del aire en los asentamientos humanos, de acuerdo al grado de contaminación se determina el Índice de Calidad del Aire (ICA), teniendo en cuenta las concentraciones máximas admisibles establecidas en la NC 39: (1999). La misma tiene una escala de seis categorías (Buena, Aceptable, Deficiente, Mala, Pésima y Crítica).

1.8 Modelos de dispersión atmosférica

La modelación de la calidad del aire se basa en la evaluación de los modelos de dispersión de la emisión de una fuente dada para predecir el destino de los contaminantes originados en los procesos generadores, siendo los principales



los procesos de combustión de distintos tipos de fuentes, para luego compararlas con las concentraciones máximas permisibles de acuerdo a las legislaciones vigentes.

Los modelos de dispersión según los autores **Bedoya (1996)**, **Sanclemente (1996)** y **Bueno et al. (1997)**, son herramientas que se utilizan con el fin de determinar la calidad del aire resultante por la emisión de contaminantes desde cualquier tipo de fuente, por medio de formulaciones matemáticas que simulan el comportamiento de las emisiones en la atmósfera, basados en las condiciones termodinámicas de la fuente, la topografía y las diferentes condiciones meteorológicas, tales como: la temperatura, la velocidad del viento y la estabilidad. Teniendo en cuenta la profundidad y alcance de los criterios planteados por **Bueno et al. (1997)**, acerca de los modelos de dispersión atmosférica, la autora los asume como base para el desarrollo del presente epígrafe.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) dispone de un gran número de modelos de dispersión desarrollados para aplicaciones específicas, de uso condicionado por la cantidad y calidad de los datos de entrada requeridos (**EPA, 2002**).

La forma y extensión de la pluma (o penacho) de gases emitidos desde una chimenea depende del diseño de ésta, de la velocidad y temperatura de salida de los gases, del tipo de contaminantes emitidos, del relieve y de la naturaleza del suelo, y de las condiciones meteorológicas locales. Es importante predecir el comportamiento de una pluma, para evaluar el efecto de la emisión sobre la calidad del aire. La **EPA (1997)** y **Zaror (2000)**, afirman que el modelo más utilizado está basado en la suposición de que la concentración promedio del contaminante en la dirección perpendicular al viento, desde la fuente de emisión, presenta una distribución normal de Gauss.

Las características principales del modelo Gaussiano de dispersión que establecen **Bueno et al. (1997)** y el **Ministerio del Medio Ambiente de Colombia (1999)** y **Zaror (2000)** son:

- Supone emisiones continuas, puntuales, de área o lineales.

- La pluma es transportada por el viento a lo largo del eje, a una velocidad igual a la velocidad media del viento.
- La dispersión vertical y horizontal es de naturaleza Gaussiana. No hay sedimentación del contaminante.

Los sistemas ambientales se pueden estudiar mediante la utilización de modelos de caja que se muestran en la Figura 2. Estos se utilizan para comprender el transporte de los productos químicos desde las fuentes estacionarias y móviles hasta la atmósfera.

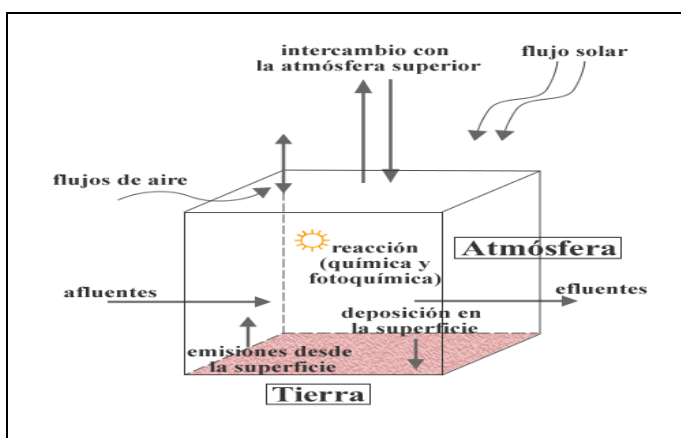


Figura 2. Modelo de caja. Fuente: Bueno et al., 1997

Se manifiestan como necesarios, si se considera que la previsión y para la cuantificación del impacto ambiental atmosférico se necesita un análisis de la modelación de las características básicas del medio emisor, difusor y receptor en su interrelación temporal y espacial. Si bien es cierto que cualquier simulación matemática de un fenómeno tan complejo como lo es la contaminación atmosférica no es nunca exacta, no es menos cierto que los resultados de un modelo son el instrumento más válido en la decisión de la planificación y en la adopción de medidas correctoras ya que con ellos se identifican y se disciernen aquellas zonas con mayor y menor incidencia de la contaminación atmosférica procedente de una instalación o instalaciones determinadas (**Bueno et al., 1997**).

A partir de las concentraciones de los contaminantes en el aire, **Westbrook (1999)** e **IHOBE (2005)** reflejan que se puede conocer el impacto de las emisiones sobre el medio. Estos valores se pueden obtener con equipos de



monitoreo continuo, con técnicas de muestreo y cuantificación analítica en el laboratorio o prediciendo los valores de concentración mediante el uso de los modelos de dispersión una vez medida las concentraciones de las emisiones. El uso de los modelos de dispersión puede predecir la concentración máxima de un contaminante bajo condiciones meteorológicas desfavorables, ayudando a la planeación de la futura fuente y proporcionando un ahorro en cuanto a tiempo y dinero.

La fiabilidad de un modelo esta relacionada directamente con los datos que se poseen, es fundamental que la información meteorológica se sustente en el conocimiento de series extensas y detalladas de los parámetros climáticos.

1.8.1 Clasificación de los modelos

En un modelo de contaminación atmosférica, **Bluett et al. (2004)** considera que debe tenerse en cuenta las características principales del proceso de dispersión, y proporcionar estimados de concentración en la dirección del viento. Cuando se va a seleccionar un modelo de dispersión, se dispone de varios niveles en dependencia de la complejidad matemática, de los datos de entrada y del conocimiento del usuario:

- Modelos básicos: solo se ocupan de una fuente y predicen situaciones extremas basadas en la información meteorológica. Suelen aplicarse antes de emplear modelos más avanzados.
- Modelos intermedios: pueden incluir variantes meteorológicas y fuentes de información más sofisticadas. Entre ellos se encuentran muchos modelos de la EPA, como el modelo SCREEN3 de tipo Gaussiano muy empleado en América y algunos países de Europa.
- Modelos avanzados: requieren de una amplia fuente de datos relacionada con las emisiones y la meteorología, y comprenden múltiples fuentes de tipo puntual, área y volumen. También incluyen características como la complejidad del terreno, el flujo alrededor de las edificaciones y la estructura de las capas de la atmósfera. Algunos ejemplos son los de la EPA (ISCST3, AERMOD, CALPUFF), el modelo británico según **Mocioaca y Stefan (2003)** ADMS y el modelo danés OML.



- Modelos especializados: **Macdonald (2003)** plantea que por lo general se usan para predecir la dispersión de materiales especiales que son peligrosos. Por ejemplo los modelos militares usados en la defensa química y biológica. Estos requieren de una amplia información termodinámica para explicar con detalle las condiciones en que tuvieron lugar las emisiones. Ejemplos de ellos son el SLAB y el DEGADIS

Los autores **Zannetti (1994)**; **Turtós y Díaz (2003)** y **Clavelo (2004)** recomiendan utilizar para análisis de sondeo en dos niveles de análisis, los modelos SCREEN 3 para estudios detallados a escala local el ISCST3 y el ISC-PRIME.

Según **(Bluett et al., 2004)** hay cuatro tipos de fuentes principales utilizadas en la modelación de la dispersión:

- Fuentes puntuales: descargas de una chimenea o de un respiradero.
- Fuentes de área: fuentes con gran área de superficie tales como una superficie de un vertedero, terrenos contaminados, pila de material sólido o una superficie líquida.
- Fuentes lineales: fuentes largas y estrechas como carreteras o ventilación de techo de un largo y estrecho edificio.
- Fuentes de volumen: voluminosas, fuentes difusas tales como emisiones dentro de un edificio.

1.9 Gestión de la calidad del aire

El reconocimiento de que la contaminación del aire no respeta las fronteras nacionales ha dado lugar a acciones significativas para desarrollar enfoques internacionales sobre la gestión de la calidad del aire. Esta se basa en políticas nacionales e internacionales. Una iniciativa global importante fue la de 1983, cuando la Asamblea General de las Naciones Unidas estableció la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo y en el informe elaborado “Nuestro futuro común” por esta comisión introdujo temas ambientales en el escenario mundial y que han contribuido en el campo de la gestión de la calidad del aire. La Agenda 21 que apoya varios principios de la gestión ambiental, sobre



Capítulo 1. Marco Teórico Referencial

las cuales se basan las políticas gubernamentales incluida la gestión de la calidad del aire.

La meta de la gestión de la calidad del aire planteadas por **Murray (1997)**, la **OMS (2004)** y **Zamalloa y Díaz (2005)**, es mantener esta calidad en un estado tal que se protejan la salud y el bienestar humano, reconociendo que la calidad del aire debe permanecer en niveles que protejan la salud humana y también a los animales, plantas, ecosistemas, materiales y calidad estética, incluidos los niveles naturales de visibilidad.

Para lograr este objetivo, es necesario desarrollar políticas y estrategias. El marco de políticas abarca varias áreas, como el transporte, la energía, la planificación, el desarrollo y el ambiente. Una vez que se han desarrollado los objetivos y las políticas, se desarrolla una estrategia o plan de gestión. En un plan de gestión de la calidad del aire, es crucial contar con una cantidad significativa de información sobre las fuentes de las diferentes emisiones.

En función de los costos para la gestión de la calidad del aire las opciones que surgen durante la etapa de planificación de una nueva instalación son las más adecuadas y efectivas, en cambio las que implican cambios en los procesos existentes o de tecnología de control tienen un alcance más limitado.

La educación y la comunicación, la **OMS (2004)** considera que son herramientas importantes para incrementar la conciencia pública sobre los aspectos relacionados con la calidad del aire. El éxito de las estrategias de gestión de la calidad del aire implica acciones en todos los niveles de la comunidad.

En Cuba el sistema de gestión establecido por **CITMA (2005 a)**, proporcionan beneficios tales como:

- Identificar y reducir las acciones y riesgos propios de las actividades que integran el proceso industrial.
- Brindar soluciones más adecuadas para la consecución de la reducción de los residuos gaseosos.
- Identificar, cuantificar, controlar y solucionar los problemas que generan residuos, mediante un programa integral que propicie la búsqueda de soluciones óptimas, ambiental y económicamente compatible.



- Involucrar a todos los trabajadores y a la comunidad localizada dentro de las áreas de influencia en los programas de mejoramiento.

El autor **Ayes (2008)** plantea que la Revolución Energética en Cuba, ha sido colosal y paradigmática, constituyendo un ejemplo de implementación de la Producción Más Limpia (PML) y contribuyendo, por tanto, a la mitigación del cambio climático.

1.10 Conclusiones del primer capítulo

Posterior a la revisión de la literatura especializada de los temas abordados según el hilo conductor representado en la Figura 1, se arriban a un conjunto de conclusiones que se presentan a continuación:

1. El análisis del “estado del arte” ha permitido caracterizar la problemática ambiental del aire como un problema mundial con efectos a corto, mediano y largo plazo y con particularidades en las regiones con diferentes niveles de desarrollo, por lo que ha sido objeto de investigación de muchos autores debido a que es una amenaza para la calidad de vida y la preservación de los ecosistemas.
2. El análisis de la problemática ambiental del aire en Cuba, ha demostrado que la contaminación del aire tiene sus causas en las deficiencias de algunos aspectos relacionados con la planificación urbana, las industrias, la utilización de tecnologías obsoletas en las actividades productivas y otras fuentes como el transporte automotor por lo que la vigilancia de la calidad del aire está dirigida a la recolección y evaluación sistemática de las tendencias que se manifiesta en los niveles de calidad del aire con el propósito general de proteger la salud de la población.
3. Las normas de calidad del aire establecen las concentraciones máximas admisibles (Cma) de un contaminante específico. En nuestro país se encuentra en vigencia la Norma Cubana NC 39: 1999 “Calidad del aire. requisitos higiénicos sanitarios que regula los niveles de inmisión y los radios admisibles de protección sanitaria en función de las complejidades de las fuentes involucradas.



Capítulo 1. Marco Teórico Referencial

4. Como la atmósfera es el medio en el que se liberan los contaminantes, el transporte y la dispersión de estas descargas dependen en gran medida de parámetros meteorológicos como son la temperatura, la presión atmosférica, la humedad relativa, el régimen de vientos, la estabilidad atmosférica, entre otros.
5. Existen fundamentalmente dos formas para medir o estimar la calidad del aire, a través de la medición directa de cada uno de los contaminantes y mediante la aplicación de modelos de dispersión los cuales permiten conocer las relaciones entre las emisiones de las distintas fuentes y la calidad del aire de los receptores.



Capítulo II

Materiales y Métodos



2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Introducción

En este capítulo se presentan las características de la zona objeto de estudio, con la identificación de las principales fuentes generadoras de contaminantes gaseosos y la cuantificación de las emisiones e inmisiones experimentales utilizando analizadores automáticos para el análisis respecto a lo normado sobre la calidad del aire. También se analizan un conjunto de indicadores medio ambientales y su incidencia en la salud y en los ecosistemas.

2.2 Caracterización del área objeto de estudio práctico

La zona sureste de la ciudad de Santa Clara, se caracteriza por ser poco compacta, con edificios multifamiliares, espacios abiertos entre estos y vías más amplias con respecto a otras zonas de esta ciudad. Como premisa para el estudio se tuvo en cuenta que es un área urbana representativa de la exposición general de contaminantes, con vías transitadas y receptores muy bien identificados como son los hospitales, donde asisten diariamente un gran número de personas tanto enfermas como sanas.

Dentro de los resultados obtenidos en el informe **GEO Santa Clara (2008)** se comprobó que el número de pacientes residentes en la zona al sureste de la ciudad que acuden a los cuerpos médicos de guardia de las instalaciones de salud por crisis de asma bronquial es aproximadamente de 25182 casos, representando casi el doble respecto a los casos atendidos en la zona centro (13166), lo que evidencia que la población en el sureste puede estar expuesta a riesgos asociados a la presencia de contaminantes como el SO_2 , NO_2 , etc.

Las principales fuentes fijas emisoras de gases fundamentalmente derivados de la combustión (CO , CO_2 , NO_2 , SO_2) que existen en la zona se detallan en la Tabla 6.

Además otras fuentes reales y potenciales de emisiones de monóxido de carbono y de hidrocarburos son los vehículos que circulan por el área, encontrándose dentro del área arterias principales de la ciudad como son la Carretera Central, la Doble Vía, Calle Colón, Calle Maceo y Circunvalación Sur.



Capítulo 2. Materiales y Métodos

Tabla 6. Principales fuentes fijas emisoras de contaminantes localizadas en la zona objeto de estudio. Fuente: Elaboración propia

Fuente emisora	Tiempo de trabajo promedio (horas/día)
Hospital "Hospital Arnaldo Milián Castro"	12,0
Hospital "Mariana Grajales"	8,0
Hospital "José Luis Miranda"	9,0
Hospital "Celestino Hernández Robau"	9,0
Instituto Superior de Ciencias Médicas	12,0
Policlínico "Chiqui Gómez Lubián"	6,0
Hospital Psiquiátrico "Área Nueve"	12,0
Hospital Cardiocentro "Ernesto Guevara"	12,0
Escuela de Enfermería "Julio Trigo"	8,0
Policlínico "Santa Clara"	6,0
Torrefactora Café "Manuel Ascunce Domenech"	8,0
Centro de elaboración Carretera Central	6,0
Lavatín "La Rotonda"	8,0
Establecimiento de Bebidas y Refrescos	10,0
Restaurante "El Marino"	6,0
Planta de oxígeno y acetileno	8,0
Batería Grupo de electrógeno	6,6
Establecimiento ECOA 44	10,0

Del inventario de fuentes localizadas en esta área se toman para la investigación seis fuentes fijas que son representativas, dentro de ellas se localiza al norte la Torrefactora de café "Manuel Ascunce Domenech", que es una fuente con emisiones combinadas de gases, polvos y olores provocando molestias a la población, en el centro se ubican dos instalaciones hospitalarias que son el Hospital Clínico Quirúrgico "Arnaldo Milián Castro" y el Hospital Pediátrico "José Luis Miranda", el Establecimiento de Bebidas y Refrescos "Osvaldo Socarrás Martínez" y el Instituto Superior de Ciencias Médicas "Serafín Zárate Ruiz" que

utilizan calderas para producir vapor. Por último, al este del área está ubicada la Batería de Grupos Electrógenos Santa Clara Industrial compuesta por 16 motores diesel que generan electricidad, de los cuales se desconocen el impacto que provocan al medio ambiente. La dirección predominante del viento en la ciudad de Santa Clara es del este, por lo que en esa dirección los contaminantes serán transportados más frecuentemente.

La localización del área de estudio dentro de la trama urbana de la ciudad se ilustra en la Figura 3.

