



Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas

Facultad de Ingeniería Mecánica

Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales
(CEETA)



Trabajo de Diploma

Impacto sobre la contaminación atmosférica de la
generación de energía eléctrica a base fueloil en la
planta Cayo Santa María.

Autor: Eliezer Mora Ramirez

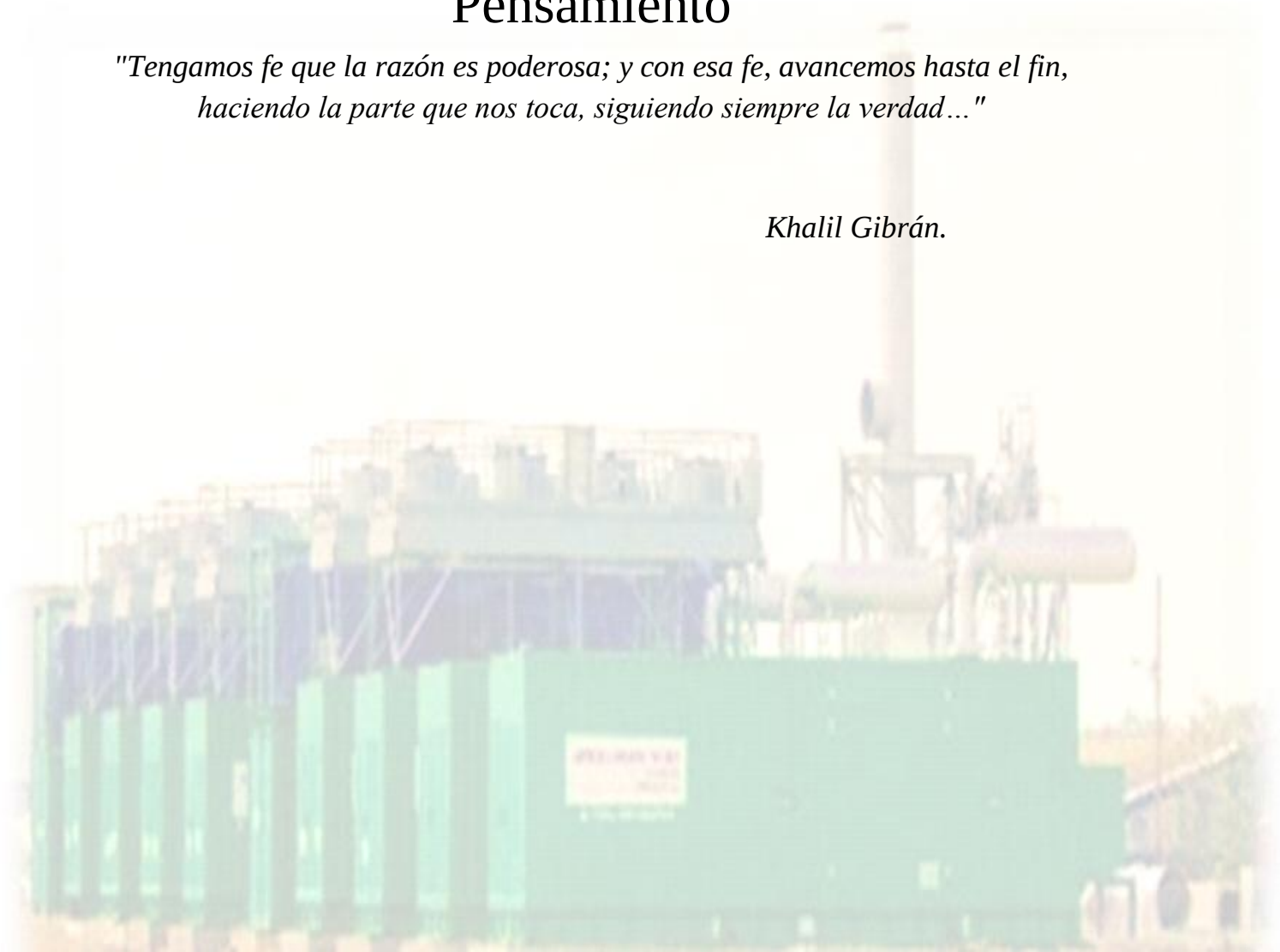
Tutor: Dr. C. Idalberto Herrera Moya

Curso 2013 -2014

Pensamiento

*"Tengamos fe que la razón es poderosa; y con esa fe, avancemos hasta el fin,
haciendo la parte que nos toca, siguiendo siempre la verdad..."*

Khalil Gibrán.



Dedicatoria.

A toda mi familia, principalmente a mis padres por haberme dado el derecho de nacer y por hacer de mí un hombre de bien.



Agradecimientos.

Ante todo, agradecer a mi familia por su apoyo incondicional, especialmente a mi padre y mi madre.

Agradezco a mi tutor Idalberto Herrera Moya por la inmensa ayuda que me brindó.

Agradezco al personal técnico y directivo de la Central Eléctrica “Cayo Santa María”, especialmente a los compañeros: Ana Iris, Begsi, Juan Carlos y Jesús Cabarroca.

Agradezco a todos los profesores que me brindaron su apoyo en el transcurso de estos cinco años de carrera.

A Jorge, Vicente, Yamilet y a Luis por brindarme su apoyo cada vez que lo necesité.

A mis compañeros: Tony, Daril Rodríguez, Ibrahim, Jorge Luis, John Raymond y Liber, por toda su ayuda

Agradezco a todos aquellos que de una forma u otra han contribuido a la realización de este trabajo y a mi formación como ingeniero.

“Muchas Gracias”

RESUMEN

En este trabajo se realizó un análisis del impacto ambiental en la central eléctrica Cayo Santa María. Para la ejecución del mismo fue necesario realizar una caracterización de la planta donde se determinaron los porcentajes de carga con la que más frecuencia trabajaron los motores a base de combustible fueloil, con el objetivo de realizar mediciones a estos regímenes de carga de la composición de los gases de escape y determinar la dispersión atmosférica de cada uno ellos. Las mediciones fueron realizadas al 60 % de carga en los motores MAN y a 75 % de carga en los motores Hyundai. Entre los principales contaminantes que fueron medidos se encuentran el NO_x y SO_2 . Para la modelación de estos contaminantes fueron analizados aspectos meteorológicos como son: la velocidad y la dirección del viento el cuál sopla principalmente del este, arrastrando la mayor cantidad de contaminantes a espacios donde solo existe mangle o aguas bajas. En el caso de los SO_2 se demostró a través de la modelación de contaminantes que se encuentra por encima del límite permisible por lo que la evaluación de esta zona de estudio en cuanto a la calidad del aire por este contaminante es deficiente. En los demás contaminantes los valores fueron inferiores a los establecidos por la norma de emisión NC 39: 1999.