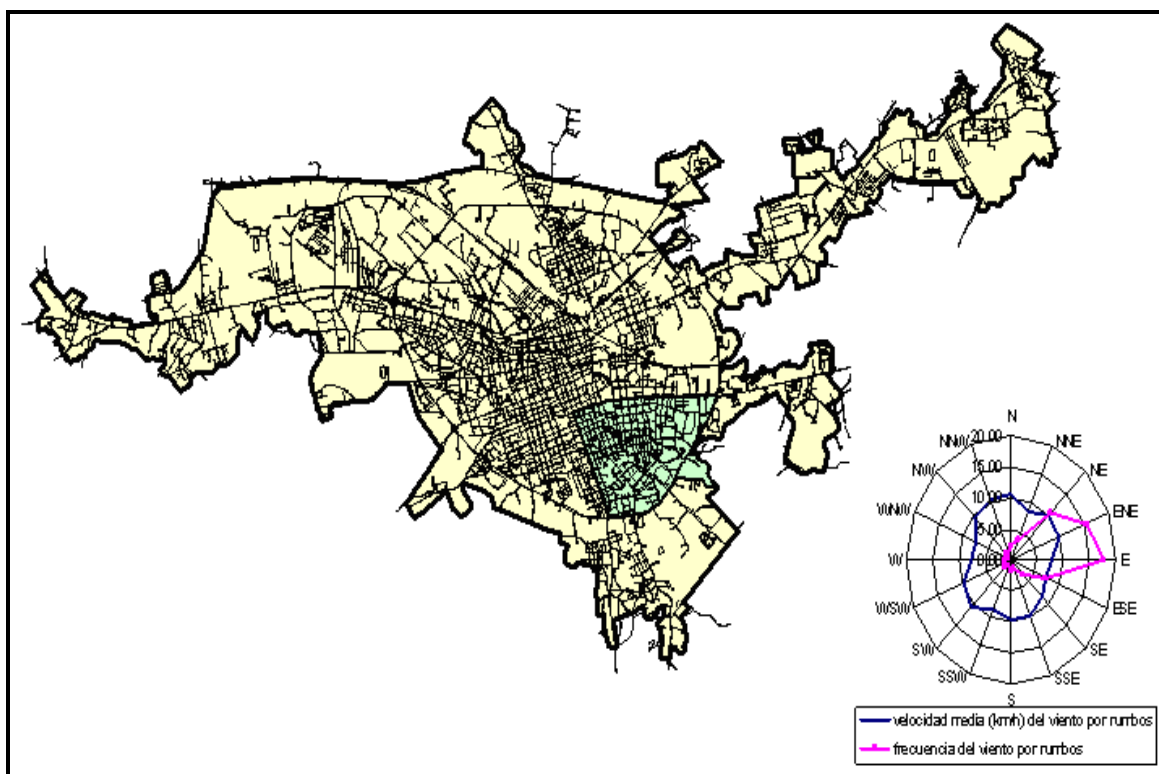


Figura 3. Localización espacial del área objeto de estudio en la ciudad. Fuente: Elaboración propia

2.3 Evaluación experimental de las emisiones

Las mediciones experimentales de los gases emitidos por las fuentes fijas se realizaron con un equipo medidor de emisiones marca ECOM-SG^{PLUS} reconocido por la EPA que se muestra en la Figura 4.

El analizador de gases ECOM-SG^{PLUS} posee cuatro pantallas, en la primera y principal ofrece la composición, la temperatura de los gases de la combustión, la temperatura ambiente, así como el rendimiento de la combustión y las pérdidas.



Figura 4. Equipo analizador de emisiones. Fuente: ECOM-SG^{PLUS} (2000)

También se puede medir con él la presión, temperatura y hacer determinaciones del Índice de Bacharach, el mismo puede trabajar en régimen automático ofreciendo reportes de mediciones según lo establezca el usuario. Estos datos son dados por el equipo en un reporte impreso. Los valores reportados son de emisiones instantáneas y reportadas en partes por millón (ppm) y en por ciento, pero estas magnitudes pueden ser convertidas en (mg/m^3). Las otras tres pantallas muestran la información (durante el transcurso de las mediciones) de valores medios de forma automática en intervalos de tiempos dados. A continuación en la Tabla 7 se muestran los datos técnicos del equipo utilizado.

Tabla 7. Datos técnicos del analizador de gases ECOM-SG^{PLUS}. Fuente: Manual del equipo ECOM-SG^{PLUS}

Datos técnicos del equipo					
Analizador	Variable medida	Rango de medición	Exactitud	Resolución	Medición
ECOM-SG ^{PLUS}	O ₂	0-25%	5%(1,25%) [2%(0,1%)]	0,1%	Sensor Electroquímico
	CO	0-4000ppm	5%(200ppm)[2%(16ppm)]	1ppm	
	NO	0-2000ppm	5%(100ppm)[2%(8ppm)]	1ppm	
	NO ₂	0-2000ppm	5%(100ppm)[2%(1ppm)]	1ppm	
	SO ₂	0-2000ppm	5%(200ppm)[2%(16ppm)]	1ppm	
	Temperatura	0-999 °C	2%(20 °C)	1 °C	Termopar
	Temperatura	0-99 °C	2%(20 °C)	1 °C	



2.3.1 La generación distribuida de la electricidad

La instalación y puesta en marcha de los Grupos de Electrógenos han constituido una de las acciones de la Revolución Energética en Cuba donde se ha combinado la generación de las plantas generadoras con altos consumos de combustibles, con unidades menos consumidoras por unidad de electricidad producida, y de esta forma se suplen las demandas eléctricas en determinadas épocas y horarios minimizando en lo posible los apagones en horarios picos y en época de eventos meteorológicos.

El Emplazamiento Santa Clara Industrial 110 KV, está conformado por dos baterías, cada una de ellas con ocho unidades con motores diesel de combustión interna. Dichos motores están unidos al eje de los generadores, proporcionando la energía mecánica necesaria para moverlos y producir electricidad, pero una parte se elimina a través de los gases de escape lo que provocan una serie de impactos ambientales que afectan a la atmósfera. Los principales contaminantes que se generan en este proceso son:

- El CO por la combustión incompleta del carbono ($C + 1/2O_2 \rightarrow CO$).
- El SO₂ es producido por la reacción entre el oxígeno contenido en el aire de la combustión y el azufre contenido en el combustible ($S + O_2 \rightarrow SO_2$).
- Los óxidos de nitrógeno se forman de la reacción entre el nitrógeno que se encuentra contenido en el aire que se inyecta para la combustión, y el oxígeno del aire ($N_2 + O_2 \rightarrow 2NO$).

Estos grupos utilizan el combustible Diesel Regular con las especificaciones que se detallan en el Anexo 2.

El muestreo realizado para medir las emisiones de los gases en el Emplazamiento Santa Clara Industrial, se efectuó a una capacidad de carga del motor del 75%. Los datos meteorológicos correspondientes al día de la prueba se muestran en el Anexo 3. Se midieron los contenidos de O₂, CO, NO, NO₂, NO_x, SO₂ y CO₂ con el analizador descrito anteriormente. Las pruebas fueron realizadas exactamente en el motor No. 4 de la Batería No. 1 y los resultados obtenidos de la medición se presentan en la Tabla 8.



Capítulo 2. Materiales y Métodos

Tabla 8. Resultados de las mediciones realizadas en el motor No. 4 de la Batería No. 1 Grupos de Electrógenos. Fuente: Elaboración propia

Descripción	Unidad de medida	Mediciones al 75% carga
Temperatura ambiente	°C	27,93
Temperatura del gas	°C	440,14
O ₂	%	10,32
CO	ppm	279
NO	ppm	27,07
NO ₂	ppm	5,9
NO _x	ppm	33,8
SO ₂	ppm	97,6
CO ₂	%	7,7
α	-	2,057

2.3.2 Cálculo del flujo de los gases de combustión

A partir del balance de masa se puede contabilizar las corrientes de gases que entran y salen del proceso, mediante la simulación teórica de las reacciones químicas que se llevan a cabo en la combustión. Para efectuar el mismo es necesario obtener información de las características del combustible y realizar cálculo del consumo de combustible por unidad de tiempo (Kg/seg), haciendo uso de la ecuación 1:

$$\text{Combustible consumido} = \frac{IC * \text{Generación del día}}{\text{horas}} \quad [1]$$

Donde:

IC: Índice de consumo promedio del combustible (g/Kw-h).

Generación del día: Es la generación promedio (Kw-h).

Posterior a esto, se necesita calcular el aire real alimentado (I) que se obtiene a partir de la ecuación siguiente:

$$\alpha = \frac{I}{I_o} \quad I = \alpha * I_o \quad [2]$$



Capítulo 2. Materiales y Métodos

Donde:

I_0 : Es la cantidad de aire teórico necesario para la combustión de 1 Kg. de combustible.

Para hallar I_0 se hace uso de la ecuación 3:

$$I_0 = \frac{1}{0.23} \left(\frac{8}{3} C + 8H - O_c \right) \quad (\text{Kg. aire/Kg. combustible}) \quad [3]$$

En este caso, para el combustible diesel regular: ($C=0,87$; $H=0,126$ y $O_c=0,004$)

α : Coeficiente de exceso de aire o la relación que existe entre el volumen de aire real que se suministra para la combustión y el volumen del aire teórico necesario para que se produzca dicha combustión y se obtiene en las mediciones realizadas.

Para hallar el flujo total de la mezcla de gases y de aire (F_{GA}), se calcula empleando la ecuación 4:

$$F_{GA} = F_C * \alpha * I_0 \quad (\text{Kg. aire/h}) \quad [4]$$

Donde:

F_C : Flujo de combustible (Kg/seg)

Para obtener el caudal de la mezcla (V) en m^3/s , el flujo total de la mezcla de gases y aire, se divide primeramente entre la densidad del aire seco (ρ_{aire}) que tiene una composición de nitrógeno y oxígeno del 21 y 79% respectivamente, utilizando la ecuación 5:

$$\rho_{aire} = 0,79(\rho_{N_2}) + 0,21(\rho_{O_2}) \quad [5]$$

Seguidamente el F_{GA} obtenido en m^3/h , se divide entre 3600seg y queda expresado en m^3/s . Luego la velocidad de salida de los gases de la chimenea (W) se calcula a través de la ecuación 6.

$$W = \frac{4 * V}{\pi * D^2} \quad (\text{m/s}) \quad [6]$$

Siendo:

D : diámetro de la chimenea (m).

El analizador automático de los gases mide la concentración en ppm y se describe como la porción que representa un contaminante como parte de la



Capítulo 2. Materiales y Métodos

mezcla, siempre y cuando todas las sustancias se encuentren en el mismo estado físico, definida en condiciones normales a temperatura de 25⁰C y presión atmosférica de 1 atm.

Para la conversión de ppm a µg/m³ se hace uso de la ecuación 7:

$$(\mu g / m^3) = ppm * \frac{masa molar del gas}{24,436} * 1000 \quad [7]$$

$$1 (mg/m^3) = 1000 (\mu g/m^3)$$

Para que el resultado de la emisión (M), quede expresado en (g/s) se emplea la ecuación 8.

$$M(g/s) = C(mg/m^3) * V(m^3/s) * (g/1000mg) \quad (g/s) \quad [8]$$

Siendo:

C: concentración del contaminante (mg/m³)

Una vez obtenidas todas las ecuaciones necesarias para determinar las emisiones de las fuentes estudiadas, sus resultados se muestran en la Tabla 9.

2.4 Análisis de los resultados de las emisiones

La Expulsión límite admisible (Ela), según lo establece la **NC 39: (1999)** es un parámetro de control que representa el flujo máximo autorizado a ser lanzado a la atmósfera por una fuente emisora, que no provoca niveles de contaminación superiores a las concentraciones máximas admisibles. Este parámetro se determina utilizando la ecuación 9, en el caso de las expulsiones calientes.

$$Ela = \frac{Cma * H^2 * \sqrt[3]{V\Delta T}}{A * F * m * n} \quad (g/s) \quad [9]$$

Donde:

Cma: Concentración máxima admisible

H: altura de la chimenea sobre el nivel del suelo (m)

Δt: diferencia de temperatura entre la mezcla de gases y aire Tg y el aire del ambiente Ta

V: caudal total de la mezcla de gases y aire.

A: Constante de estratificación térmica atmosférica que definen las condiciones de difusión de los contaminantes del aire (A=200) $\left[\sqrt[3]{s^2} * mg * \sqrt[3]{C} * g^{-1} \right]$.



Capítulo 2. Materiales y Métodos

Tabla 9. Resultados obtenidos en el estudio de la Batería Grupos de Electr6genos Santa Clara Industrial 110 KV. Fuente: Elaboraci6n propia

Parámetros	Unidad de medida	Valores
Índice de combustible	g/Kw-h	225
Generaci6n promedio diaria	Kw-h	8222,37
Combustible consumido	Kg/seg	0,02141
Horas promedio trabajadas	h	6.04
Coeficiente de exceso aire te6rico (α)	-	2,057
Cantidad de aire te6rico (I_0)	kg aire/kg comb	14,59
Flujo total de la mezcla	Kg aire/h	2313,44
Densidad del aire	Kg/m ³	1,2880
Flujo de gas y aire	m ³ /h	1796.149
Diámetro de la chimenea	metro	0,45
Caudal de la mezcla	m ³ /seg	0,48939
Velocidad de salida gases	m/seg	3,1386
Concentraci6n		
NO _x	mg/m ³	44,3958
SO ₂	mg/m ³	255,6228
CO	mg/m ³	319,6922
CO ₂	mg/m ³	138214,0
Emisiones		
NO _x	g/seg	0,02215
SO ₂	g/seg	0,12754
CO	g/seg	0,1595
CO ₂	g/seg	68,9593



Capítulo 2. Materiales y Métodos

F: Coeficiente de precipitación de la sustancia contaminante en el aire (F=1).

m y n: Coeficientes de condiciones de emisión a la atmósfera de la mezcla de gases y aire. Para el cálculo de estos coeficientes se emplean las ecuaciones 10, 11, 12 y 13.

$$m = \frac{1}{0.67 + 0.1\sqrt{f} + 0.34\sqrt[3]{f}} \quad [10]$$

Donde:

$$f = 10^3 * \frac{W^2 * D}{H^2 * \Delta T} \quad (\text{m/s}^2 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad [11]$$

Para la Velocidad específica ($0.3 < V_m \leq 2$)

$$n = 3 - \sqrt{(V_m - 0.3) * (4.36 - V_m)} \quad [12]$$

Donde:

$$V_m = 0.65 * \sqrt[3]{\frac{V \Delta T}{H}} \quad (\text{m/s}) \quad [13]$$

Los valores de (Ela) para cada uno de los contaminantes medidos en la fuente se muestran en la Tabla 10. Además se compara con la emisión en cada uno de los contaminantes.

Tabla 10. Comparación entre la expulsión límite admisible y el régimen de emisión en la Batería Grupos Electrógenos. Fuente: Elaboración propia

Contaminante	Concentración (mg/m ³)	Ela (g/s)	Emisión (g/s)
SO ₂	255,6229	0,2174	0,1275
CO	319,6923	2,1746	0,1595
NOx	44,3959	0,0370	0,022

En los resultados, se aprecian que los flujos en los diferentes contaminantes son inferiores al flujo máximo autorizado a ser expulsado, lo cual no provoca niveles de contaminación superiores a las concentraciones máximas admisibles y se garantiza las condiciones higiénicas del aire en el área.

Otros estudios realizados sobre la calidad del aire por los autores **Quintana, Herrera y Jáuregui (2005)** en el área hospitalaria y **Domínguez y Morales**



Capítulo 2. Materiales y Métodos

(2007) en la Torrefactora de Café “Manuel Ascunce Domenech”, con el empleo de la misma instrumentación, revelan el resultado de las emisiones de las demás fuentes fijas del área objeto de estudio práctico, el cual es comparado con las expulsiones límites admisibles, calculadas por la autora. (Ver Tabla 11 y 12).

Cuando se hace la evaluación de las emisiones del contaminante monóxido de carbono, en todas las fuentes en estudio, está muy por debajo del valor de la expulsión límite admisible. Las emisiones de dióxido de azufre en el Hospital “Arnaldo Milián Castro” es superior respecto a la (Ela) en un valor de 1,42 g/s. Las emisiones de los óxidos de nitrógenos superan a la Ela en el Hospital “Arnaldo Milián Castro” y el Instituto Superior de Ciencias Médicas con valores de 0,33 y 0,04 g/s respectivamente. En la Torrefactora de café “Manuel Ascunce Doménech”, las emisiones de los contaminantes, están muy por debajo de las Ela correspondientes a cada uno de ellos.

Tabla 11. Características de las emisiones de las fuentes fijas. Fuente: Quintana, Herrera y Jáuregui (2005)

Instalación	Ela (g/s)			Emisiones (g/s)		
	CO	SO ₂	NO _x	CO	SO ₂	NO _x
Hospital “Arnaldo Milián Castro”	22,756	2,276	0,380	0,066	3,700	0,710
Instituto Superior Ciencias Médicas	20,029	4,006	0,340	0,130	0,370	0,380
Establecimiento de Bebidas y Refrescos	16,380	1,638	0,278	0,024	0,320	0,099
Hospital Infantil Jose Luis Miranda	16,497	1,650	0,280	0,007	0,170	0,061

Tabla 12. Resultados de las emisiones en la Torrefactora de café “Manuel Ascunce Doménech”. Fuente: Domínguez y Morales (2007)

Descripción	Unidad de medida	Valores medidos	Ela (g/s)	Emisiones (g/s)
Temperatura ambiente	°C	35,0	-	-
Temperatura del gas	°C	135,0	-	-
O ₂	%	19,5	-	-
CO	ppm	471,0	9,86	0,4465
NO _x	ppm	5,7	0,16	0,00578
SO ₂	ppm	2	0,99	0,00433
CO ₂	%	1,07	-	15,96
α	-	14,17	-	-

2.5 Medición experimental de las inmisiones

Para determinar las concentraciones de los contaminantes del aire ambiental se utilizó un equipo de medición automatizado, de marca Multiwarn II de la firma alemana Dräger, el cual se presenta en la Figura 5. Este equipo cuenta con una selección de tres sensores electroquímicos distintos (SO₂, NO_x, H₂S), un sensor catalítico (BTX) y un sensor infrarrojo (Hc). Puede medir cinco gases de manera continua y simultáneos, presenta una bomba de aspiración interna de alta potencia y muestra los valores que mide, a través del software “Gas Vision” (Dräger, 2000).



Figura 5. Analizador automático Multiwarn II. Fuente: Dräger (2000)

Capítulo 2. Materiales y Métodos

Para la medición de las condiciones meteorológicas como la velocidad, dirección del viento, temperatura y humedad del viento se utilizó el Skywatch GEOS N°9., como se muestra en la Figura 6.



Figura 6. Equipo de medición de las condiciones meteorológicas. Fuente: Suárez (2008)

Los puntos de muestreo se seleccionaron de acuerdo a la **NC 93 02 203: (1986)** y la **NC 111: (2004)**, los que fueron ubicados en espacios abiertos en todas direcciones, fuera de la acción de la sombra aerodinámica de edificaciones. Las muestras se realizaron en pavimento o en el césped para evitar interferencia con el polvo del suelo, a una altura superior de un metro del suelo. Las concentraciones de las sustancias contaminantes también están referidas a tiempos de 20 minutos como promedio (denominadas mediciones instantáneas). Las mediciones deben ser lo suficientemente representativas para establecer el comportamiento de los contaminantes para diferentes épocas del año y condiciones climáticas, pero por condiciones objetivas de carácter económico fundamentalmente, la recolección de muestras fue limitada. El muestreo fue efectuado in situ en nueve puntos del área, distribuidos espacialmente como se muestran en la Figura 7.

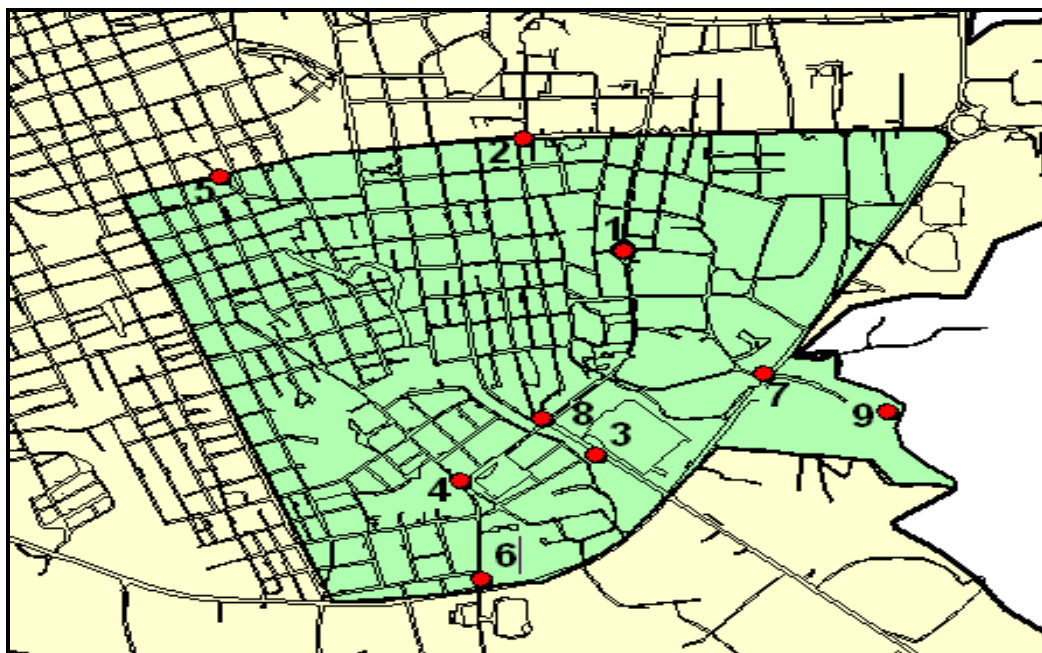


Figura 7. Localización espacial de los puntos de muestreo. Fuente: Elaboración propia

Al seleccionar los puntos, se tuvo en cuenta la incidencia de las fuentes fijas estudiadas y las fuentes móviles, como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13. Descripción de los puntos muestreados y su incidencia con las fuentes fijas y móviles del área. Fuente: Elaboración propia

Puntos	Localización	Incidencia
1	Parque Antonio Maceo y Rotonda Doble Vía.	-Circulación vehicular
2	Carretera Central y Calle 5 ^{ta} Reparto Vigía.	-Torrefactora Café “Manuel Ascunce D” -Circulación vehicular
3	Ave. Hospital “Arnaldo Milián” y Calle 7ma.	-Circulación vehicular -Hospital A. M. Castro
4	Prolongación de Calle Colón y Doble Vía.	-Hospital Infantil José Luis Miranda -Circulación vehicular
5	Carretera Central e/ Colón y Maceo	-Circulación vehicular
6	Prolongación de Calle Colón y Circunvalación Sur	-ISCM -Circulación vehicular
7	Circunvalación Sur y Planta de Oxígeno.	-Batería Grupos Electrógenos -Circulación vehicular
8	Doble Vía y Avenida Hospital “Arnaldo Milián Castro”.	-Circulación vehicular -Hospital Arnaldo Milián Castro
9	Emplazamiento de Batería Grupos Electrógenos	-Batería Grupos Electrógenos



Capítulo 2. Materiales y Métodos

Las mediciones de las concentraciones y de las condiciones atmosféricas en cada punto, se realizaron en el mes de octubre de 2008 para los primeros ocho puntos y en marzo del 2009 se realizó en el punto 9. El horario de las mediciones fue entre las 9:00 a.m. y las 11:30 a.m. El equipo de trabajo que ejecutó las mismas, proceden del Centro Nacional de Investigaciones del Petróleo. Los parámetros meteorológicos emitidos por la estación de la ciudad de Santa Clara para los correspondientes días se presentan en el Anexo 4.

Los reportes obtenidos por ambos equipos en cada uno de los puntos de muestreo se reflejan en la Tabla 14.

Tabla 14. Resultados de los parámetros meteorológicos y las concentraciones de las inmisiones en los puntos seleccionados. Fuente: Elaboración propia

Ptos	Presión (Pa)	Humedad relativa (%)	Temp. Ambiente (°C)	Direc. Viento	Veloc. Viento (m/s)	Concentraciones			
						H ₂ S mg/m ³	SO ₂ mg/m ³	NO _x mg/m ³	Hc ppm
1	998	80,0	25,0	C	0	0,502	0,255	0,008	396
2	999	75,0	28,0	C	0	0,013	0,015	0,019	284
3	1000	75,0	31,0	C	0	0,156	0,300	0,080	3208
4	998	77,0	30,0	C	0	0,000	0,005	0,081	206
5	999	75,0	31,0	C	0	0,000	0,360	0,088	447
6	1000	75,0	30,0	C	0	0,000	0,013	0,007	576
7	1000	76,0	32,0	C	0	0,000	0,265	0,001	386
8	1000	75,0	31,0	C	0	0,154	0,000	0,031	321
9	1001	41,0	33,0	NEE	2,6	0,598	0,289	0,050	573

2.5.1 Análisis de los resultados de las inmisiones

Para realizar el análisis de los resultados obtenidos en las inmisiones se compara con los valores establecidos en la NC 39: (1999). De esto se debe cumplir la siguiente condición:

$$C_m \leq C_{ma}$$

Donde:

C_m: Es la concentración máxima de la sustancia medida.



Capítulo 2. Materiales y Métodos

Cma: Es la concentración máxima admisible de esa sustancia.

La Norma establece las concentraciones máximas admisibles (Cma) en 20 minutos o denominadas instantáneas y en el caso de los Hidrocarburos (Hc), no se regulan por esta norma.

Para el análisis de cada contaminante medido en los diferentes puntos se establece una tabla comparativa con respecto a la Cma para cada contaminante, que se presentan en las Tablas 15, 16 y 17.

Tabla 15. Comparación de las concentraciones de SO₂ en cada punto medido.
Fuente: Elaboración propia

Puntos	Cm (mg/m ³)	Cma (mg/m ³)	Cm ≤ Cma
1	0,255	0,500	si
2	0,015	0,500	si
3	0,300	0,500	si
4	0,005	0,500	si
5	0,360	0,500	si
6	0,013	0,500	si
7	0,265	0,500	si
8	0,000	0,500	si
9	0,289	0,500	si

Tabla 16. Comparación de las concentraciones de H₂S en cada punto medido.
Fuente: Elaboración propia

Puntos	Cm (mg/m ³)	Cma (mg/m ³)	Cm ≤ Cma
1	0,502	0,008	no
2	0,013	0,008	no
3	0,156	0,008	no
4	0,000	0,008	si
5	0,000	0,008	si
6	0,000	0,008	si
7	0,000	0,008	si
8	0,154	0,008	no
9	0,598	0,008	no



Capítulo 2. Materiales y Métodos

Tabla 17. Comparación de las concentraciones de NO_x en cada punto medido.
Fuente: Elaboración propia

Puntos	Cm (mg/m ³)	Cma (mg/m ³)	Cm ≤ Cma
1	0,008	0,085	si
2	0,019	0,085	si
3	0,080	0,085	si
4	0,081	0,085	si
5	0,088	0,085	no
6	0,007	0,085	si
7	0,001	0,085	si
8	0,031	0,085	si
9	0,050	0,085	si

2.6 Indicadores Ambientales

El sistema de indicadores ambientales referidos a la contaminación atmosférica, el cual está aprobado por el Grupo Nacional de Indicadores contempla lo siguiente:

1. Emisiones de gases de Efecto Invernadero que afectan al calentamiento global.
2. Emisiones de gases de Efecto Invernadero por Contaminantes Individuales (CO₂, CH₄, N₂O).
3. Emisiones brutas de gases de Efecto Invernadero por sectores de la economía expresadas en CO₂ equivalente (CO₂ – e).
4. Emisiones Per. Cápita de CO₂, Carbono y CO₂ - e.
5. Emisiones de SO₂ desde fuentes antropogénicas.
6. Consumo total SAO.
7. Consumo de Clorofluorocarbono (CFCs) .
8. Crisis aguda de asma bronquial.
9. Tasa de morbilidad atribuible a las enfermedades respiratorias agudas.

El impacto producido por las emisiones de gases a la atmósfera de las fuentes estudiadas se traduce en un Eco-indicador integral para entender mejor su



Capítulo 2. Materiales y Métodos

significado ambiental. Este Eco-indicador es el 99 el que se enfoca al daño ocasionado por un proceso producto o actividad a la salud humana, calidad del ecosistema y al suficiente suministro de recursos.

Dentro de las categorías de impacto se encuentran las categorías de contaminación, que incluyen el calentamiento global, la toxicología humana y ecotoxicología, la formación de ozono, la acidificación y la eutroficación, entre otras. Para cada categoría de impacto, según el autor **González (2007)** se puede calcular el indicador de impacto ambiental. En la Tabla 18 se muestran las características del modelo utilizado.

Tabla 18. Modelo de impacto. Fuente: González (2007)

Modelo de impacto		
Modelo	Compañía desarrolladora	Comentarios
Eco indicador 99	Pre consultants con colaboración de científicos suizos.	Considera 11 categorías de impacto: cancerígenos, orgánicos respirados, cambio climático, radiación, capa de ozono, ecotoxicidad, acidificación-eutroficación, uso del suelo, minerales y combustibles fósiles. Incluye enfoque de daños, usa indicadores de categorías finales. Ponderación por medio de un panel (especialistas en medio ambiente).

El modelo para la categoría final de impacto de cambio climático, toxicidad humana y acidificación correspondiente al Eco-indicador 99, se presenta en la Tabla 19.

De acuerdo a los resultados obtenidos de las emisiones y con la información de la cantidad de residuos generados por unidad de producción que se muestran en el Anexo 5, es posible evaluar las categorías de impacto afectadas de acuerdo a la metodología desarrollada por el Software SimaPro v7.1 con el Eco-indicador 99. Las emisiones tributan a las siguientes categorías de impacto que a la vez se relacionan con los indicadores 2, 4 y 5 mencionados anteriormente del Sistema Nacional de Indicadores.



Capítulo 2. Materiales y Métodos

Las informaciones de los datos de entrada al software, pertenecen a los autores **Quintana, Herrera y Jáuregui (2005)** y en el caso de la Batería Grupo Electrónico se obtuvieron de la investigación propia de la autora.

- Cambio climático. Está influenciada por las emisiones de Gases de Efecto Invernadero por Contaminantes Individuales (CO₂, CH₄, N₂O) y por emisiones per. cápita de CO₂, Carbono y CO₂-equivalente.
- Respiración de inorgánicos. Está influenciada por las emisiones de NO₂
- Acidificación. Está influenciada por las emisiones de SO₂ y NO₂.

Tabla 19. Modelo para la categoría de cambio climático. Fuente: González (2007)

Modelo de impacto		
Categoría de impacto (j)	Categoría final	Variables de caracterización
Cambio climático	$Q_{ji} = \sum_{n=1}^6 [GWP_i^{ref} jF_{ref_i} X_{(T)} E^n D]$	GWP = Potencial de calentamiento global. Ref. = CO ₂
Toxicidad humana	$Q_{ji} = \left(\sum_s N_s \sum_r C_{i,e,r,s} E_{i,r} \right) D$	C = Concentración en estado firme.
Acidificación	$Q_{ji} = F_{i,e,f} E_{i,f} D_f$ $= C_{i,e,f} \Delta_{i,e} \frac{1}{NOEC_{i,f}} \frac{\partial PAF_f}{\partial y} I_{y=x} Areq$	C = Concentración en estado firme. NOEC = Concentración de estado no observada. PAF = Fracción potencial afectada en especies.

En la Figura 8 se muestran los resultados obtenidos por el Software SimaPro V7.1 y donde se puede observar que las categorías afectadas son cambio climático, acidificación y respiración por inorgánicos, siendo esta ultima la de mayor incidencia traducida en 60 puntos y la fuente que mas tributa a esta categoría de impacto es la Batería Grupos Electrónicos que representa el 60% con 36 puntos. Las otras fuentes que tributan en alguna medida a estas tres categorías de impacto son las calderas del Hospital “Arnaldo Milián Castro”,

calderas del Establecimiento de Bebidas y Refrescos y las del Instituto Superior de Ciencias Médicas (ISCM) respectivamente.

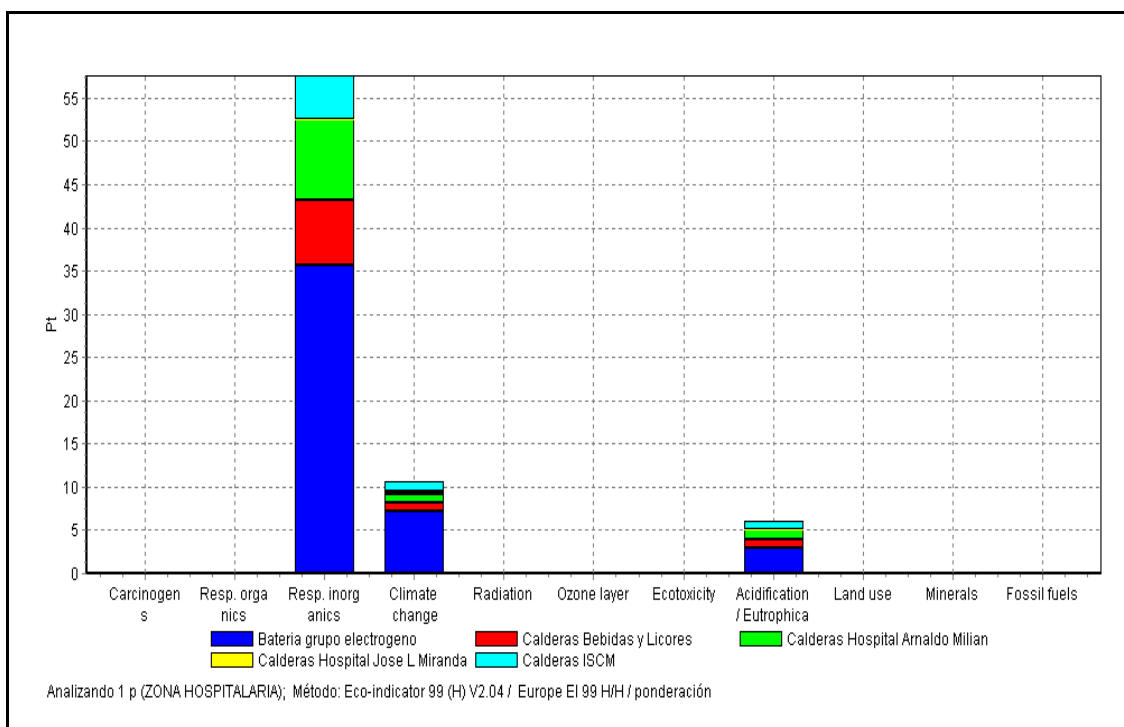


Figura 8. Nivel de afectación sobre las categorías de impacto por fuentes. Fuente: SimaPro v7.1 (2009)

Si analizamos en cada fuente las tres categorías de impacto se observa que la respiración por inorgánico es la categoría de mayor afectación. En el análisis por fuente, los grupos electrógenos son los que mas afectan y que la incidencia de las emisiones del Hospital Infantil “José Luis Miranda” son insignificantes, evidenciándose una buena gestión de esta entidad desde el punto de vista ambiental lo cual fue corroborado en el epígrafe 2.4, el caudal de los gases y el diseño de la chimenea traducido en la velocidad de salida de los mismos. (Ver Figura 9).