ABSTRACT

This paper presents an analysis of the environmental impact in Cayo Santa María Power Plant was performed. To carry out this work it was necessary to perform a characterization of the plant where the load rate of fuel oil technology was determined, in order to make measurements of emission rates at typical load for the technology under assessment and evaluate appropriately pollutant dispersion. The measurements were done at 60% engine load for MAN engines 75% load for the Hyundai engines. The main pollutants that were measured include the NO_x and SO_2 . To model these pollutants were analyzed meteorological aspects such as: the speed and direction of the wind which blows mainly east, dragging the pollutants into spaces where there is only mangrove or low water. In the case of SO_2 was demonstrated through the modeling the contaminants concentration overcome the allowable limit established by the Cuban standards, in some days the quality of air on some points is poor. In other pollutants values were lower than those set by the emission standard NC 39: 1999.

ÍNDICE

Introducción.....	1
Capítulo 1. Estado del arte.....	3
Introducción.....	3
1. Contaminación ambiental de los motores de combustión interna.....	3
1.1 Componentes tóxicos en los productos de combustión de los motores de ciclo Diesel.....	3
1.1.1 Formación de los contaminantes.....	4
1.2 Efectos nocivos de la contaminación atmosférica.....	6
1.2.1 Efectos sobre la atmósfera.....	6
1.2.2 Efectos sobre la salud humana.....	8
1.2.3 Efectos sobre los animales.....	9
1.2.4 Efectos sobre las plantas.....	10
1.2.5 Efectos sobre los materiales.....	10
1.3 La Gestión Ambiental.....	11
1.3.1 Instrumentos de la gestión ambiental en Cuba.....	11
1.4 Gestión de la calidad del aire.....	12
1.4.1 Procesos de Emisión, Dispersión e Inmisión.....	12
1.4.2 Medición y evaluación de las emisiones atmosféricas.....	13
1.5 Normativas relacionadas con la calidad el aire a nivel internacional y en Cuba.....	15
1.5.1. Normas Cubanas sobre la calidad del aire.....	17
1.6. Modelos de dispersión.....	20
1.6.2 Descripción del modelo ISC3.....	21
1.6.3 Descripción del modelo ISCST.....	22
1.7 Ecuación Gaussiana.....	22
1.8 Selección del sitio de muestreo.....	23
1.8.1 Metodología para la selección del sitio de muestreo, determinación del número de puntos y su localización.....	24
1.9. Metodología para la realización del estudio.....	25
1.9.2 Definición de las instalaciones energéticas.....	27

Conclusiones parciales.....	29
Capítulo 2.	30
Capítulo 2. Caracterización y análisis general del impacto de la Central Eléctrica Cayo Santa María.	31
Introducción.....	31
2.1. Localización de la Entidad.	32
2.2. Caracterización real del área de estudio.	33
2.3. Capacidad instalada en la planta.....	34
2.4 Tecnología instalada en la Planta. (Fueloil).....	36
2.5 Principales Consumos.	40
2.6	41
Generación bruta y generación neta promedio para cada tecnología.	41
Conclusiones Parciales	44
Capítulo 3	45
Capítulo 3. Impactos sobre la calidad del aire	46
Introducción	46
3.1. Variabilidad de la carga.	47
3.2 Índice de consumo de la central eléctrica en el 2013.	48
3.3. Regímenes de carga por unidades de generación para la tecnología Fueloil en el 2013.....	49
3.4. Valoración de la eficiencia y el consumo de combustibles en las centrales. ..	51
3.5. Equipamiento a utilizar en la medición.	52
3.6 Resultados de las mediciones.	53
3.7 Inventario de emisiones y modelación de la dispersión de contaminantes. ...	54
3.7.1 Determinación de las emisiones de gases contaminantes.	55
3.7.2 Tasas de emisión e inventario de emisiones.....	55
3.8 Cumplimiento de las Normas de emisión.	57
3.9. Dispersión de contaminantes, determinación de la concentración de contaminantes.	58

3.9.1. Modelo de dispersión atmosférica utilizado para el estudio.....	59
3.10 Impactos sobre la calidad del aire de las emisiones de gaseosas.	60
3.10.1. Impacto asociado al dióxido de azufre.	61
3.10.2. Impacto asociado al dióxido de nitrógeno.	63
3.10.2. Impacto asociado al PM10.	65
Conclusiones	68
Recomendaciones.....	69
Bibliografía.....	70
Anexos	72

Introducción.

La generación de electricidad a través de los grupos electrógenos en Cuba fue una alternativa tomada por la dirección del país teniendo en cuenta que la fuente de energía principal parte de los combustibles fósiles y este solo era utilizado por las centrales termoeléctricas. Estas plantas además de consumir grandes cantidades de combustible ofrecían excesivas pérdidas dadas por la transportación hasta el sistema consumidor. Además las propias centrales comenzaron a deteriorarse obligando al país a realizarles fundamentalmente reparaciones capitales las cuáles necesitan de gran capital para su constante reparación. Estos problemas permitían un crecimiento de la demanda de energía eléctrica que el país por su situación económica no podía satisfacer[1]. Como primera alternativa se determinó comenzar a cortar la energía eléctrica principalmente en los horarios pico de consumo. Es entonces partir de ese momento que surge el concepto de generación distribuida como una nueva forma de generación de energía. La cuál consiste en la generación de energía eléctrica por medio de pequeñas fuentes.

Conociéndose esta nueva tecnología el estado cubano emprendió una investigación sobre la ubicación de emplazamientos, primeramente fueron instalados los motores diesel de generación y posteriormente se comenzó la instalación de los emplazamientos de Fueloil como combustible los cuales fueron creciendo en importancia debido a la reducción de costo que le representaría al país en explotación y mantenimiento de los mismos [2].

En Cuba se destina a la producción de electricidad aproximadamente el 45 % de consumo total de portadores energéticos, siendo la estructura de consumo de combustibles derivados del petróleo según las tecnologías empleadas en la generación eléctrica para el año 2014 como sigue: 62 % plantas térmicas, 22 % grupos electrógenos, 11 % turbinas de gas y 5 % auto productores.

A pesar de las limitaciones en el acceso a la energía la generación de electricidad desde 2004 hasta 2012 creció en 17.9 %, de 15 633 a 18 431 GWh y con una reducción en el consumo de energía por GWh de 2006 al 2011 de 5,3 %, contribuyendo a esto, por una parte, la introducción a partir de 2005 y 2007 de grupos electrógenos diesel y fueloil. [2].

Un papel importante en el aumento de la eficiencia de la generación de electricidad ha tenido la conexión a la red eléctrica nacional de los grupos electrógenos a partir de 2005, esta tecnología permite además la generación distribuida de electricidad, reduciendo las pérdidas de energía por transmisión y la vulnerabilidad a eventos climatológicos y desastres naturales, sin embargo los impactos relacionados con la ubicación de estas centrales eléctricas en la cercanía de áreas urbanas o zonas turística, como el caso de la Central Eléctrica Cayo Santa María, requiere de un estudio detallado.