Finalmente en la Figura 10, se observa que la categoría de daño mas afectada en esta zona producto de las emisiones en las fuentes estudiadas, es la salud humana con 68 puntos y una relativa pequeña incidencia en la calidad del ecosistema.

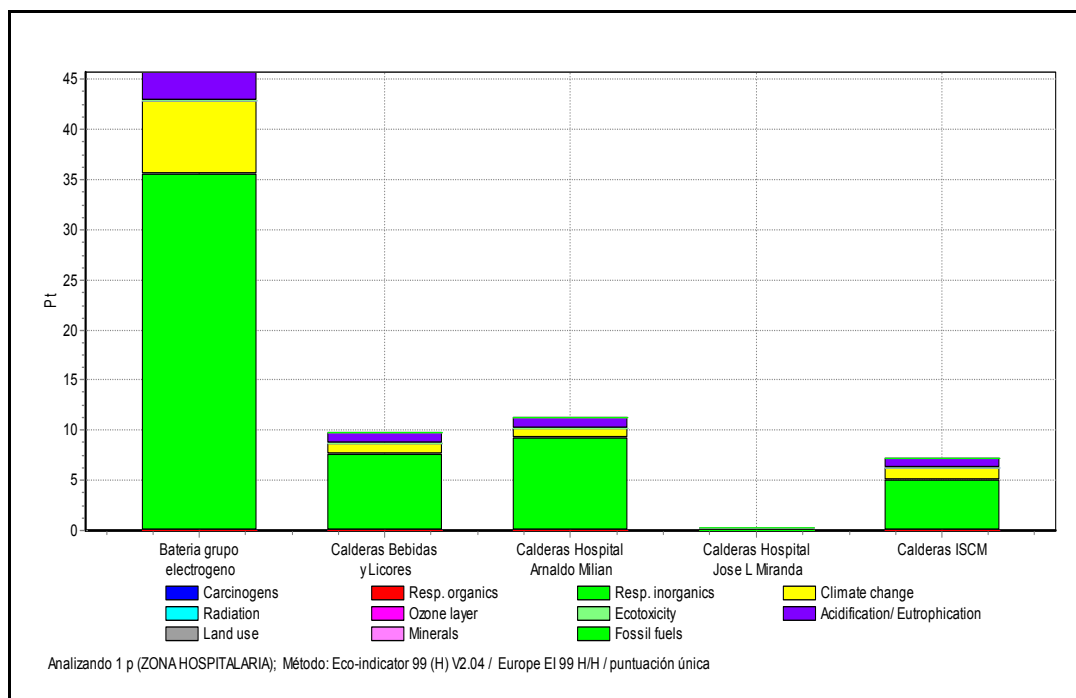


Figura 9. Incidencia de las emisiones sobre las categorías de impacto. Fuente: SimaPro v7.1 (2009)

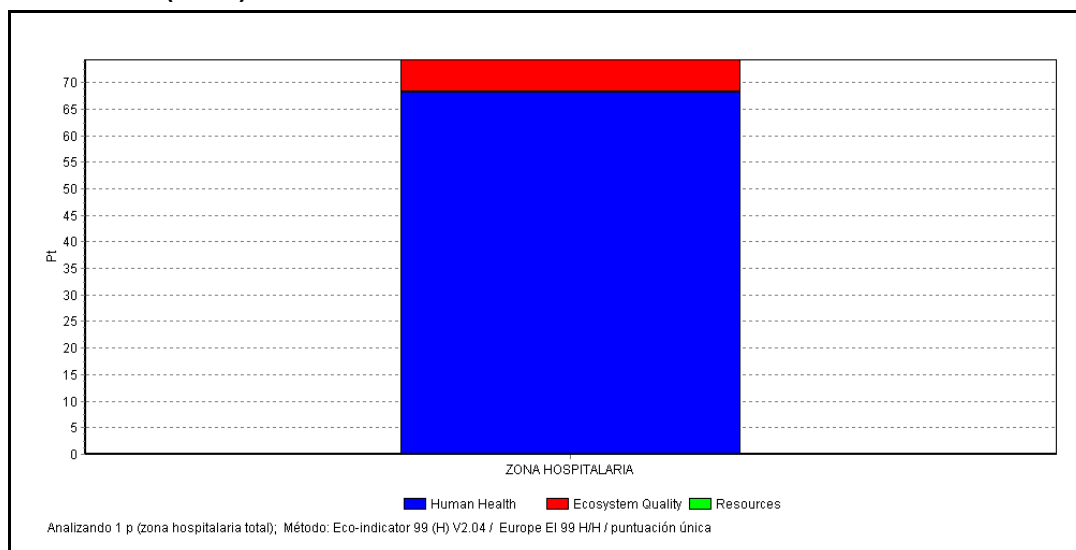


Figura 10. Daño ocasionado por el proceso en la zona. Fuente: SimaPro v7.1 (2009)

2.7 Conclusiones del segundo capítulo

Una vez finalizado el análisis de las emisiones, inmisiones y la evaluación de los indicadores ambientales en la zona, se presentan las conclusiones derivadas del estudio:



Capítulo 2. Materiales y Métodos

1. En el comportamiento de las emisiones de contaminantes en cada fuente, se aprecia de forma general que la emisiones de los distintos contaminantes no sobrepasan las expulsiones límites admisibles, excepto en el Hospital “Arnaldo Milián Castro” para los contaminantes SO_2 y NO_x .
2. En el análisis de las inmisiones de la zona, solamente los niveles de concentración medidos del contaminante H_2S supera a la Cma establecida por la NC 39: (1999) en varios puntos con una gran incidencia de la circulación vehicular.
3. A través del Eco Indicador 99 se evidencia que las categorías de impacto afectadas son cambio climático, acidificación y respiración por inorgánicos con daños a la salud y al ecosistema
4. En la zona, la fuente de mayor incidencia sobre las categorías de impacto, es la Batería Grupos Electrógenos, siendo la respiración por inorgánico la categoría más afectada.
5. Las emisiones del Hospital “Pediátrico” José L. Miranda” no tributan significativamente a las categorías de impacto afectadas.



Capítulo III

Dispersión de los contaminantes



3. DISPERSIÓN DE LOS CONTAMINANTES

3.1 Introducción

A partir de los resultados obtenidos de la medición de las emisiones e inmisiones en el área objeto de estudio y con la intención de darle cumplimiento a la hipótesis de investigación formulada, se realizó la modelación de la dispersión de los contaminantes por dos vías: a través del software MDNC basado en el contenido de la NC 39: (1999) y el software ISCST3 ,Versión 3.5® para Windows®,el cual cumple con los requisitos para la modelación de la dispersión de los contaminantes en la atmósfera y trabaja sobre modelos matemáticos elaborados por la EPA. La modelación, persigue como objetivo fundamental evaluar la dispersión y las zonas de mayor concentración de contaminantes en el área.

3.2 Modelo Gaussiano

Según los planteamientos de las fuentes **Ministerio del Medio Ambiente de Colombia (1999)** y **Zaror (2000)**, los modelos de dispersión más usados son los de estado de pluma Gaussiana basados en la suposición de que la concentración promedio del contaminante en la dirección perpendicular al viento desde la fuente de emisión presenta una distribución normal de Gauss, o sea, el perfil de concentración promedio presentaría el mayor valor de concentración en la zona central, disminuyendo hacia la periferia de la envoltura, de modo similar a una distribución Gaussiana. Para la aplicación de este modelo se requiere tanto de la información de la fuente como de la información meteorológica.

Las condiciones de estado de este modelo son permanentes, es decir, la tasa de emisión de contaminantes, su temperatura y velocidad de salida, así como las condiciones meteorológicas, se mantienen constantes. Además, supone que el contaminante no sufre transformaciones químicas, ni se absorbe en la superficie del suelo.

Las características principales del modelo Gaussiano de dispersión planteadas por el **Ministerio del Medio Ambiente de Colombia (1999)** y **Zaror (2000)** son:

- 1.** Supone emisiones continuas.

Capítulo 3. Dispersión de los contaminantes

2. La pluma es transportada por el viento a lo largo del eje, a una velocidad igual a la velocidad media del viento.
3. La dispersión vertical y horizontal es de naturaleza Gaussiana.
4. No exista sedimentación del contaminante.

En la Figura 11 se muestra en una chimenea la predicción de la emisión de los contaminantes a nivel de suelo, cuando $Z=0$ y el viento en la dirección X. La concentración se obtiene a partir de la Ecuación 14.

$$C_{XY} = \frac{Q}{\pi v \sigma_Y \sigma_Z} \left(\exp\left(\frac{-(Z-H)^2}{2\sigma_Z^2}\right) \right) \left(\exp\left(\frac{-Y^2}{2\sigma_Y^2}\right) \right) \quad [14]$$

Donde:

$C_{X,Y}$: Concentración a nivel del suelo, en el punto (X; Y) (mg/m^3)

X: Distancia en la dirección del viento desde el punto de emisión de los gases (m).

Y: Distancia horizontal desde el eje central de la pluma (m).

Q: Flujo másico de contaminantes emitidos (mg/s).

h: Altura de la chimenea (m).

H: Altura efectiva de elevación de la pluma (m).

V: Velocidad del viento a la altura efectiva de la pluma (m/s).

σ_Y : Coeficiente de dispersión horizontal (m).

σ_Z : Coeficiente de dispersión vertical (m).

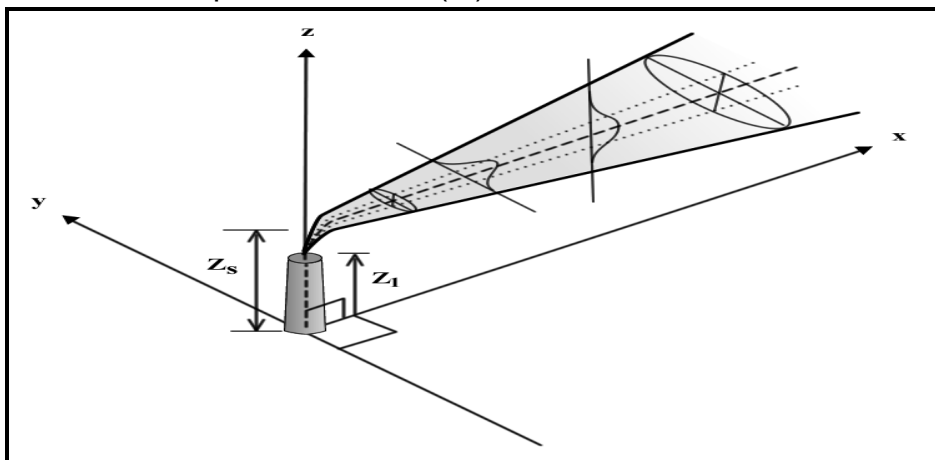


Figura 11: Emisión de contaminantes desde la altura de una chimenea. Fuente: Zaror (2000)



Capítulo 3. Dispersión de los contaminantes

Los modelos de pluma Gaussiana son generalmente aplicables cuando:

1. Los contaminantes son químicamente inerte.
2. El terreno es complejo.
3. La meteorología se puede considerar uniforme espacialmente.
4. Hay pocos períodos de calma o de vientos suaves.

3.3 Aplicación de la metodología de cálculo por la NC 39: (1999)

La metodología es aplicable a empresas industriales y entidades de servicios, que generen sustancias contaminantes al aire, con el fin de proteger los asentamientos humanos. Esta brinda el volumen de información requerido para la ejecución de los cálculos de dispersión de las sustancias contaminantes del aire expulsadas por chimeneas bajo condiciones meteorológicas desfavorables y sus ecuaciones están referidas a un intervalo promedio fijo de tiempo fijo de 20 minutos.

El modelo está basado en la NC 39: (1999), que relaciona los niveles de inmisión en un punto con la cantidad de contaminantes vertidos a la atmósfera desde el foco emisor, teniendo en cuenta las condiciones de emisión de los gases y las características climáticas y topográficas del medio receptor. El valor de la concentración máxima (C_m) de una sustancia contaminante del aire, provocado por las expulsiones de una fuente de emisión dada, estará restringido por el valor de su concentración máxima admisible (C_{ma}).

La condición a cumplir es: $C_m \leq C_{ma}$

La Norma, establece varias de las C_{ma} en 20 min que se muestran en el Anexo 1. Para el caso del estudio se analizaron solamente las sustancias SO_2 , CO , NO_2 y H_2S en el aire para zonas habitables **NC 39: (1999)**.

3.3.1 Cálculo de la dispersión de contaminantes calientes expulsados a la atmósfera bajo condiciones meteorológicas desfavorables

Para determinar el valor máximo probable de la concentración (C_m) de un contaminante expulsado a la atmósfera a través de una chimenea, bajo condiciones meteorológicas desfavorables se utiliza la ecuación siguiente:

$$C_m = \frac{A * Q * F * m * n}{H^2 * \sqrt[3]{V * \Delta T}} \quad (\text{mg/ m}^3) \quad [15]$$



Capítulo 3. Dispersión de los contaminantes

Donde:

Q: Representa el flujo máximo del contaminante a la salida de la chimenea expulsada al aire.

A, F, m, n, H y Δt : se describieron en la ecuación 9 del epígrafe 2.4

V: Se obtiene a partir de la ecuación 6.

Otro parámetro necesario es la Determinación de la velocidad crítica del viento (U_m), en función de la velocidad específica. Esto toma en cuenta las peores condiciones meteorológicas para que se produzca la dispersión del contaminante. Teniendo en consideración que:

Cuando: $V_m \leq 0.5$ entonces $U_m = 0.5 \text{ (m/s)}$

Cuando: $0.5 < V_m \leq 2$ entonces $U_m = V_m$

Cuando: $V_m > 2$ $U_m = V_m * (1 + 0.12 * \sqrt{f})$, donde f se obtiene a partir de la ecuación 11.

Determinación de la Distancia entre la chimenea y el punto donde se produce la concentración máxima del contaminante (X_m).

Se precisa que la concentración máxima de un contaminante emitido a la atmósfera bajo condiciones meteorológicas desfavorables, se produce a sotavento (en la dirección del viento) de la fuente, en un punto situado en esta dirección (Eje X), la cual se determina a través de la ecuación 16, que se muestra seguidamente:

$$X_m = d_o * d * H \quad (\text{m}) \quad [16]$$

Cuando: $F = 1$ $d_o = 1$

Cuando: $V_m \leq 2$ se utiliza la ecuación 17:

$$d = 4.95 * V_m (1 + 0.28 * \sqrt[3]{f}) \quad [17]$$

Cuando: $V_m > 2$ se emplea la ecuación 18:

$$d = 7 * \sqrt{V_m} (1 + 0.28 * \sqrt[3]{f}) \quad [18]$$



Capítulo 3. Dispersión de los contaminantes

El otro parámetro que se determina es la Concentración máxima de un contaminante a una velocidad del viento diferente de la crítica (C_{mu}), que bajo condiciones meteorológicas desfavorables, se halla por la ecuación 19:

$$C_{mu} = r * C_m \quad [19]$$

Donde:

r es un coeficiente que se determina en función de la razón expresada en la ecuación 20:

$$R = \frac{U}{U_m} \quad [20]$$

$$\text{Cuando } R \leq 1 \quad r = 0.67 * R + 1.67 * R^2 - 1.34 * R^3 \quad [21]$$

$$\text{Cuando } R > 1 \quad r = \frac{3 * R}{2 * R^2 - R + 2} \quad [22]$$

3.3.2 Modelo físico-matemático utilizado para la modelación de la dispersión por la Norma Cubana (MDNC)

El software MDNC fue programado en Delphi y diseñado por **Rosell (2008)**, para apoyar las opciones de la modelación regulada en la Norma Cubana, que se basa en el algoritmo de cálculo contenido en la **NC 39: (1999)** y fue validado por la autora **Suárez (2008)**.

Los datos de entrada que se utilizan para regular las opciones de modelación son:

A: Constante de estratificación térmica atmosférica que define las condiciones de difusión de los contaminantes del aire ($A=200$)

H: Altura de la chimenea sobre el nivel del suelo (m)

F: Coeficiente de precipitación ($F=1$ para sustancias gaseosas y partículas muy finas prácticamente no precipitables).

W: Velocidad de salida de la mezcla de gases y aire (m/s)

D: Diámetro de la chimenea (m)

Tg: Temperatura de la mezcla de gases y aire (K)

Ta: Temperatura del aire ambiental ($^{\circ}\text{C}$)

U: Velocidad del viento (m/s)



Capítulo 3. Dispersión de los contaminantes

V: Caudal de la mezcla de gases y aire (m^3/s)

Otros datos necesarios son los meteorológicos, obtenidos del archivo de clima del Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara, que se muestran en el Anexo 3.

Los resultados que brinda el software tienen como posibilidades la determinación de:

- La concentración máxima (C_m) de un contaminante referido a un intervalo promedio fijo de tiempo de 20 minutos (concentración instantánea).
- La velocidad crítica del viento para la chimenea (U_m) bajo la cual tiene lugar la concentración máxima, siendo las demás condiciones meteorológicas también desfavorables.
- La distancia entre la chimenea y el punto donde se produce la concentración máxima del contaminante (X_m).
- La concentración máxima de un contaminante bajo condiciones meteorológicas desfavorables pero siendo la velocidad del viento diferente de la crítica (C_{mu}).

Los valores calculados C_m , U_m , X_m y C_{mu} por el software en 20 minutos en las condiciones más desfavorables de dispersión aparecen en el Anexo 6.

Los resultados de las concentraciones máximas expulsadas a la atmósfera de los diferentes contaminantes en un tiempo de 20 minutos (concentración instantánea) en la dirección de sotavento y en condiciones desfavorables de velocidad del viento correspondientes a cada fuente empleando dicho el software y su comparación con la NC 39:1999, se analizan a continuación:

- La concentración máxima de CO en todas las fuentes de la zona es muy baja respecto a la concentración máxima admisible establecida en la Norma, tal como se ilustran en la Figura 12. Por lo tanto este contaminante es prácticamente despreciable, no constituyendo un riesgo en la actualidad.

Capítulo 3. Dispersión de los contaminantes

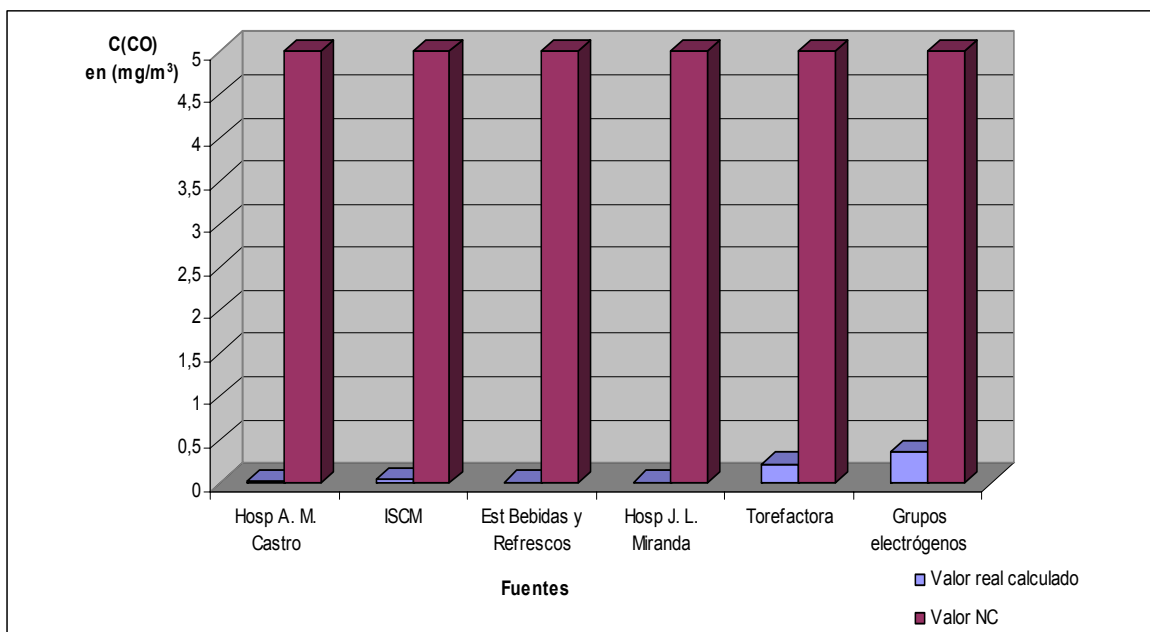


Figura 12. Comparación de las concentraciones de CO con los límites establecidos en la NC 39: 1999. Fuente: Elaboración propia

- En el caso del SO₂, la concentración máxima calculada solo supera el límite admisible en la fuente fija del Hospital Arnaldo Milián, en 0,3161 mg/m³ a la cual se le debe prestar atención por la concurrencia de grupos de población sensibles. Los resultados calculados se muestran en la Figura 13.

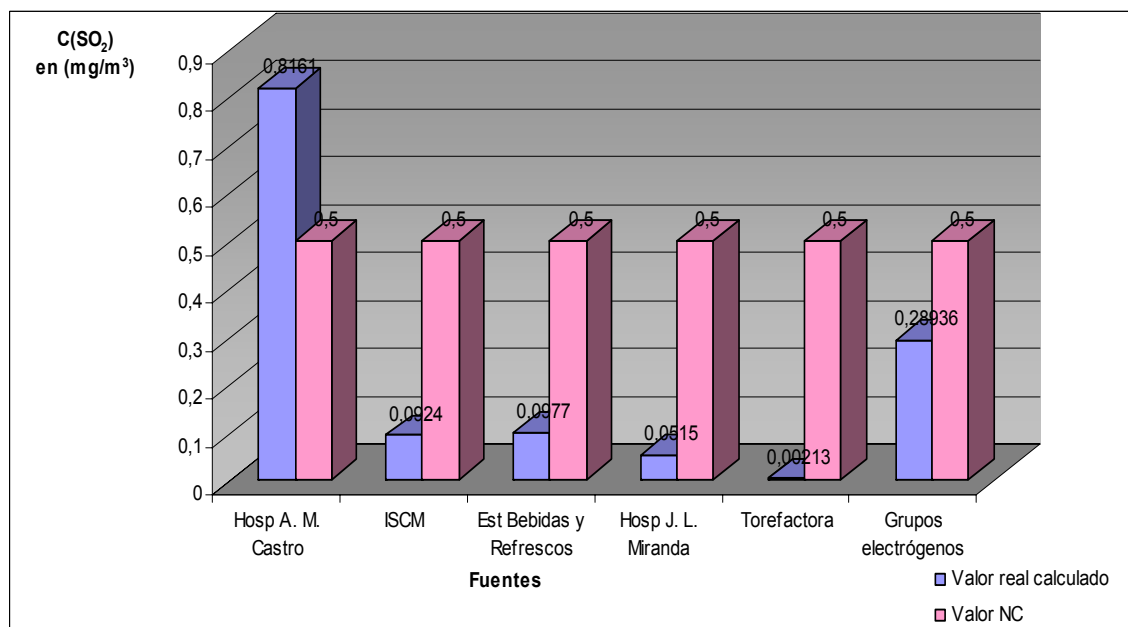


Figura 13. Comparación de las concentraciones de SO₂ con los límites establecidos en la NC 39: 1999. Fuente: Elaboración propia

Capítulo 3. Dispersión de los contaminantes

- En el contaminante NO_x, la concentración máxima calculada es superior a la admisible en las fuentes fijas, Hospital Arnaldo Milián Castro y el Instituto Superior de Ciencias Médicas con valores que superan en 0,0709 y 0,0086 mg/m³ respectivamente y que se muestran en la Figura 14.

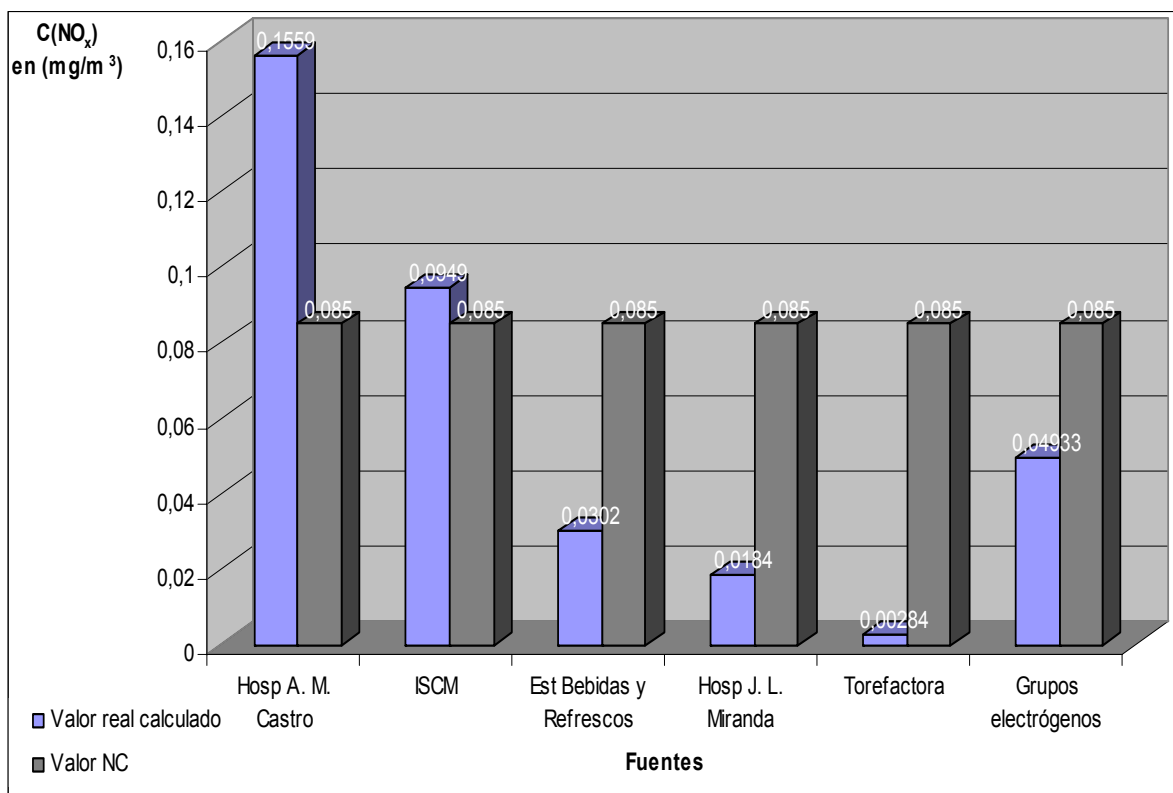


Figura 14. Comparación de las concentraciones de NO_x con los límites establecidos en la NC 39: 1999. Fuente: Elaboración propia

En el software como da la posibilidad de obtener la distancia entre la fuente y el punto X_m donde se alcanza la máxima concentración a sotavento, se pudo georeferenciar la misma en un plano, considerando las dirección predominante de los vientos (este franco), como se muestra en la Figura 15 y 16, de esta manera se representa gráficamente los mayores peligros de contaminación.

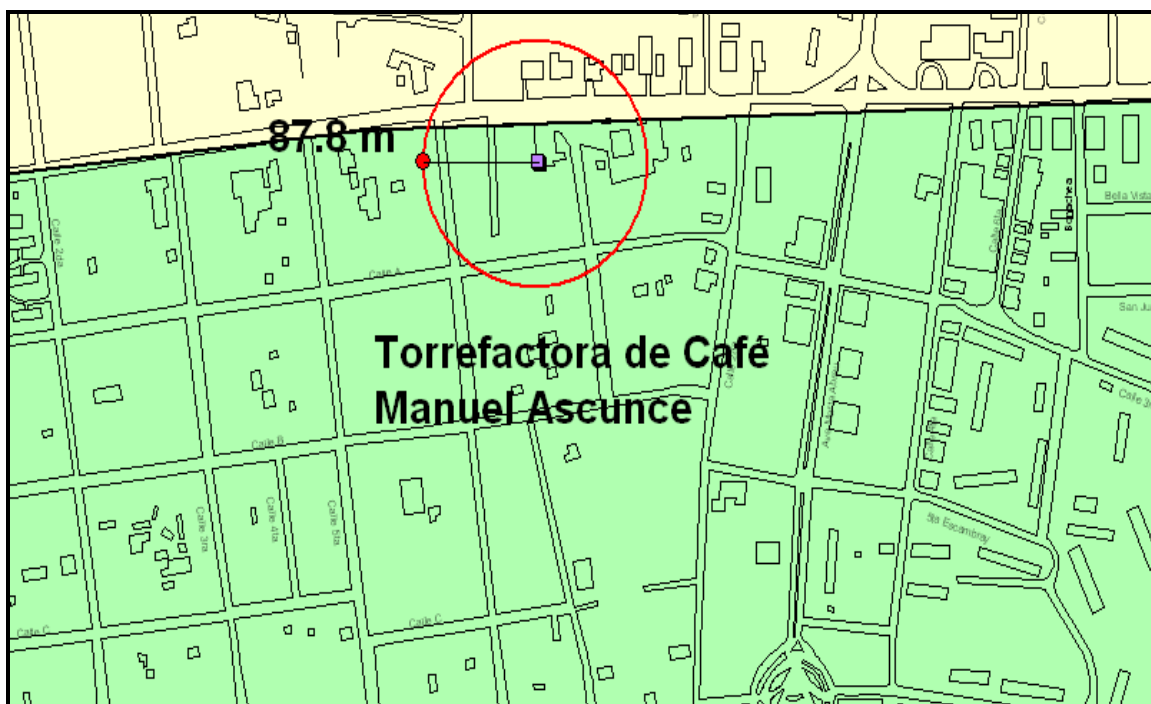


Figura 15. Distancia en el eje X entre la chimenea y el punto donde se produce la concentración máxima C_m del contaminante en la Torre de Café “Manuel Ascunce Doménech” Fuente: Elaboración propia

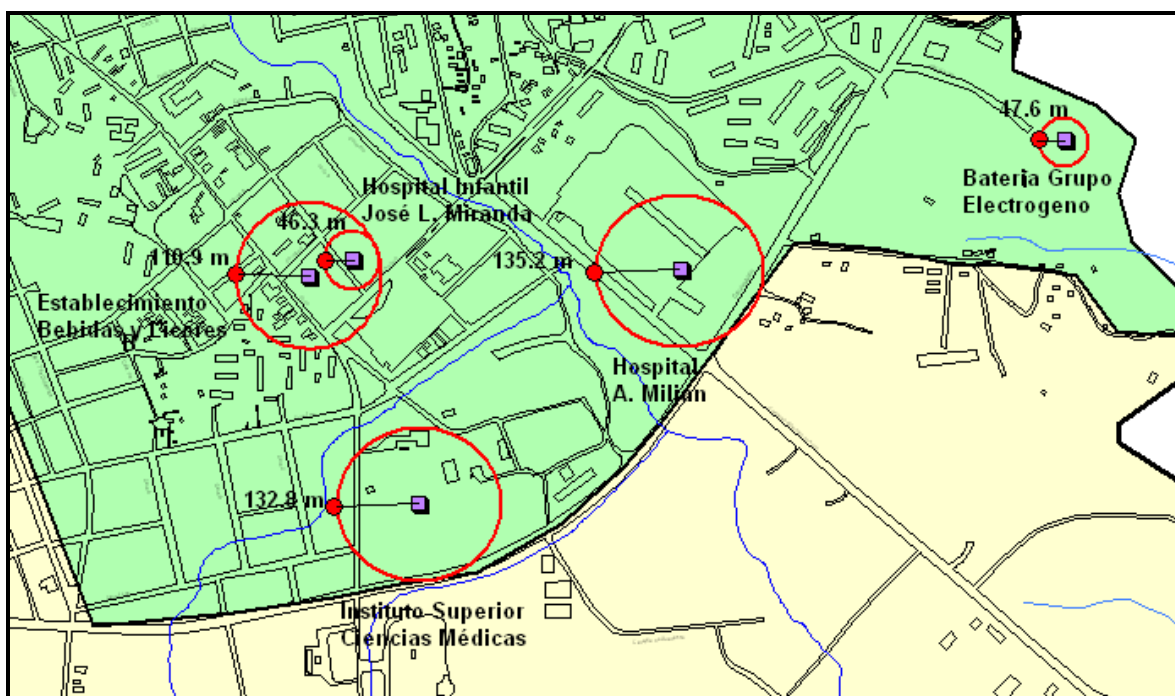


Figura 16. Distancias en el eje X entre las chimeneas y los puntos donde se producen la concentración máxima C_m del contaminante de las fuentes concentradas al sureste del área de estudio Fuente: Elaboración propia



3.4 Modelación de la dispersión por el software ISCST3

El software ISCST3 de la EPA tiene entre sus opciones la graficación de los resultados de dispersión de los contaminantes, lo cual permite conocer cómo se distribuyen espacialmente y estimar la concentración en cualquier punto de interés, ubicándolo en la posición exacta. Algunas de las posibilidades del modelo según plantean **Bedoya (1996)** y **Bluett et al. (2004)** son:

- Puede manejar fuentes múltiples, incluyendo puntuales, volumétricas, de área, y los tipos de fuente de hoyos abiertos. También pueden tratarse fuentes de la línea como un cordón de fuentes de volumen o como fuentes del área largas.
- Las fuentes de emisión pueden tratarse como constantes o pueden ser variadas por mes, estaciones, horas del día, u otros periodos optativos de variación. Estos factores de emisión variables pueden ser especificados para una sola fuente o para un grupo de fuentes.
- El modelo puede considerar los efectos aerodinámicos debido a los edificios cercanos en emisiones puntuales. Contiene algoritmos para modelar los efectos de precipitación de gases o partículas.
- Utiliza el modelo de datos meteorológicos en tiempo real para considerar las condiciones atmosféricas que afectan la distribución de la contaminación aérea en el área modelada.
- Los resultados pueden ser dados para la concentración, flujo de la deposición total, flujo de la deposición seco, y/o el flujo de la deposición húmeda.

Para la modelación de la dispersión de los contaminantes se utilizaron como datos de entrada, los flujos de emisión de los contaminantes (NO_x , CO y SO_2). En el caso del CO_2 a pesar de que contribuye al calentamiento global no se modela en este estudio. En la posición del plano de trabajo del software se hace uso de datos cartográficos y topográficos obtenidos sobre el programa AutoCad. Se emplean datos meteorológicos tomados del registro diario de la Estación Meteorológica de Santa Clara que incluye temperatura ambiente, velocidad y dirección del viento y altura de mezcla. Además se utilizan varios datos de la



Capítulo 3. Dispersión de los contaminantes

fuelle entre los que están, el diámetro de las chimeneas, velocidad y temperatura de salida de los gases y el tiempo de trabajo promedio en cada una en 24 horas. Con todas estas informaciones, **Herrera (2009)** desarrolla la aplicación del software.