La valoración de la contaminación del aire asociada a las alternativas de suministro energético y teniendo en cuenta los riesgos de salud que traen aparejados, puede ser una guía importante para tomar mejores decisiones para la sociedad, las estimaciones al respecto pueden indicar la magnitud de episodios de contaminación en un escenario dado y proporcionar los datos necesarios para desarrollar estrategias exitosas en el control de la contaminación del aire, dando prioridad a las intervenciones de acuerdo a un máximo beneficio ambiental, social y económico, así como indicar el nivel del esfuerzo necesario para alcanzar determinados objetivos de reducción de impactos.

Problema científico

La generación de electricidad con grupos electrógenos a base de fueloil en la cayería norte de Villa Clara cubre alrededor del 85% de la demanda de este portador energético; sin embargo el impacto sobre la calidad del aire que puede representar esta fuente de energía, así como, el aporte a la emisión de gases de efecto invernadero no se ha estudiado previamente con profundidad.

Hipótesis.

Realizar una correcta valoración de los impactos sobre la calidad del aire y las emisiones de gases de efecto invernadero relacionados con la generación a base de fueloil utilizando métodos científicos puede contribuir a una mejor gestión ambiental.

En concordancia con la problemática mencionada se desarrolla este proyecto con los siguientes objetivos:

Objetivo General

- Diagnosticar el impacto sobre la contaminación atmosférica de la Planta Eléctrica Cayo Santa María, con especial atención a la tecnología fueloil con vistas a su cuantificación.

Objetivos específicos

- Caracterizar la instalación, incluyendo: localización, capacidad instalada, tecnologías, principales consumos y su magnitud, generación bruta, generación neta, proyecciones de crecimiento y diagrama de flujos.
- Analizar los regímenes de carga de la tecnología fueloil tomando como base para el estudio del año 2013, mediante el; empleo de herramientas estadísticas.
- Estimar las emisiones de los principales contaminantes gaseosos producto de la combustión.
- Construir archivo de emisiones horarias de cada chimenea de la planta, con vista a la modelación de la dispersión de las emisiones.
- Modelar la dispersión de los contaminantes en el área de estudio para cuantificar el impacto sobre la calidad del aire.
- Analizar los impactos sobre la calidad del aire.

Capítulo 1. Estado del arte.

Introducción.

A través del tiempo el hombre ha utilizado los recursos de la naturaleza con el objetivo de mejorar su sistema de vida. Basados en esta idea el hombre ha sobre explotado los recursos naturales sin tener en cuenta cualquier aspecto que no repercuta en su propio beneficio, lo cual ha dado paso a una de las problemáticas más graves que presenta la humanidad, la contaminación ambiental. Esta contaminación está dada por la saturación de la capacidad asimiladora y regeneradora de la naturaleza.

El aire es una mezcla de sustancias constituidas por el 78% nitrógeno, 21% oxígeno el uno por ciento restante contiene pequeñas cantidades de otras sustancias como el dióxido de carbono, metano, hidrógeno, argón y helio. Aunque de forma natural el ambiente se contamina a través de la erupción de volcanes, descomposición de plantas, etc, se habla de contaminación del aire a aquellos que son generados por la actividad del hombre para su beneficio como son las emisiones producidas por las chimeneas de las instituciones que generan electricidad y calor, así como también los emitidos por los automóviles entre otras.

1. Contaminación ambiental de los motores de combustión interna.

1.1 Componentes tóxicos en los productos de combustión de los motores de ciclo Diesel.

Los motores estacionarios y los instalados en autos, camiones, motocicletas, camionetas rurales y autobuses emiten cantidades significativas de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas sólidas (P) entre otras. El empleo de todos los métodos conocidos para obrar sobre el proceso de formación de la mezcla y la combustión hace que disminuya considerablemente el contenido de los componentes tóxicos en los gases de escape, sin embargo, resulta imposible liquidarlos por completo.

Además de los componentes tóxicos de los gases quemados en los motores de encendido por chispa se expulsan a la atmósfera los gases del cárter, lo que incrementa la cantidad de hidrocarburos arrojados a la atmósfera. En la tabla 1 vienen insertados los resultados del desprendimiento específico de los componentes tóxicos en los gases de escape, calculados para 1kW.h y en porcentaje, cuando el motor funciona en el régimen nominal [3].

Tabla 1. Contenido específico de sustancias nocivas en los gases de escape [3].

Sustancias.	En g/kW h.			En % volumétrico	
	Motores de carburador	Diesel de cuatro tiempos	Diesel de dos tiempos	Motores de carburador	Diesel
Monóxido de carbono	70 -180	4.0 -5.5	11	Hasta 6	Menos del 0.2
Óxido de Nitrógeno (N ₂ O ₅)	27	12 -19	19	0.5	0.25
Hidrocarburos	14 - 140	2.0 - 4.0	8	0.05	Menos del 0.01
Aldehídos	3.1	0.14 - 0.2	0.34	0.3	0.002
Anídrido sulfuroso	0.28	0.95	1	0.008	0.03
Bensipireno	0.02 ¹⁾	0.0014 – 00.002 ¹⁾	0.0014	----	----
Carbonilla	0.4	1.4 – 2.0	1.22	0.05	0.25

Leyenda: ¹⁾ En mg/kW h

1.1.1 Formación de los contaminantes.

En este epígrafe serán presentadas algunas de las características que poseen los contaminantes producidos por los MCI:

Monóxido de carbono (CO).

Es un gas formado durante la combustión incompleta de combustibles que contienen carbón, debido a que no logra reaccionar con el oxígeno, y que es conocida como mezcla rica, es importante mencionar que siempre va a existir un pequeño por ciento que no será quemado en el proceso de combustión ya que por lo general se introduce mayor cantidad de combustible que de aire lo que facilita a la formación del monóxido de carbono. Es un gas invisible, inodoro e insípido.

Óxidos de nitrógeno (NO_x). Los óxidos de nitrógeno se forman principalmente por el proceso de combustión, y se puede obtener de dos formas:

1. Cuando el nitrógeno que contiene el combustible es oxidado, este se convierte en óxidos de nitrógeno.

Aunque este proceso de oxidación del nitrógeno que trae el combustible es el modo menos importante ya que en ocasiones el combustible contiene niveles de nitrógeno muy bajo como para reaccionar de manera tan violenta creando los NO_x.

2. Cuando se mezclan el nitrógeno atmosférico y el oxígeno en el proceso de combustión a elevadas temperaturas.

Esta es la causa de mayor peso en la formación de los NO_x debido a la cantidad de nitrógeno que contiene la atmósfera. Entre las principales fuentes de emisión de estos gases se encuentran: las ocasionadas por los vehículos de transporte y las ocasionadas durante la generación de electricidad. La mayor parte de óxidos de nitrógeno formados a través de esta ruta son emitidos como óxido nítrico. Una cantidad más pequeña, típicamente 5 %, es emitida como dióxido primario de nitrógeno, mientras el fragmento principal de dióxido atmosférico de nitrógeno es un producto secundario de química atmosférica [4].

Las emisiones de NO_x se generan en ambientes en los que las altas temperaturas de combustión en el motor, centrales de energía u hornos hacen que el oxígeno y el nitrógeno que se encuentran presentes en el aire se combinen formando el NO_x , el cual puede ser eliminado si se reduce la temperatura del motor o se instalan dispositivos como convertidores catalíticos [3].