La salida o resultado de la aplicación da la magnitud de las concentraciones de los contaminantes y la distribución espacial de las concentraciones que se grafica mediante una escala de colores donde el color rojo significa el área de máxima concentración según aparecen en la parte inferior del mismo.

En el área objeto de estudio práctico, primeramente se realizó una corrida que contempló todas las fuentes del área en estudio y para cada contaminante que se muestran en el Anexo 7, 8 y 9. Posterior a esto, se hizo una corrida que solamente consideró la Bateria de Grupos Electrógenos que se ilustran en los Anexos 10, 11 y 12.

Una vez realizada la modelación de los contaminantes estudiados se analizaron los valores de las concentraciones de los mismos, respecto a las concentraciones límites permisibles según la NC 39: (1999), la cual se muestra en la Tabla 20.

Tabla 20. Comparación de las concentraciones máxima calculadas por el software y la establecida en la NC 39: (1999)

Contaminantes	Concentración máxima calculada en (mg/m ³)	Concentración máxima admisible (24 h) en (mg/m ³)
SO ₂	0,0607	0,05
NO _x	0,0117	0,04
CO	0,0143	3,00

Después de realizar este análisis se obtuvo que el contaminante SO₂, supera el límite establecido en la Norma con una concentración máxima puntual de 0,0607 mg/m³, ubicada en la coordenada (608000, 285100) según muestra la representación gráfica del Anexo 7 y dentro de la zona de mayor incidencia, se encuentra la fuente fija Hospital “Arnaldo Milián Castro”. Los demás contaminantes en estudio no sobrepasan los límites normados pero el área de



Capítulo 3. Dispersión de los contaminantes

mayor concentración coincide con el comportamiento del SO_2 . La dispersión del contaminante CO en la Torrefactora, aunque no alcanza los valores máximos, abarca un área considerable fuera de la de mayor concentración en la zona.

En la modelación de los contaminantes realizadas en la fuente fija Bateria Grupos Electrógenos Santa Clara Industrial 110KV, las concentraciones máximas puntuales tienen un comportamiento inferior al establecido en la Norma. A pesar de esto, las zonas de mayor concentración de todos los contaminantes se aproximan a la evaluación realizada con todas las fuentes y tiene una influencia decisiva sobre el comportamiento del conjunto de fuentes.

3.4.1 Índices de la calidad del aire

La situación de la calidad o grado de contaminación se evalúa mediante la **NC 111: (2004)**, con la utilización de los índices de calidad del aire (ICA), el cual tiene en cuenta las concentraciones máximas calculadas y las permisibles establecidas en la NC 39: 1999. 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/m^3) a temperatura y presión normalizadas (TPN).

El ICA se determina utilizando como criterio el valor resultante del cociente de las concentraciones reales de cada uno de los contaminantes principales, tomando como denominador las Cma correspondientes al período de tiempo evaluado. Este coeficiente incluye una escala de seis categorías: buena, aceptable, deficiente mala, pésima y crítica las cuales se muestran en el Anexo 13, junto con las posibles implicaciones sanitarias relacionadas con cada categoría de calidad del aire.

En el estudio los índices que se obtuvieron para cada contaminante y la evaluación de las categorías se muestran en la Tabla 21.

La situación más preocupante es con respecto al contaminante SO_2 con una categoría de calidad del aire deficiente, por lo que es necesario mantener una vigilancia y control de las fuentes emisoras y de monitoreo ambiental, ya que puede provocar daños a personas con enfermedades cardiovasculares,



Capítulo 3. Dispersión de los contaminantes

respiratorias y alérgicas y en otras de elevada susceptibilidad, solo detectables mediante investigaciones médicas muy específicas y sensibles.

Tabla 21. Determinación de los ICA de cada contaminante y su categoría de calidad en la zona sureste de Santa Clara. Fuente: Elaboración propia

Contaminantes	ICA (%)	Categoría
SO ₂	121,40	Deficiente
NO _x	29,25	Buena
CO	0.48	Buena

Además será necesario proponer planes a diferentes plazos, dirigidos a impedir el incremento de y lograr una reducción hasta alcanzar progresivamente una calidad de Aceptable y Buena.

En el resto de los contaminantes en estudio sus categorías de calidad del aire se valoraron como Buena, por lo que es necesario mantener esta clasificación e impedir su deterioro.

3.5 Conclusiones del tercer capítulo

Después de haber realizado la modelación de la dispersión a través de la metodología de la Norma Cubana y el ISCST3 de la EPA se exponen las siguientes conclusiones:

1. Una vez realizada la modelación de los contaminantes por el software de la Norma Cubana se observa que el comportamiento del SO₂ sobrepasa la Cma en el Hospital “Arnaldo Milián Castro” y que los niveles de los óxidos de nitrógenos son superados en esta misma fuente y en el Instituto Superior de Ciencias Médicas. El CO no constituye un contaminante de riesgo en la zona objeto de estudio.
2. Las distancias de concentraciones máximas admisibles calculadas por la metodología de la NC 39; 1999 no supera en ninguna de las fuentes estudiadas los 150 m y en la Batería Grupo Electrógeno la afectación en distancia es mínima sin incidencia directa en la zona habitable de la ciudad.
3. En la modelación de la dispersión a través del software ISCST3, los valores de las concentraciones de los contaminantes en estudio reflejan que



Capítulo 3. Dispersión de los contaminantes

solamente el SO_2 supera el valor permisible en el área donde está circunscrito el Hospital “Arnaldo Milián Castro” con un índice de 1,24 que según la norma de vigilancia lo evalúa como deficiente y por tanto necesita de atención y de planes para impedir su deterioro.

4. Existe una coincidencia en los resultados obtenidos de la modelación de la dispersión por ambos software referidos al contaminante SO_2 y en el área de mayor afectación dentro del objeto de estudio práctico seleccionado.



Conclusiones



CONCLUSIONES

1. La vigilancia integrada y sistémica de las fuentes que generan la contaminación atmosférica en áreas urbanas permite evaluar la calidad del aire, tomar medidas de mitigación de las emisiones y disminuir los riesgos.
2. La aplicación práctica del diagnóstico realizado permite comprobar la hipótesis de la investigación al identificar las fuentes generadoras de contaminantes, realizar mediciones experimentales de las emisiones e inmisiones y la modelación de la dispersión, de forma que se tenga una información actualizada del estado actual de la calidad del aire en el área objeto de estudio seleccionado.
3. Al realizar las mediciones experimentales de las emisiones resulta que el contaminante SO_2 es el que mayormente sobrepasa la Ela, donde incide la emisión de la fuente fija Hospital “Arnaldo Milián Castro” y en el análisis de las inmisiones el contaminante H_2S supera los límites establecidos en la NC 39: (1999), mayormente en la Batería Grupos Electrógenos, Doble Vía y Parque “Antonio Maceo” y en los puntos próximos al área del Hospital “Arnaldo Milián Castro”.
4. Con la aplicación del Eco Indicador 99, se obtiene que la fuente de mayor incidencia sobre las categorías de impacto, es la Batería Grupos Electrógenos, siendo la respiración por inorgánico la categoría más afectada, con una mayor incidencia sobre la salud humana y una pequeña repercusión sobre el ecosistema.
5. En la aplicación de ambos softwares para la dispersión, existe una coincidencia de los resultados alcanzados en cuanto al contaminante de mayor riesgo (SO_2) y del área de mayor afectación (Hospital “Arnaldo Milián Castro”).
6. Una vez determinada las concentraciones puntuales mediante la modelación de la dispersión de los contaminantes con el empleo del software ISCST3 y la determinación del ICA por la NC: 111(2004) se evalúa la calidad del aire en la zona como aceptable.



Recomendaciones



RECOMENDACIONES

A partir de las conclusiones anteriormente expuestas, se proponen un conjunto de recomendaciones derivadas de la investigación:

- 1.** El análisis del resultado de las inmisiones se debe complementar con un estudio de la circulación vehicular (fuentes móviles), en las arterias principales que componen los puntos seleccionados en esta investigación.
- 2.** Se debe mantener la vigilancia de la calidad del aire en la fuente Batería Grupos Electrógenos debido al comportamiento de las concentraciones y que muy cercano a esta fuente, existe un crecimiento espontáneo de viviendas en las cuáles sus habitantes corren riesgos para su salud.
- 3.** En las fuentes donde se obtuvieron las máximas concentraciones de contaminantes se deben formular estrategias encaminadas a reducir su carga, tales como el mantenimiento, reparación y/o sustitución de calderas, debido a que pueden convertir a estos espacios en áreas críticas en un futuro.



Bibliografia



BIBLIOGRAFÍA

1. Air Quality Index (AQI) (2005). Air Quality Index. Consultado en octubre, 23, 2008 en www.epa.gov/airnow.html. Centro de Información y Gestión Tecnológica. CIGET. Villa Clara. Cuba.
2. Álvarez, J. (1998). *Indicadores para el seguimiento y evaluación de los fondos estructurales: Guía práctica*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente.
3. Álvarez-Arenas, M. (2000). *Hacia un Desarrollo Económico y Medioambiental Sostenible*. Madrid: Federación de Cajas de Ahorros Vasco - Navarras.
4. ASA Franco & Cía. S. (1994). *Modelo de Dispersión de Contaminantes*. Santa Fe de Bogotá.
5. Austin, G. T. (1992). *Manual de Procesos Químicos en la industria*. México D. F. Mc Graw Hill.
6. Ayes, G. N. (2003). *Medio ambiente: Impacto y desarrollo*. La Habana: Científico – Técnica.
7. Ayes, G. N. (2008). *Revolución Energética un desafío para el desarrollo*. La Habana: Científico – Técnica.
8. Barceló, C. (1986, marzo). La calidad del aire en el medio urbano. *Revista Arquitectura y Urbanismo*, pp. 38-41.
9. Bedoya, J. (1996). *Uso de los Modelos de Dispersión para la Evaluación de Impacto Ambiental* en: Seminario Experiencias en Diseño de redes de Monitoreo para Calidad del Aire. Tunja.
10. Berlyand, M. (1975). *Modern problems of atmospheric diffusion and air pollution*. Leningrado: Gidromet.
11. Bluett, J., et al. (2004). *Good Practice Guide for Dispersion Modelling*. Consultado en Julio, 29, 2008 en <http://www.mfe.govt.nz>.
12. Bueno et al. (1997). *Contaminación e Ingeniería Ambiental. Contaminación Atmosférica*. Oviedo: FICYT.
13. Castro, F. (1992, junio 14). Discurso en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre medio Ambiente y Desarrollo. *Granma*, pp. 5-8. La Habana.



Bibliografía

- 14.** Cifuentes, C. (1996, junio). El problema ambiental. Comunidad. *Instituto de Planificación Física*, pp. 77- 80.
- 15.** CITMA (2005 a). Estrategia Ambiental Nacional del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (2005-2010). La Habana: Academia.
- 16.** CITMA (2005 b). Estrategia Ambiental Provincial Villa Clara. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (2006-2010). Santa Clara: Capiro.
- 17.** Clavelo, P. (2004). Estrategia para el Desarrollo de habilidades de análisis y solución de problemas energéticos-ambientales. (Informe Final de Investigación Concluida. Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría. Facultad de Ingeniería Química). La Habana.
- 18.** Colectivo de autores, (2008). *Perspectivas metodológicas en las percepciones socio ambientales. Población cubana y comunidades locales*. La Habana: Camino. pp 30-35.
- 19.** Cruz, M. (2004). Diagnóstico Urbano Ambiental de la Ciudad de Santa Clara. Plan general de ordenamiento territorial. Santa Clara: Dirección Municipal de Planificación Física.
- 20.** De Nevers, N. (1998). *Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire*. México. Mc Graw Hill.
- 21.** Díaz Machado, J. (2001). *Programa nacional sobre calidad del aire urbano en Cuba (2001-2009)*. La Habana: Dirección Nacional de Salud Ambiental.
- 22.** Díaz Véliz, R. (1998). *Programa Nacional Contaminación Atmosférica y Salud*. La Habana: Ministerio de Salud Pública.
- 23.** Dickson, T. R. (1990) *Química. Enfoque ecológico*. México DF: Limusa.
- 24.** Domínguez, L. y Morales, D. (2007). Aplicación de la tecnología de gestión total de eficiencia de la energía en la Empresa Torrefactora "Manuel Ascunce Domenech". (Trabajo de Diploma por el título de Ingeniero Mecánico. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas). Santa Clara.
- 25.** Dräger, (2000). Multiwarm II Technical Handbook. 4th Edition. Dräger Sicherheitstechnik GmbH.
- 26.** ECOM-SG^{PLUS} (2000). Manual de instrucciones, analizadores de gases de combustión.



Bibliografía

27. Environmental Protection Agency (EPA), (1997). *Standards of Performance for New Stationary Source*. USA.
28. Environmental Protection Agency (EPA), (2002). *Draft User's Guide for the Industrial Source Complete (ISCST3). Dispersion Models*. North Carolina: US Enviromental Protection Agency.
29. García, H. (1997 a). *Contaminación Atmosférica*. Santa Fe de Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
30. García, H. (1997 b). *Contaminación Atmosférica y Enfermedades Respiratorias, Análisis de Fuentes de Emisiones y Aplicación de Modelos de Dispersión*. Santa Fe de Bogotá: Universidad del Bosque.
31. Geo América Latina y el Caribe (2003). *Perspectivas del medio ambiente 2003 (Atmósfera)*. Programa de la Naciones Unidas para el Medio Ambiente. México D. F. pp 111-129.
32. Geo Santa Clara (2008). *Perspectivas de medio ambiente urbano Geo Santa Clara (Atmósfera)*. Santa Clara: Academia.
33. Gómez, D. (2003). *Evaluación del impacto ambiental, un instrumento preventivo para la gestión ambiental*. Madrid-Barcelona-México DF: Mundi-Prensa.
34. González, M. (2007). Desarrollo de una producción más limpia en una industria de bebidas gaseosas mediante el uso del análisis de ciclo de vida. (Tesis de opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Instituto Tecnológico de Toluca). Metepec. Estado de México.
35. Gutiérrez, H., Romieu, I., Corey, G. y Fortoul, T. (1997). *Contaminación del aire; riesgos para la salud*. México D. F.: Manual Moderno S.A de C.V.
36. Herrera, I. (2009). Modelación de la dispersión de contaminantes en la zona sureste de Santa Clara. (Informe de Investigación. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. CEETA). Santa Clara.
37. IHOBE (2005). *Guía Técnica para la medición, estimación y cálculo de las emsiones al aire*. Informe realizado por la Fundación Labein para IHOBE S.A: Sociedad Pública de Gestión Ambiental Gobierno Vasco.



Bibliografía

- 38.** INSMET (2009). Centro Meteorológico Provincial Villa Clara. Instituto de Meteorología de Cuba.
- 39.** IPCC (2005, febrero). The Physical Science Basic. Summary for Policy Makers. *Climate Change*, pp. 15-19.
- 40.** Ley No 81, (1997). “*Del Medio Ambiente*”. Asamblea Nacional del Poder Popular. Publicado en la Gaceta Oficial de la República de Cuba en junio 11 de 1997, La Habana.
- 41.** Macdonald, R. (2003). *Theory and objectives of air dispersion model*. Modeling air Emissions for Compliance. University of Waterloo.
- 42.** Martín, L. (1999). “La contaminación atmosférica y sus efectos” en Novo, M. (1999). *Los desafíos ambientales. Reflexiones y propuestas para un futuro sostenible*. Primera Edición. Madrid: Universitas.
- 43.** Medio ambiente y desarrollo: un enfoque integral. (2006, abril 27). Universidad para todos, pp. 1-16. (ISBN: 978-959-270-097-0).
- 44.** Ministerio del Medio Ambiente de Colombia (1999). Guía ambiental para termoeléctricas y procesos de cogeneración- Parte aire y ruido. Santa Fe de Bogotá: SENA y Aene.
- 45.** Mocioaca, G., Estefan, S. (2003). *Diferent parameterization of a Gaussian écheme: intercomparison study*. Int. J. Environment and Pollution.
- 46.** Murray, F. (1997). Urban air pollution and health effects. Weinheim: Scandinavian Science Publisher.
- 47.** Novo, M. (1999). *Los desafíos ambientales. Reflexiones y propuestas para un futuro sostenible*. Primera Edición. Madrid: Universitas.
- 48.** Núñez, V. et al. (2008). La Gestión Energética, la Cuantificación y Modelación de la Dispersión de Contaminantes como Herramientas para Elevar la Eficiencia Industrial y la Calidad del Aire. (Informe Final de Investigación Concluida. Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara y Centro de Estudios de la Energía y Tecnologías Ambientales (CEETA) de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas). Santa Clara.
- 49.** Oficina Nacional de Normalización (1986) NC 93 02 203 “Requisitos generales para el muestreo del aire”. La Habana.