Partículas (P).

La partículas emitidas a partir de quemar combustibles fósiles y biomasa, están típicamente constituidas por carbón, en su forma elemental y como compuestos orgánicos de volatilidad bajo. Son formadas solo por partículas relativamente pequeñas y son emitidas como hidrocarburos un contaminante importante que a menudo se asocia con partículas aerotransportadas [4].

Las partículas de material emitidas al aire varían ampliamente tanto en su composición física y química como en su tamaño. Actualmente existen equipos que monitorean tanto las partículas en suspendido total (con tamaños inferiores a las 50 micras) como la fracción respirable (MP10). Estas últimas se refieren a las partículas de tamaño menor a las 10 micrómetros y son de interés debido a que por su pequeño tamaño pueden penetrar a los pulmones presentando riesgos significativos a la salud (recientemente la atención gira en torno de partículas con tamaños inferiores a las 2,5 micrómetros, ya que tienen mayor probabilidad de ingresar a los alvéolos pulmonares). Las que poseen mayor tamaño son difíciles de inhalar y son removidas fácilmente del aire por sedimentación. En general, las partículas arrastradas por el aire varían su tamaño desde 0,001 a 500 μm (micrómetros) con la mayor parte entre 0,1 a 10 μm . aquellas que presentan tamaños inferiores a 0,1 μm muestran un comportamiento similar al de las moléculas con movimientos aleatorios causados por colisiones con las moléculas de gas. Las partículas entre 1 y 20 μm , tienden a seguir el movimiento del gas que las transporta. Las partículas mayores de 20 μm poseen velocidades de asentamiento significativas, por lo tanto, el aire las arrastra durante periodos relativamente cortos (Wark y Warner, 1996). Teniendo en cuenta la forma en que son arrojadas a la atmósfera son frecuentemente clasificadas como:

Primarias (emitidas directamente a la atmósfera)

Secundarias (se forman o modifican en la atmósfera por condensación, crecimiento y cambio químico de los gases) [5].

Las partículas arrastradas por el viento pueden ser clasificadas como: aerosol, polvo, partículas, ceniza fina, niebla, vapores, humo y hollín. Una de las fuentes principales de material en forma de partículas primaria fina son los procesos de combustión en particular la combustión del diesel, donde el transporte del gas caliente desalojado dentro de tubos de escape o chimeneas pueden producir nucleaciones espontáneas de partículas antes de la emisión. Las partículas secundarias se generan cuando productos de baja volatilidad son formados en la atmósfera, por ejemplo, la oxidación

de dióxido de azufre a ácido sulfúrico y cuando las sustancias reaccionan con la luz solar y el vapor de agua [5].

Las partículas sólidas en suspensión de más de 10 μm de diámetro, inhaladas por la nariz, se depositan en la sección extratorácica de las vías respiratorias, en tanto que las fracciones de 2,5 μm a 10 μm se depositan cerca de las vías aéreas finas. Las $\text{MP}_{2,5}$ preocupan más porque pueden evadir el sistema de defensa del aparato respiratorio humano y llegar al tejido pulmonar, donde pueden permanecer alojadas durante años, en el caso de las partículas solubles, pueden ser absorbidas en el torrente sanguíneo. Aquellas partículas cuyo diámetro aerodinámico es inferior a 10 μm pueden cruzar las barreras protectoras de la zona superior del sistema respiratorio. Una vez que las partículas entran al tracto respiratorio, pueden ser alojadas tanto en el estómago como en los intestinos. Otras permanecen en los pulmones donde pueden rodearse de tejido y, eventualmente, ser incorporadas al flujo sanguíneo [6].

Las partículas primarias de Carbón: La ceniza es una fuente importante de partículas de carbono, lo cual comprende partículas mayormente de material mineral liberado de un combustible como carbón en el proceso de combustión y llevado a la atmósfera con los gases a través del tubo de las chimeneas. Existen otros procesos mecánicos como escarbar que también pueden crear fragmentos de roca bastante pequeña para volverse suspendidas en la atmósfera, y la acción del viento puede suspender partículas de terreno y el polvo de superficies territoriales en la atmósfera [4].

Oxidantes fotoquímicos (ozono). El contaminante del aire más difundido en los climas templados es el ozono, uno de los oxidantes fotoquímicos formado cuando los óxidos de nitrógeno e hidrocarburos reaccionan en presencia de la luz solar. El ozono es un gas mayormente invisible, es tan tóxico que en alguna ocasión se le utilizó para esterilizar instrumental de laboratorio, siendo aún empleado para estos fines en muchos lugares para desinfectar el agua potable (Los Ángeles y Zurich, por ejemplo). Al igual que la lejía, el ozono destruye la materia orgánica incluyendo los tejidos humanos al oxidarlos. A los niveles encontrados en muchas ciudades, el ozono se quema a través de las paredes de las células en los pulmones y vías respiratorias [3].

1.2 Efectos nocivos de la contaminación atmosférica.

En este epígrafe se explica de forma general los efectos nocivos de la contaminación atmosférica sobre: la propia atmósfera, la vegetación, los animales, materiales y el hombre.

1.2.1 Efectos sobre la atmósfera.

La visibilidad: esta reducción de la visibilidad es consecuencia de la interacción de los contaminantes con la luz, las interacciones más importantes son los procesos de absorción y los procesos de dispersión, este último proceso es el que produce una mayor disminución de la visibilidad. Además de este efecto, la contaminación del aire afecta los climas urbanos con un aumento de la formación de niebla y un decremento en la recepción de la radiación solar [7].

Lluvia ácida: Precipitación, normalmente en forma de lluvia, pero también en forma de nieve, niebla o rocío [8], también la deposición húmeda y seca, que son las partículas ácidas que se depositan sobre todo el medio, generalmente,[9] el pH de 5.6 ha sido

usado como base para identificar la lluvia ácida, sin embargo la aceptación de este valor se debate intensamente. En esencia, cualquier precipitación con un valor de pH menor a 5.6 es considerado como una precipitación ácida [10].

Destrucción de la capa de ozono: El espesor de ésta capa varía cíclicamente a diario y con las estaciones. La actividad del hombre ha provocado la alteración del ciclo del ozono que ha derivado en una disminución continua y alarmante en la capa de ozono [10].

Efecto invernadero: Como resultado del efecto invernadero, la Tierra se mantiene lo suficientemente caliente como para hacer posible la vida sobre el planeta. De no existir el fenómeno, las fluctuaciones climáticas serían intolerables. Sin embargo, una pequeña variación en el delicado balance de la temperatura global puede causar graves estragos. En los últimos 100 años la Tierra ha registrado un aumento de entre 0,4 y 0,8 °C en su temperatura promedio. El dióxido de carbono (CO₂), vapor de agua, el gas metano y otros reconocidos por IPCC, forman una capa natural en la atmósfera terrestre que retiene parte de la energía proveniente del Sol. El uso de combustibles fósiles y la deforestación han provocado el aumento de las concentraciones de estos gases, que incrementan el efecto invernadero [10].

1.2.2 Efectos sobre la salud humana.

La contaminación atmosférica reviste gran importancia, debido a su enorme impacto directo sobre la salud humana. Cada persona adulta respira 15 - 28 m³/día de aire y posee una superficie alveolar en sus pulmones de alrededor de 65 m². La mayoría de los contaminantes presentes en el aire puede encontrar fácilmente su camino hacia la sangre, debido a que la transferencia de materia a través de la pared de los capilares pulmonares es muy poco selectiva. Teniendo en cuenta lo expuesto en los gases contaminantes pueden manifestarse en diferentes partes del cuerpo humano, estas partes afectadas incluyen: el sistema respiratorio, sistema inmunológico, piel y tejidos mucosos, sistema sensorial, sistema nervioso central y periférico y sistema cardiovascular.

El efecto será función de la toxicidad de la sustancia y el grado de exposición. Hay dos tipos de toxicidad:

- Inherente, cuando la sustancia por si sólo puede producir daño.
- Generada o potencial, cuando la sustancia original no tiene capacidad de producir daño pero si al interaccionar con el medio o con el receptor.

El grado de exposición va a ser función de la concentración de la sustancia tóxica y del tiempo de exposición. La vía de exposición puede ser por ingestión, inhalación o contacto. La posibilidad de penetración es distinta así se trate de un contaminante en forma de partículas o gaseoso, los contaminantes gaseosos más importantes son:

➤ Óxidos de azufre (SO₂).

Son muy solubles en agua por lo que tienen poca penetración en el organismo, provocan daño en el tracto superior. En estudios recientes se han observado efectos nocivos del SO₂ a concentraciones relativamente bajas. El autor C. Sivila en 1997, estimó que una reducción de 10 µg/m³ de las concentraciones de SO₂ en el ambiente estaría asociada con una reducción de la mortalidad comprendida entre 0,20 % y 1,21 %, lo que equivaldría a una gama de 15 a 87 decesos por un millón de personas [11].

De acuerdo a los resultados de estudios epidemiológicos de morbilidad o cambios en la función pulmonar en grupos de población sensible, la Organización Mundial de la Salud recomienda que no se supere una concentración de SO₂ de 500 µg/m³ para una exposición de 10 minutos, o de 250 µg/m³ para un periodo de 24 horas, o de 50 µg/m³ para un periodo de un año [13].

➤ Óxidos de nitrógeno (NO_x).

Los gases pertenecientes a los NO_x, son gases irritantes que pueden alojarse en la membrana mucosa de las vías respiratorias o incluso en el sistema sanguíneo. En caso de ser absorbido por el sistema respiratorio, este puede ocasionar enfermedades como: bronquitis, bronconeumonía y edema pulmonar. Por otra parte si es incorporado a la sangre en excesivas cantidades la misma pierde la capacidad de transportar oxígeno y por tanto la asfixia. Por lo que este contaminante afecta con mayor frecuencia a personas que padecen del corazón y asma bronquial entre otras. Autores como Loblad y Erisman en 1992 plantearon que la función pulmonar se ve afectada por una exposición de 30 minutos a una concentración de NO₂ de 560 µg/m³ con ejercicio, 940 µg/m³ en personas asmáticas y más de 1300 µg/m³ en una exposición de 10 a 15 minutos en personas sanas. Se encontró que la exposición a una concentración media diaria de NO₂ de 244 µg/m³ provocaba dolores de garganta en personas adultas.

Los óxidos de nitrógeno reaccionan con los hidrocarburos para formar ozono, el contaminante urbano más penetrante en el cuerpo humano, esta nueva sustancia enrojece e hincha los tejidos permitiendo que el líquido de las células se filtre a los pulmones [2].

➤ **Monóxido de carbono (CO).**

Tiene serios efectos sobre la salud, principalmente respiratorios y cardiovasculares. En concentraciones menores, como aquellas existentes en el aire urbano, el CO afecta la capacidad de transporte de oxígeno en la sangre. Exposiciones a concentraciones de 45 mg/m³ de CO durante más de 2 horas afectan la capacidad de raciocinio de una persona. Entre 2 y 4 horas de exposición a 240 mg/m³ se eleva el nivel de COHb en la sangre entre 10 % y 30 %. La exposición a 1000 mg/m³ de CO eleva el nivel de COHb en la sangre a más de 30 % y causa un rápido incremento del pulso, lo que provoca coma y convulsiones. Desgraciadamente, la afinidad del CO con la hemoglobina es 200 veces mayor que la correspondiente al oxígeno. La hemoglobina a la cual se ha adherido CO se llama carboxihemoglobina (COHb), la que no puede transportar O₂ hacia las células. Según la OMS, el nivel de COHb en la sangre de las personas expuestas a CO no debiera superar el 2.5%, respecto al contenido total de hemoglobina [12]. El monóxido de carbono desplaza al oxígeno de la sangre, envenenando al corazón, cerebro y demás órganos vitales. La ruta de acceso del monóxido de carbono a nuestro cuerpo es a través de los pulmones. La capacidad de ejercitar el organismo decae, por lo que suele aumentar el número de muertes por ataques cardíacos [3].

➤ **Material en forma de Partículas (PM).**

Autores como: A.D Peter, A. Wichman y W.Koenig, [14] han sugerido que el poder tóxico de las partículas en los ambientes urbanos procedería de su alta composición en partículas ultra finas. Así, aunque su concentración no sea muy alta, estas partículas podrían provocar una exacerbación de los problemas respiratorios e incrementar la posibilidad de que ocurra una coagulación plasmática. En un estudio realizado en Alemania se encontró que durante un episodio de contaminación atmosférica con niveles elevados de SO₂ y de partículas en suspensión, las cifras de viscosidad sanguínea se encontraban elevadas, tanto en hombres como en mujeres [15]. En los últimos años ha habido un gran avance en el conocimiento y comprensión de los efectos de la contaminación atmosférica, principalmente desde el punto de vista metodológico. Entre los estudios epidemiológicos, los de series temporales son los más utilizados para medir los efectos a corto plazo de la contaminación atmosférica. Los principales efectos a corto plazo de la contaminación atmosférica sobre la salud van desde un aumento de la mortalidad total y por causas respiratorias y cardiovasculares a las alteraciones del funcionalismo pulmonar y otros síntomas, pasando por un incremento en el número de visitas médicas e ingresos hospitalarios [16]. Por lo que se puede decir que las partículas de material constituye el problema más serio de contaminación del aire en zonas urbanas.