Bibliografía

- 50.** Oficina Nacional de Normalización (1999) NC 39 “Calidad de Aire. Requisitos higiénico-sanitarios”. Modificativa de la NC 93-02-202:1987. Requisitos higiénicos sanitarios: Concentraciones máximas admisibles, alturas mínimas de expulsión y zonas de protección sanitaria.
- 51.** Oficina Nacional de Normalización (2004) NC 111 “Calidad del aire – Reglas para la vigilancia de la calidad del aire en asentamientos humanos”.
- 52.** Oficina Nacional de Normalización (2005) NC 242. Guía de datos para inventarios de emisiones de los contaminantes atmosféricos para fuentes puntuales industriales.
- 53.** Oficina Nacional de Normalización (2008) NC 55 “Calidad del aire. Emisiones máximas admisibles de contaminantes a la atmósfera en fuentes fijas del sector de la energía”. (Propuesta).
- 54.** Organización Mundial de la Salud (OMS), (2004). Guías para la calidad del aire. Lima: Centro panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- 55.** Organización Panamericana de la Salud (OPS), 1999. I Encuentro Latinoamericano sobre calidad del aire y salud. Santiago de Chile.
- 56.** Pichs, R. (2008). *Globalización y subdesarrollo. Medio ambiente y desarrollo: Un enfoque integral*. La Habana: Científico-Técnica.
- 57.** PNUMA (2002). *Para comprender mejor el cambio climático. Guía elemental de la Convención de Marco de las Naciones Unidas y el protocolo de Kyoto*. Paris: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y Climate Change Secretariat.
- 58.** Protección ambiental y producción más limpia. (2006, julio 11). *Tabloide Universidad para Todos*, pp. 1-16.
- 59.** Quintana, C.; Herrera, I. y Jáuregui, S. (2005). Diagnóstico Energético en los sistemas de generación, transporte y usos del vapor y su impacto sobre la calidad del aire en la zona Hospitalaria de Santa Clara. (Informe Final de Investigación Concluida. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. CEETA). Santa Clara.



Bibliografía

60. Rivas, S. (2000). *Monografía de contaminación atmosférica*. Consultado en marzo, 14, 2008 en: <http://www.asrm.cl/aire>.
61. Romero, M., Diego, F., Álvarez, M. (2006). La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*. Consultado en septiembre 20, 2008 en <http://www.cepis.ops-oms.org>.
62. Romieu, I. (1996). *Urban air pollution and health in the Americas*. Washington D.C: OPS.
63. Rosell, R. (2008). Modelación de la Dispersión Norma Cubana (MDNC) (Versión 1.0) [Programa de computación]. Santa Clara: UCLV.
64. Sanclemente, X. (1996). *Evaluación de Modelos de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos. Aproximación del Costo que Significa Cumplir una Norma de Emisión*. Santa Fe de Bogotá: Universidad de los Andes.
65. Schwartz, J. (1997). *Air Pollution and Hospital Admissions for Cardiovascular Disease in Tucson*. Epidemiol. Montreal: Mc Graw Hill.
66. Seoanez, M. (1997): *Ingeniería Medioambiental Aplicada*. Barcelona: Mundi-Prensa.
67. Stern, N (2006, junio). Contribution of working group. *The Economics of Climate Change Review*, pp. 21-22.
68. Suárez, Y. (2008). Metodología para la evaluación del impacto en la calidad del aire aplicado a un proceso de generación distribuida. (Trabajo de Diploma por el título de Ingeniera Química. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas). Santa Clara.
69. Turtós, L. y Días, N. (2003, agosto). Modelación de la dispersión local de los contaminantes gaseosos y partículas. . *Revista Eco Solar*, pp. 2-6.
70. Wark, K. (1990). *Contaminación del aire. Origen y control*. México DF: Limusa.
71. Wagner, T. (1996). *Contaminación, causas y efectos*. México D.F: Gernika
72. Westbrook, J. A. (1999). *Air dispersion models: Tools to assess impact from pollution sources*. Natural Resources & Environment.



Bibliografía

73. Yassi, A et al. (2002). *Salud Ambiental Básica*. México DF: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
74. Zamalloa, E. y Díaz, J. (2005). *Guía Metodológica para la gestión ambiental*. Manual No 5. Capítulo 3. pp 83-91.
75. Zannetti, P. (1994). Computer modelling of air pollution; science, art or fiction. Proceeding of the Second International Conference on Air Pollution. Boston.
76. Zaror, C. (2000). *Introducción a la ingeniería ambiental para la industria de procesos*. Chile: Prentice Hall.



Unexos



Anexos

Anexo 1. Concentraciones máximas permisibles para zonas habitables en Cuba. Fuente: Adaptado de NC 39: (1999)

Contaminante	Promedio Diario 24 horas (mg/m ³)	Instantánea 20 min. (mg/m ³)
Dióxido de Azufre (SO ₂)	0.05	0.50
Sulfuro de Hidrógeno (H ₂ S)	0.008	0.008
Monóxido de Carbono (CO)	3.00	5.00
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	0.04	0.085



Anexos

Anexo 2. Especificaciones del combustible Diesel Regular utilizado en los Grupos Electr6genos Santa Clara Industrial 110 KV. Fuente: Reportes de CUPET (2009)

Parámetros		Especificaciones
Densidad a 15 °C	0.8584 g/cm ³	0.825 – 0.865
Viscosidad a 40 °C	3.99 mm ² /s	1.6 – 5.3
Azufre total	0.737 ppm	0.8 max
Agua y sedimento	0	0.05 max
Temperatura de inflamaci3n	69°C	52 min
Color	1	3.5 max
Destilaci3n	IBP 10% 233 °c	
	50% 290 °c	235 – 300
	90% 354 °c	360 max
Índice de cetano	49.1	43 min
No de neutralizaci3n	0.13 mg KOH/g	0.5 max
Cenizas	0	0.01 max
Carbon conradsm	0.019 %m/m	0.15 max
Apariencia	Clara y brillante	-



Anexos

Anexo 3. Datos meteorológicos correspondientes al día de la medición de emisiones en la Bateria Grupos Electrógenos. Fuente: INSMET (2009)

Fecha: 29 de abril de 2009

Estación Meteorológica: Yabú (Santa Clara)

Altura sobre el nivel del mar: 116 m

Año	Me s	Día	Hora	DD	FF (m/s)	Tm (°C)	Altura capa mezcla (m)
2009	4	29	1	50	0,55	21,1	207,4
2009	4	29	4	50	0,55	20,3	170,8
2009	4	29	7	30	0,55	20,9	207,4
2009	4	29	10	40	2,77	26,2	756,4
2009	4	29	1	40	4,15	27,9	1037
2009	4	29	4	40	5,54	27,5	976
2009	4	29	7	50	2,77	24,3	536,8
2009	4	29	10	50	0,55	22,6	219,6
				Valor medio		23,85	513,92



Anexos

Anexo 4. Datos meteorológicos correspondientes al día de la medición de inmisiones en la ciudad de Santa Clara. Fuente: INSMET (2009)

Fecha: 3 de octubre de 2008

Estación Meteorológica: Yabú (Santa Clara)

Altura sobre el nivel del mar: 116 m

Año	Mes	Día	Hora	DD	FF (m/s)	Tm (°C)	Estabilidad Atmosférica
2008	10	3	1	0	0	23,6	6
2008	10	3	4	0	0	22,5	6
2008	10	3	7	100	0,554	24	5
2008	10	3	10	80	1,662	27,3	3
2008	10	3	1	0	1,385	28	1
2008	10	3	4	130	0,554	27,4	1
2008	10	3	7	360	1,385	24,3	3
2008	10	3	10	0	0	23,6	5



Anexos

Anexo 5. Cantidad de residuos generados por unidad de producción en cada fuente. Fuente: Elaboración propia

Fuentes	Generación de Vapor (ton/h)	Tiempo de trabajo (h/año)	Vapor (ton/año)
Hospital "Arnaldo Milián Castro"	1,67	4380	7314,6
ISCM	0,5	3285	1643
Hospital Infantil "José Luis Miranda"	1,75	5840	10220
Establecimiento Bebidas y Refrescos	0,24	1400	336

Fuentes	Emisiones(ton/año)				ton contaminante/ ton vapor			
	SO ₂	NOx	CO	CO ₂	SO ₂	NOx	CO	CO ₂
Hospital "Arnaldo Milián Castro"	48,6	9,3	0,9	1724	0,0066	0,0012	0,0001	0,2357
ISCM	2,9	3	1,0	493	0,0017	0,0018	0,0006	0,3000
Hospital Infantil "José Luis Miranda"	0,9	0,3	0,04	564	8.8E-06	2,9E-05	3,9E-07	0,0553
Establecimiento Bebidas y Refrescos	1,6	0,5	0,1	83	0,0047	0,0014	0,0003	0,2470



Anexos

Anexo 5. Continuación (...)

Grupo Electrógeno	Concent. (mg/m ³)	Caudal (m ³ /h)	Horas trabajo (año)	Emisiones (Kg/año)	Cont. / Gen (ton/Mw-año)
NO _x	44,3958	1796,149	2122,5	169,25	0,00065
SO ₂	255,6228	1796,149	2122,5	974,50	0,00377
CO	319,69	1796,149	2122,5	1218,75	0,00472
CO ₂	138214,29	1796,149	2122,5	526911,76	2,04113



Anexos

Anexo 6. Resultados de la modelación de la dispersión por el software MDNC en las fuentes seleccionadas. Fuente: Rosell (2008)

Fuente fija: Hospital “Arnaldo Milián Castro”				
Agente/parámetros	Cm(mg/m ³)	Um(m/s)	Xm(m)	Cmu(mg/m ³)
NOx	0,1543	1,8981	135,2	0,1540
CO	0,0143	1,8981	135,2	0,0143
SO ₂	0,8042	1,8981	135,2	0,8027
CO ₂	3,7883	1,8981	135,2	3,7814

Fuente fija: Hospital Pediátrico “José Luis Miranda”				
Agente/parámetros	Cm(mg/m ³)	Um(m/s)	Xm(m)	Cmu(mg/m ³)
NOx	0,0553	0,5091	46,3	0,0225
CO	0,0063	0,5091	46,3	0,0026
SO ₂	0,1541	0,5091	46,3	0,0628
CO ₂	0,5167	0,5091	46,3	0,2104

Fuente fija: Instituto Superior de Ciencias Médicas				
Agente/parámetros	Cm(mg/m ³)	Um(m/s)	Xm(m)	Cmu(mg/m ³)
NOx	0,0865	1,9247	132,8	0,0864
CO	0,0296	1,9247	132,8	0,0295
SO ₂	0,0842	1,9247	132,8	0,0841
CO ₂	2,1172	1,9247	132,8	2,1151



Anexos

Anexo 6. Continuación (...)

Fuente: Establecimiento Bebidas y Refrescos” Osvaldo Socarrás Martínez”				
Agente/parámetros	Cm(mg/m ³)	Um (m/s)	Xm (m)	Cmu (mg/m ³)
NOx	0,0298	1,6421	110,9	0,0070
CO	0,0072	1,6421	110,9	0,0070
SO ₂	0,0962	1,6421	110,9	0,0938
CO ₂	3,8088	1,6421	110,9	3,7123

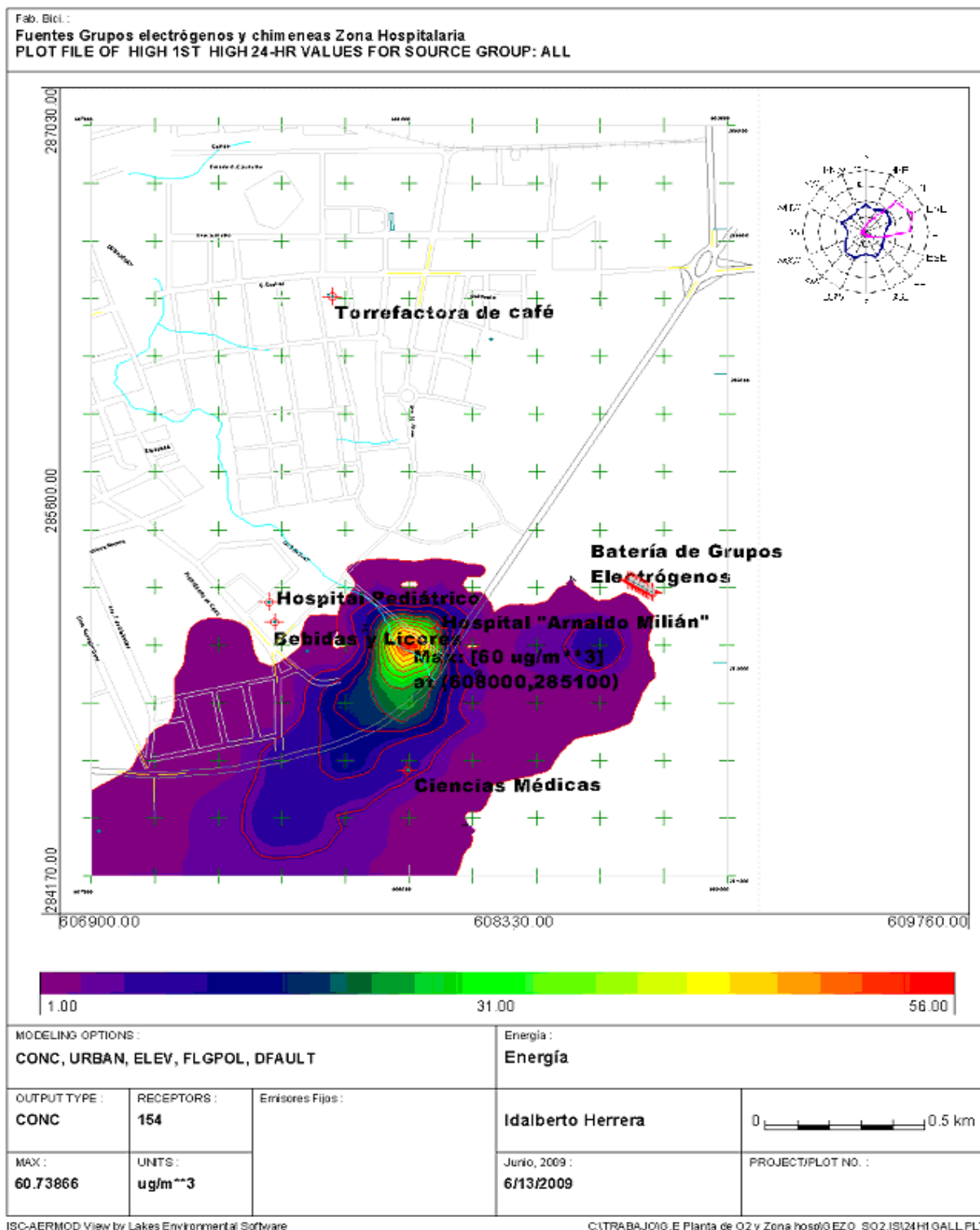
Fuente fija: Torrefactora de Café ”Manuel Ascunce Domenech”				
Agente/parámetros	Cm(mg/m ³)	Um(m/s)	Xm(m)	Cmu(mg/m ³)
NOx	0.00284	1.41045	87.8534	0.00252
CO	0.21973	1.41045	87.8534	0.19466
SO ₂	0.00213	1.41045	87.8534	0,00189
CO ₂	7.85431	1.41045	87.8534	6.95823

Fuente fija: Batería Grupo Electrónico Santa Clara Industrial 110KV				
Agente/parámetros	Cm(mg/m ³)	Um(m/s)	Xm(m)	Cmu(mg/m ³)
NOx	0.04993	1.64632	47.5946	0.04741
CO	0.36199	1.64632	47.5946	0.34372
SO ₂	0,28936	1,64632	47,5946	0,27476
CO ₂	156,50433	1,64632	47,5946	148,60666



Anexos

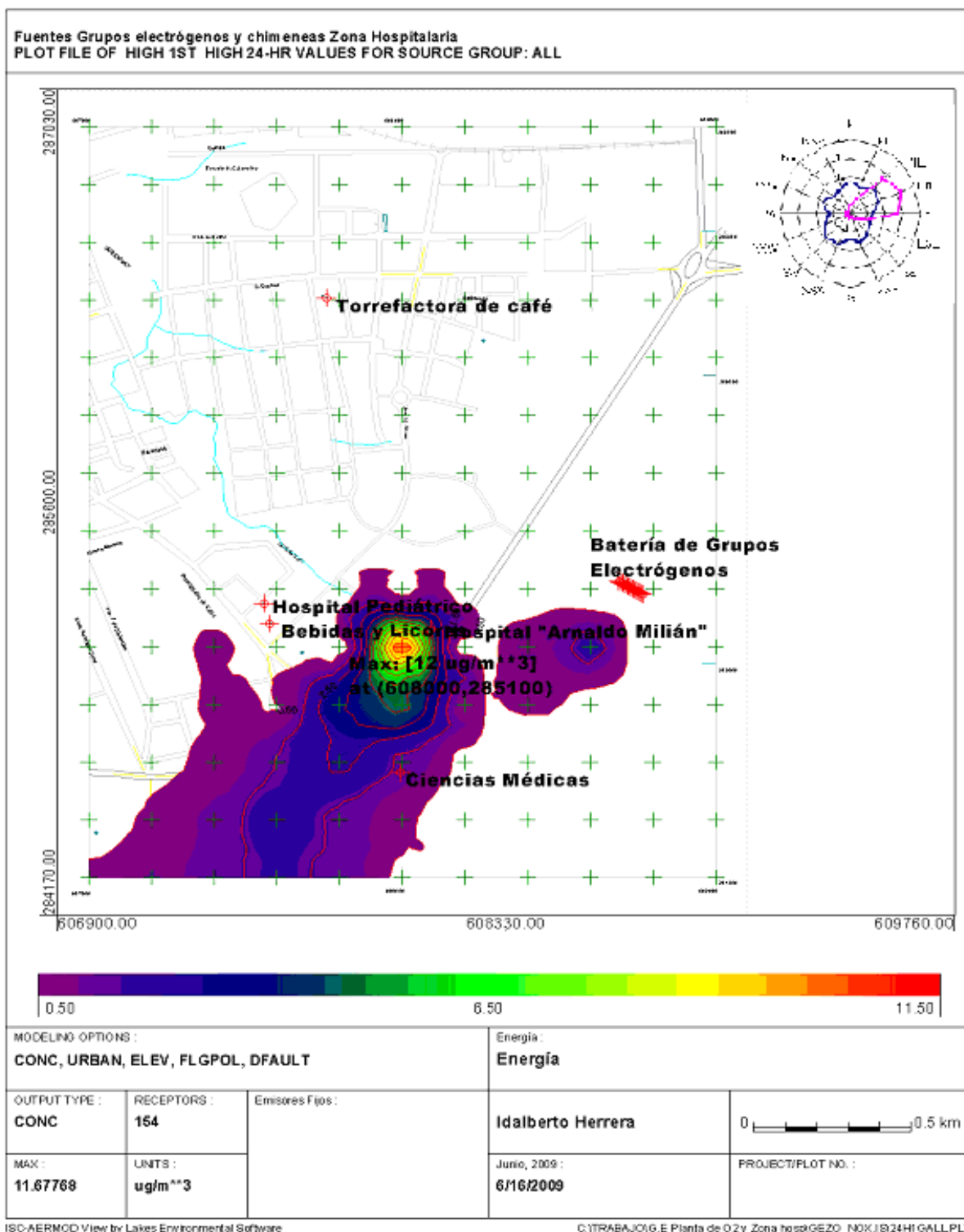
Anexo 7. Modelación de la dispersión del SO₂ a través del software ISCST3 en el área de estudio. Fuente: Herrera (2009)