1.2.3 Efectos sobre los animales.

Los efectos de los contaminantes sobre la salud de los animales son similares a los efectos sobre la salud humana. Sin embargo, hay algunos efectos que no se presentan en los humanos, por ejemplo, la lluvia ácida puede provocar serios efectos sobre la salud de los organismos acuáticos. Los organismos adultos pueden ser mucho más resistentes a la acidez, no obstante, cuando los huevos o los jóvenes son afectados por ella, o cuando el alimento natural que los sostiene es abatido por la acidez, los adultos se debilitan y la población merma o puede llegar a desaparecer. La sensibilidad de cada especie a los contaminantes y a la acidificación es variable,

siendo los grupos más sensibles los peces, los líquenes, los musgos, ciertos hongos, algunos de ellos esenciales para la vida de los árboles, y los organismos acuáticos pequeños [10].

Las partículas de ozono, en especies terrestres provocan una disminución de la elasticidad y un envejecimiento prematuro de los pulmones. Por lo que trae por consecuencia: una mayor susceptibilidad a las infecciones bacterianas [3].

1.2.4 Efectos sobre las plantas.

Los contaminantes atmosféricos también causan daños a la vegetación: los daños a los bosques son muy importantes así como la disminución de la productividad en zonas agrícolas. Los daños se deben principalmente al efecto de la precipitación o lluvia ácida y a los oxidantes fotoquímicos. Una característica importante de estas formas de contaminación es que sus impactos van más allá de la escala local, afectando amplias regiones que en ocasiones rebasan las fronteras del país generador de los contaminantes [9].

Los contaminantes pueden actuar de dos formas:

- Acción aguda. Ocurre cuando las plantas están expuestas a grandes concentraciones de contaminantes en cortos espacios de tiempo.
- Acción crónica. Las producidas por bajas concentraciones a largos períodos de tiempo en donde las plantas sobreviven continuamente enfermas.

Los compuestos de flúor son tóxicos en general para las plantas, incluso a bajas concentraciones. Atacan las viñas y los árboles frutales.

1.2.5 Efectos sobre los materiales.

El denominado “mal de piedra” consiste en el ataque del SO_2 a los minerales carbonatados como son los mármoles, la piedra caliza, la argamasa, etc. Todos ellos materiales utilizados en la construcción. El SO_2 sustituye el carbonato por el ion sulfato, es una reacción de sustitución. Este proceso se favorece con la lluvia ácida y el resultado es que la roca se disuelve [17].

La erosión de los edificios por este problema se ha visto incrementada considerablemente en los últimos años. Las rocas de los edificios se ven debilitadas mecánicamente porque el sulfato de cálcico contiene un volumen específico superior al carbonato cálcico, lo que provoca grietas en las rocas. La solución para este mal consiste en eliminar la capa externa de la piedra para eliminar los sulfatos cálcicos. Las superficies de los edificios también sufren la acción de los hidrocarburos no quemados que expulsan los tubos de escape, los que provocan el ennegrecimiento y el aislamiento de las superficies expuestas [17].

Los óxidos de azufre y las nubes de ácido sulfúrico también atacan a las pinturas plásticas y otros polímeros que forman parte de las estructuras de los edificios. Las fibras textiles sufren decoloraciones, el papel se amarillea y se deshace y también los contactos eléctricos de sistemas electrónicos de las antenas sufren la acción de estos contaminantes provocando interferencias y deficiencias en el funcionamiento. Los contaminantes fotoquímicos atacan los recubrimientos poliméricos, las estructuras metálicas, decoloran y estropean las fibras textiles y, en concreto, los nitratos atacan las aleaciones de los sistemas eléctricos [17].

1.3 La Gestión Ambiental.

La Gestión Ambiental comprende un conjunto de acciones, mecanismos, e instrumentos que garantizan la administración y el uso racional de los recursos naturales. Es necesaria su aplicación teniendo en cuenta la incorporación de la sociedad y la cultura ambiental con la que se cuente. En Cuba, la Ley No. 81 del Medio Ambiente es la encargada de que sean realizadas cada una de las tareas asignadas para cada sector empresarial o poblacional existente en la nación lo cual facilita el control de la actividad del hombre en esta esfera así como la conservación, mejoramiento y cuidado del medio ambiente. El objetivo fundamental que persigue un sistema de gestión ambiental es lograr que todas las organizaciones, incorporen a la actividad cotidiana de producción, servicio y comercialización un conjunto de estrategias ambientales en las cuales se exponen diversas medidas para prevenir la contaminación ambiental. Estas medidas están directamente relacionadas con una correcta utilización de los recursos naturales en los procesos productivos y de los cuales se espera que se cumplan más allá de lo que exige la normativa vigente, que permita un mejoramiento continuo en la producción y en la calidad de vida del hombre y la naturaleza.

Para la especificación de los requisitos en cuanto a este tema fue creada la norma NC - ISO 14001 la cual puede ser aplicada en todos los tipos y tamaños de organizaciones siendo capaz de adaptarse a diversas condiciones geográficas, culturales y sociales. El objetivo general de esta norma es apoyar la protección ambiental y la prevención de la contaminación en equilibrio con las necesidades socio-económicas.

El establecimiento y cumplimiento de todo el conjunto de técnicas de gestión ambiental en el proceso productivo de forma organizada y sistemática, permitirá reducir la contaminación ambiental. Para esto es necesario hacer entender a todas las instituciones y organizaciones la necesidad de mejorar la tecnología con la que se cuenta ya que por lo general no son las más eficientes. Teniendo en cuenta que la sustitución de estas tecnologías por otras de mayor calidad han de ser económicamente viables para el país.

1.3.1 Instrumentos de la gestión ambiental en Cuba.

- a) Estrategia Ambiental Nacional, Programa Nacional de Medio Ambiente y Desarrollo y programas, planes y proyectos de desarrollo económico y social.
- b) Ley 81, su legislación complementaria y demás regulaciones destinadas a proteger el medio ambiente y las normas técnicas ambientales.
- c) Ordenamiento territorial.
- d) Licencia ambiental.
- e) Evaluación de impacto ambiental.
- f) Sistema de inspección ambiental estatal.
- g) Sistema de información ambiental.
- h) Programa Integral de Comunicación Social.
- i) Educación ambiental.
- j) Investigación científica y la innovación tecnológica.
- k) Regulación económica.
- l) Fondo Nacional del Medio Ambiente.
- m) Los regímenes de responsabilidad administrativa, civil y penal.
- n) Premios y Reconocimientos.

Como instrumentos facilitadores en la prevención de daños ambientales e incremento de la eficiencia económica se encuentran: La Evaluación de Impacto Ambiental y las Licencias Ambientales, ya que a través de estas se pueden minimizar considerablemente la producción de desechos mediante la utilización de mejores tecnologías teniendo en cuenta la disponibilidad con la que se cuente [23].

1.4 Gestión de la calidad del aire.

Teniendo en cuenta lo establecido por la O.M.S, la gestión de la calidad del aire está basada en políticas gubernamentales internacionales y nacionales. Sin un marco de política apropiado y una legislación adecuada, es difícil mantener un programa activo y exitoso de gestión de la calidad del aire. El marco político incluye el transporte, energía, planificación y desarrollo en otras áreas. Para tener una buena calidad del aire es necesario que esas políticas estén interconectadas, que sean compatibles y que existan mecanismos para coordinar las respuestas a las políticas de los diferentes sectores del gobierno [12].

Como muestra de esto fue celebrada en 1992 en Río de Janeiro una Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo 1992. A partir de ese momento fueron sentadas las bases para lograr un desarrollo sostenible. Como resultados de esta conferencia fueron creados dos programas conocidos como: la Declaración de Río y Agenda 21, en la que se tiene en cuenta la gestión de la calidad del aire. La cual está dada por nivel de concentración de sustancias o elementos contaminantes presentes en el aire y que dado su nivel o concentración pueden llegar a afectar la salud humana, la fauna, la flora, ensuciar y deteriorar las estructuras y el espacio público. Los contaminantes del aire pueden agruparse en dos categorías: los contaminantes primarios, que se emiten directamente a la atmósfera; y los contaminantes secundarios, que se forman en la atmósfera a partir de precursores primarios debido a reacciones químicas tales como hidrólisis, oxidación y reacciones fotoquímicas.

Las tres herramientas principales de evaluación de la calidad del aire son: monitoreo del ambiente, modelos e inventarios y medición de emisiones [12].

1.4.1 Procesos de Emisión, Dispersión e Inmisión.

La emisión es la expulsión del contaminante desde una fuente a la atmósfera. No sólo las fuentes industriales fijas en que la descarga está localizada en chimeneas (o conductos de ventilación) o las móviles, los vehículos de transporte (automóviles, aeronaves y barcos), son ejemplos de fuentes de emisión, sino también, la construcción de caminos y obras viales en general, plantas de tratamiento de aguas residuales (en las cuales se emite metano y olores), depósitos de combustibles y otros productos químicos como son las emisiones fugitivas [19].

Según su disposición, los focos de emisión pueden ser:

- Focos puntuales: industrias.
- Focos lineales: autopistas.
- Focos planos: polígono industrial, ciudades.

La dispersión, describe la distribución y las posibles transformaciones químicas (formación de los llamados contaminantes secundarios) del contaminante en la atmósfera. [18].

El término de **inmisión** se entiende como la cantidad o concentración del contaminante que es recibido por un receptor como: seres humanos, plantas, animales, edificios y otros bienes materiales [18].

1.4.2 Medición y evaluación de las emisiones atmosféricas.

Para lograr establecer una valoración y tener un control acerca de la contaminación atmosférica, es necesario tener en cuenta las emisiones de contaminantes procedentes de disímiles fuentes. La calidad del aire que exista en un área determinada depende en gran medida de la emisión de contaminantes vertidos a la atmósfera por una o más fuentes. Para conocer la intensidad de las emisiones existen al menos tres alternativas: el Balance de masa, los Factores de emisión y la Medición de las emisiones.

El balance de masa permite contabilizar las corrientes de sólidos, líquidos o gases que entran y salen al proceso completo o de una determinada unidad del mismo, mediante la simulación teórica de las reacciones químicas que se llevarían a cabo en el proceso de combustión. Este método es utilizado para establecer la influencia de diferentes parámetros del proceso en los niveles de emisión y para detectar errores importantes en los resultados experimentales [19].

Factores de emisión: son valores (índices) obtenidos a partir de balances de masa o de resultados de medidas reales, normalizadas por algún factor (masa, energía o producto) que caracteriza el tamaño del proceso o foco de emisión. En general, proporcionan un procedimiento rápido y útil de estimación de las emisiones. Pueden emplearse para detectar errores importantes en resultados de muestreo o como indicativo de la emisión potencial, de un contaminante a partir de una fuente de emisión. No son límites o estándares de emisión, debido a que representan, esencialmente, un promedio del rango de la tasa de emisión, para una tecnología y un combustible determinado [19].

La medición directa permite incorporar todas las características diferenciales de la fuente y contaminantes, es la forma más compleja, costosa y confiable de determinar las emisiones, aunque no está exenta de errores. En términos generales, la calidad de los resultados de un programa de medida lo determina el efecto combinado de la precisión del equipo de muestreo, la técnica analítica, la calibración de los equipos de medición y el proceso de cálculo. En la práctica, la limitación más significativa se encuentra asociada a la disponibilidad de equipos certificados, personal calificado y el costo mismo de los muestreos [19].

El monitoreo de la calidad del aire en el Mundo.

La información generada en las estaciones de monitoreo ubicadas y distribuidas estratégicamente en una región geográfica determinada, tienen la capacidad de generar en el esquema de un plan operativo congruente, información confiable que refleje las concentraciones de los contaminantes presentes en una cuenca atmosférica específica [20]. Es una herramienta fundamental para vigilar la calidad del aire, un mejor entendimiento de la problemática de la contaminación atmosférica y para el desarrollo de estrategias de prevención y control [21].

Para realizar el monitoreo de la calidad del aire pueden ser utilizados: muestreadores pasivos, activos y analizadores automáticos. Aunque en la actualidad existen otros que utilizan sensores remotos y bioindicadores, tienen actualmente aplicaciones muy restringidas, ya que en muchos casos no ha sido posible validarlas correlacionándolas con las demás metodologías.

Las principales ventajas del muestreo pasivo son su simplicidad y bajo costo, por lo que se pueden extender muchas unidades para que provean información en cuanto a la distribución espacial de los contaminantes. Sin embargo el tiempo de resolución de esta técnica es limitado, por lo que sólo puede proveer información de concentraciones promedio de contaminantes.

El muestreo activo a diferencia de los pasivos, requieren energía eléctrica para bombear el aire a muestrear a través de un medio de colección físico o químico el cual posteriormente será analizado en un laboratorio. El volumen adicional de aire muestreado incrementa la sensibilidad, por lo que pueden obtenerse mediciones diarias promedio. Estos analizadores son los que han proporcionado la base de datos histórica de calidad de aire con la que se cuenta a nivel mundial, estableciéndose, gracias a estos datos, escalas y tendencias de contaminación atmosférica. Son generalmente más precisos y exactos que los pasivos, pero es más caro establecer una red de monitoreo con éstos.

Los analizadores automáticos, utilizan las propiedades físicas y químicas de los contaminantes para detectar y medir su concentración en forma continua, generalmente por medio del método óptico-electrónico.

Estos instrumentos cuentan con considerables ventajas sobre los demás muestreadores en lo que respecta a su rápida respuesta en horas o instantánea sobre todo en situaciones en las que se requieren medir concentraciones durante episodios o alarmas ambientales. Sin embargo, estas ventajas se obtienen a expensas de un incremento en los costos de capital, operación y soporte por lo que se hace inadmisibles para algunos países cuando no se cuenta con estos recursos.

Los sensores remotos a diferencia de los monitores automáticos, que proporcionan mediciones de un contaminante en un punto en el espacio, pueden proporcionar mediciones integradas de multicomponentes a lo largo de una trayectoria específica en la atmósfera (normalmente mayor a 100 m), y sistemas más complejos, pueden hasta proveer mediciones con rangos de resolución a lo largo de la trayectoria. Se han llegado a detectar por ejemplo hasta 5 ppb de SO₂, en un patrón de 1 km.