Anexos

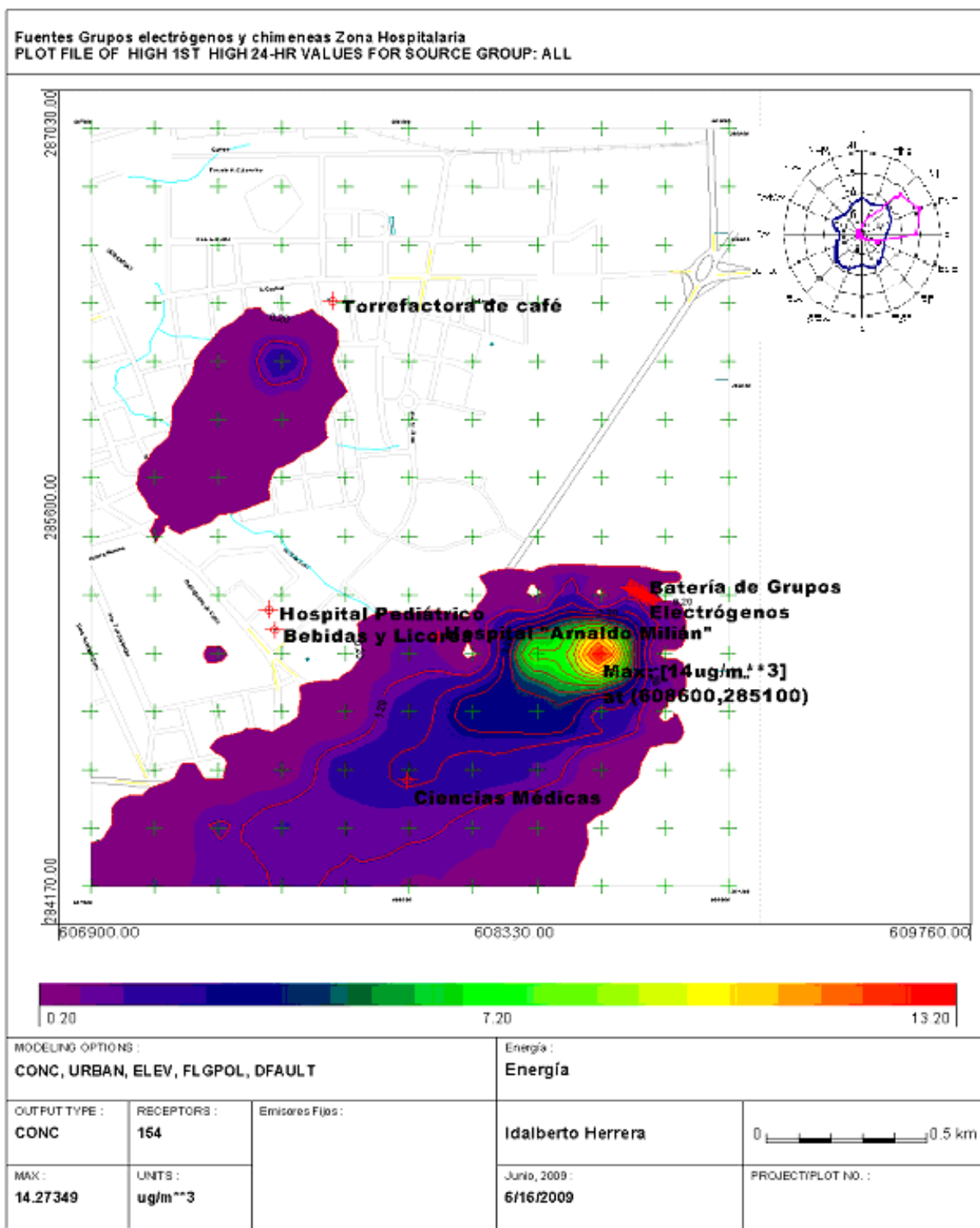
Anexo 8. Modelación de la dispersión del NO_x a través del software ISCST3 en el área de estudio. Fuente: Herrera (2009)





Anexos

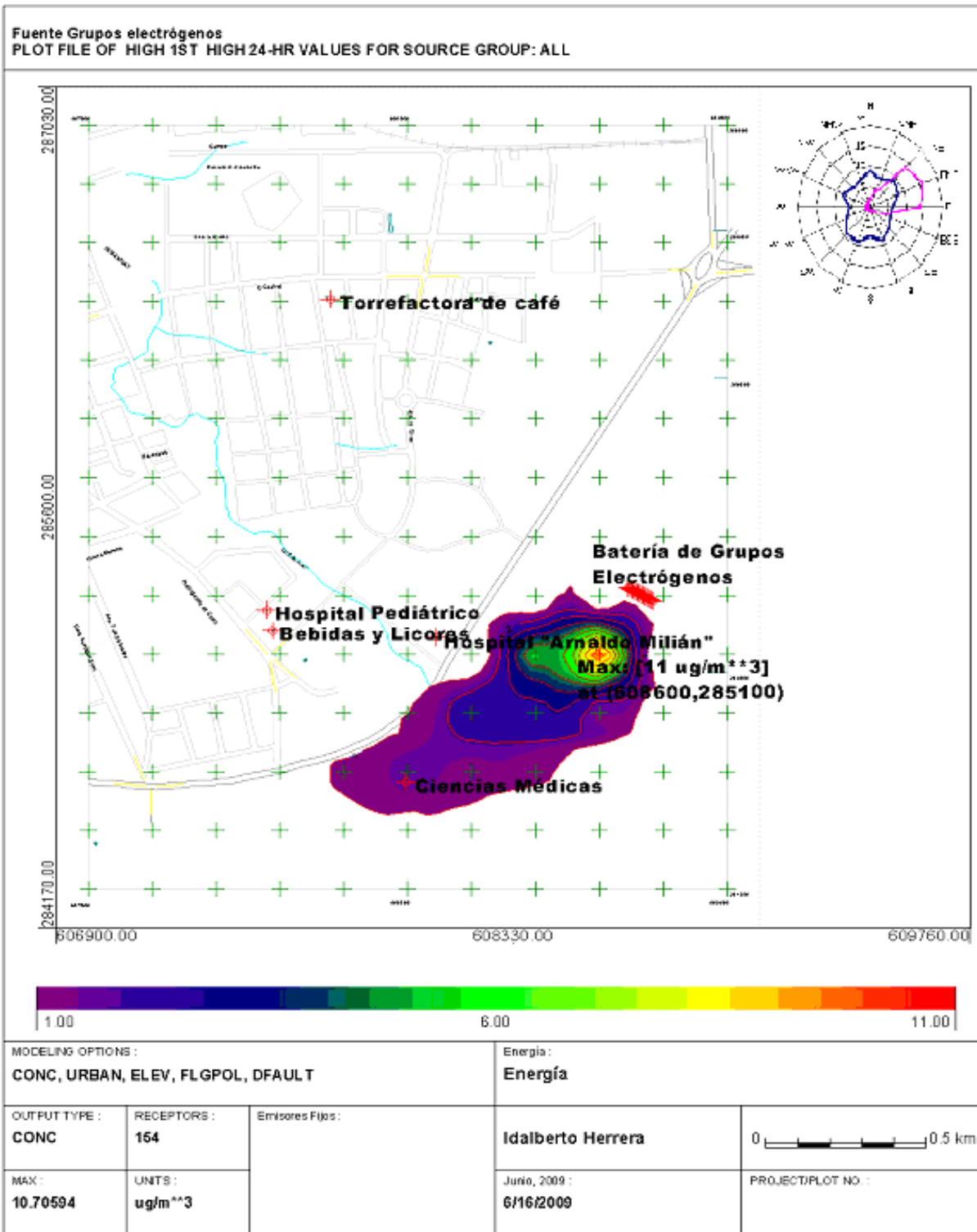
Anexo 9. Modelación de la dispersión del CO a través del software ISCST3 en el área de estudio. Fuente: Herrera (2009)





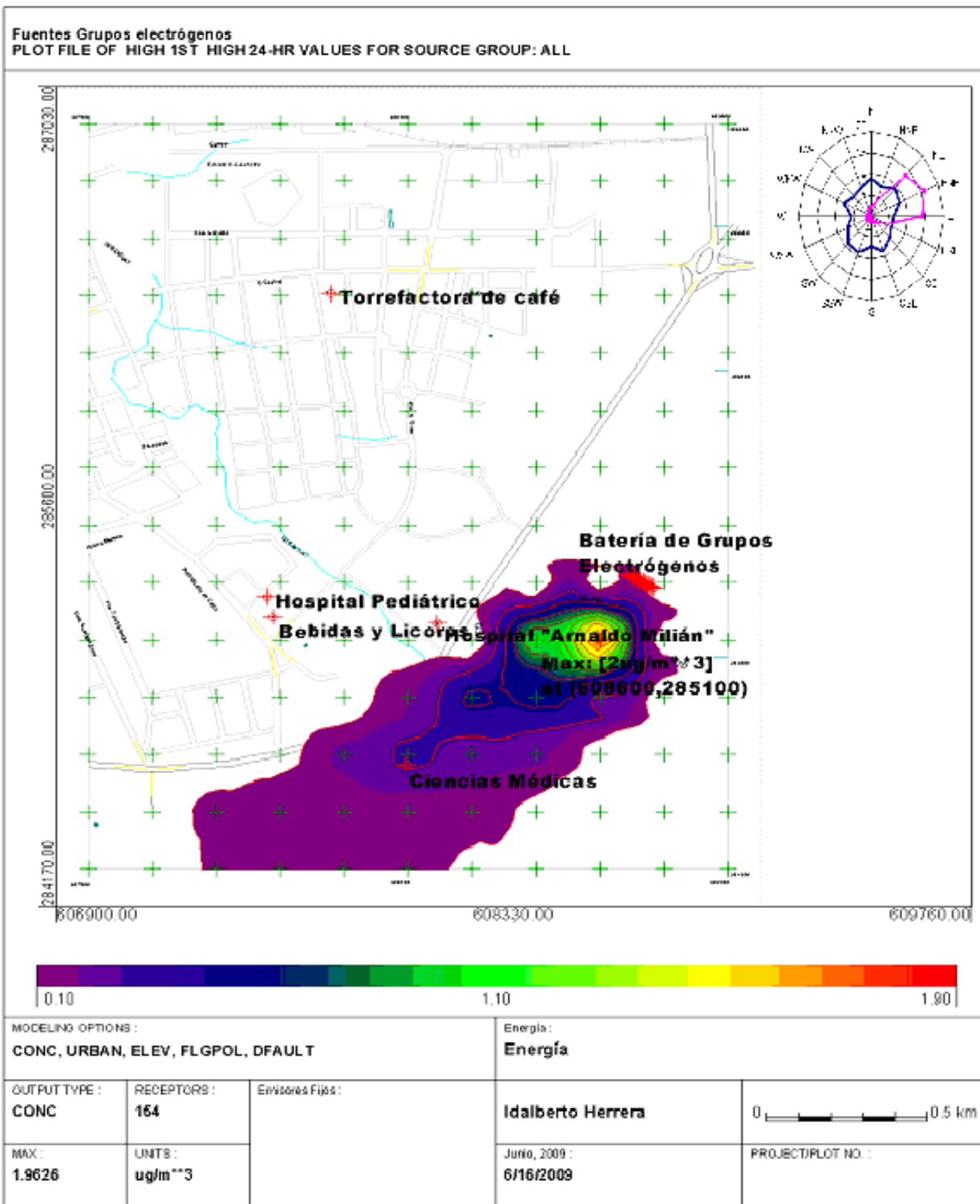
Anexos

Anexo 10. Modelación de la dispersión del SO₂ a través del software ISCST3 en la fuente Bateria Grupos Electrónicos Santa Clara Industrial 110KV. Fuente: Herrera (2009)





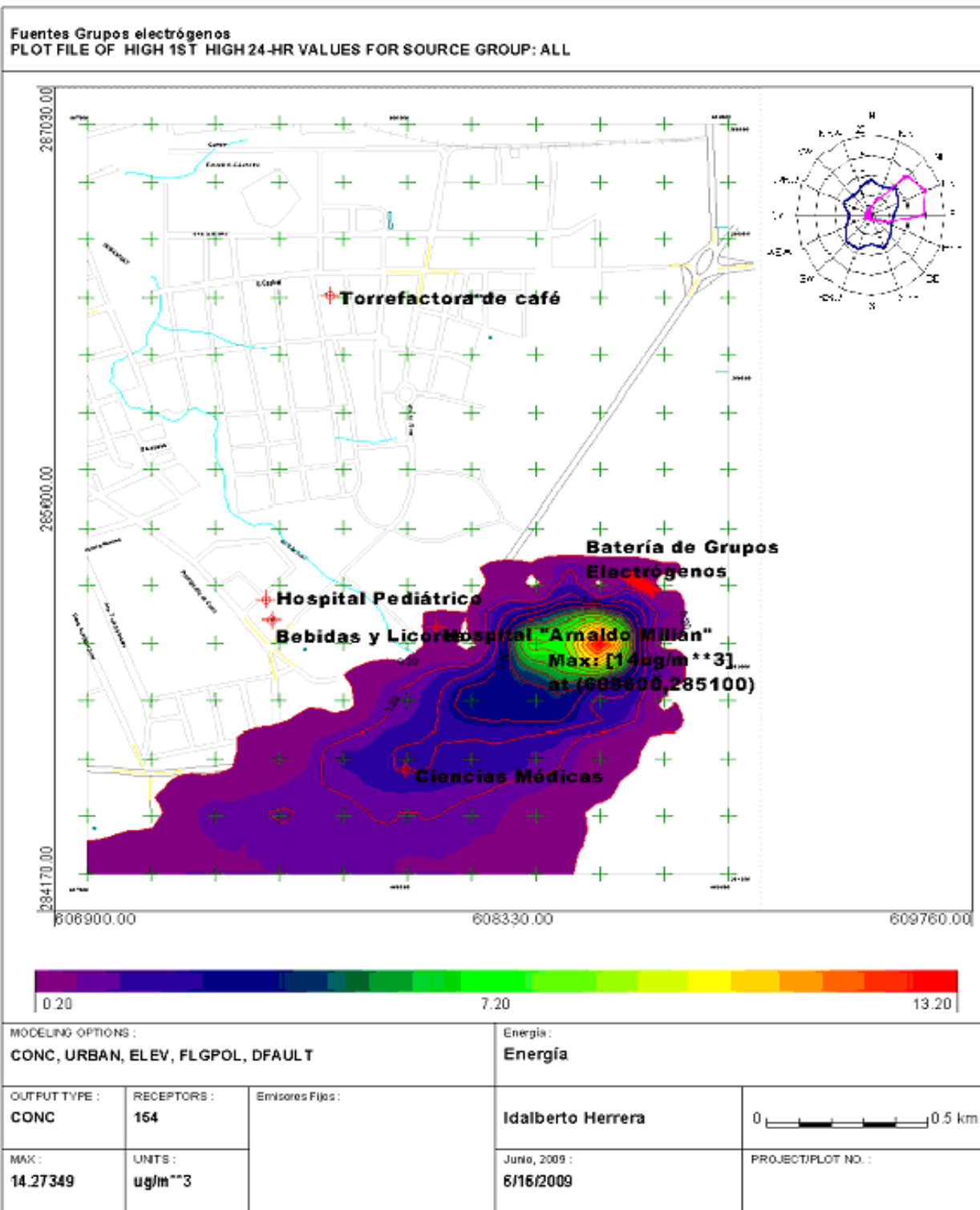
Anexo 11. Modelación de la dispersión del NO_x a través del software ISCST3 en la fuente Bateria Grupos Electrónicos Santa Clara Industrial 110KV. Fuente: Herrera (2009)





Anexos

Anexo 12. Modelación de la dispersión del CO a través del software ISCST3 en la fuente Bateria Grupos Electrónicos Santa Clara Industrial 110KV. Fuente: Herrera (2009)



Anexo 13. Relación entre el ICA y las posibles implicaciones sanitarias relacionadas con cada categoría de calidad. Fuente: NC 111: (2004)

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