Actualmente se ha mostrado gran interés en el uso de bioindicadores para estimar algunos factores ambientales, entre los que se incluyen la calidad del aire, particularmente en la investigación de sus efectos.

El monitoreo del aire en América Latina

El autor E. Marcelo Kore [22] plantea que es el resultado de los procedimientos de muestreo y análisis de los contaminantes atmosféricos. Con buena capacidad de monitoreo, se presentan países como Brasil, Chile y México, que tienen ciudades con buena capacidad de monitoreo, dentro de estos mismos países, hay una gran diferencia en la capacidad de monitoreo entre las estaciones de una ciudad y otra. Con limitada capacidad de monitoreo están: Argentina, Colombia, Costa Rica, Ecuador, Perú y Venezuela. Países con mínima capacidad resaltan Bolivia, Guatemala, Nicaragua y Uruguay.

El monitoreo de la calidad del aire en Cuba

La Ley No. 81 DEL MEDIO AMBIENTE, de 11 de julio de 1997, establece en su Artículo 12, que el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente [9], es el encargado, a través de sus diversas instituciones, de adoptar las decisiones sobre la protección de la atmósfera. El país cuenta con una Dirección de Política Ambiental, una Agencia de Medio Ambiente (AMA) y Unidades de Medio Ambiente en cada provincia. También, como dependencia de la Agencia de Medio Ambiente, existe el Centro de Inspección y Control Ambiental (CICA), que es el órgano regulador ambiental en el país. Se complementa con las responsabilidades de la Dirección de Salud Ambiental, perteneciente al Ministerio de Salud Pública, en lo concerniente al control de la calidad de la atmósfera en asentamientos humanos.

El Ministerio de Salud Pública está a cargo del monitoreo de la calidad del aire en Cuba y se lista con los países de limitación en la capacidad de monitoreo. Teniendo un

enfoque integrador el Programa Nacional de Prevención y Control de la Calidad del Aire Atmosférico, se estableció fiscalizar las fuentes emisoras e instalar una red de monitoreo para mantener una constante vigilancia de los niveles de contaminación del aire [23]. Para garantizar la operación de los Sistemas de Vigilancia Meteorológica del Clima y de la Contaminación de la Atmósfera, el INSMET cuenta con una Red de 75 Estaciones Meteorológicas y 11 Estaciones de Control de la Calidad de la Lluvia y del Aire a lo largo y ancho del Archipiélago Cubano. Estos sistemas se apoyan con la información suministrada por las estaciones de observación meteorológica operadas por el Instituto de Aeronáutica Civil de Cuba (IACC) en los Aeropuertos del país, así como las estaciones meteorológicas, hidrológicas y pluviométricas que operan el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), el Ministerio del Azúcar (MINAZ) y el Ministerio de la Agricultura (MINAGRI) [15].

1.5 Normativas relacionadas con la calidad el aire a nivel internacional y en Cuba.

A través de los años el hombre ha querido mejorar su calidad de vida, por lo que ha prestado especial atención a la conservación de su entorno disminuyendo la contaminación ambiental y principalmente la contaminación causada por las emisiones de gases. Estas emisiones son producto de la quema de combustibles fósiles. En la actualidad se han establecido varias medidas a nivel internacional que permiten al hombre conocer en qué situación se encuentra su localidad o región a través de los estándares de calidad del aire. Estos están directamente relacionados con los niveles de contaminación que afectan tanto al hombre como al medio que lo rodea. Las normas se aplican a las empresas industriales y demás instalaciones productivas y de servicio, generadoras de sustancias contaminantes del aire, con el objetivo de proteger la atmósfera en los asentamientos humanos y fuera de este.

Comparación de las Normas Internacionales con las cubanas.

Se destacan como índices más conocidos el PSI (Pollutant Standard Index), actualmente definido como AQI (Air Quality Index), el IQCA Índice de Calidad de Aire de Cataluña y el IMECA (Índice Metropolitano de Calidad de Aire) utilizados respectivamente en los Estados Unidos, Cataluña y México, los que abarcan los contaminantes (PM_{10} , SO_2 , NO_2 , CO y O_3) [20]. Se clasifican de tipo máximo o mínimo donde sólo se informa el subíndice del “contaminante crítico” que es aquel con mayor incidencia en la calidad del aire. La Norma Cubana coincide con el IMECA, incluyendo valores de los rangos y escala de colores que los representan. Las regulaciones se pueden establecer para ciertas condicionales, como son: concentración máxima instantánea, concentración máxima promedio para un cierto tiempo, concentración a nivel de chimenea, concentración a nivel de respiración del hombre. Los estándares cubanos utilizan concentración máxima instantánea (20 minutos) y máxima promedio para un cierto tiempo (24 horas), así lo hacen los demás países cuando recomiendan horas y acuden al promedio aritmético mensual y anual para estos períodos de tiempos. La Organización Mundial de la Salud, no ha establecido ningún valor de referencia para PTS o PM_{10} porque no existe un umbral evidente en cuanto a sus efectos sobre la salud. En la tabla 2, se seleccionaron algunos países para hacer una comparación en cuanto a sus normativas [13].

Tabla 2. Normas nacionales para la calidad del aire y guías globales de la OMS (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) [22].

	Período de Muestreo.	Cuba ¹	Japon ²	C.E. ³	E.U.A. ⁴	México ⁵	Guías OMS ⁶	Valor máximo	Valor mínimo
SO₂	20 minutos.	500	-	-	-	-	-	-	-
	1 hora.	-	260	350	-	-	-	-	-
	24 horas.	50	100	125	365	341	125	341 ⁵	50 ¹
	Anual		-	20	80	79	50	80 ⁴	20 ³
NO₂	20 minutos.	85	-	-	-	-	-	-	-
	1 hora.	-	-	200	-	395	200	395 ⁵	200 ^{3,6}
	24 horas.	40	80-110	-	-	-	-	-	-
	Anual		-	40	100		40	100 ⁴	40 ³
CO	20 minutos.	5000	-	-	-	-	-	-	-
	1 hora.	-	-	10000	40000		30000	40000 ⁴	10000 ³
	8 horas.	-	22000		10000	13000	10000	22000 ²	10000 ^{4,6}
	24 horas.	3000	11000	-	-	-	-	3000 ¹	11000 ²
PM₁₀	20 minutos.	150	-	-	-	-	-	-	-
	1 hora.	-	200	-	-	-	-	-	-
	24 horas.	50	100	50	150	150	-	150 ^{4,5}	50 ^{1,3}
	Anual	-	-	40	50	50	-	50 ^{4,5}	40 ³

Hay que señalar que los tiempos promedios de muestreo en algunos casos no coinciden y se hace difícil la comparación entre los valores de cada país. Entre estos se encuentran: CO, NO₂, PM₁₀ y el SO₂ estos últimos solo fue posible comparar en un tiempo de 24 horas, siendo el menor valor con 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido en la NC 39:1999. Por lo que es necesario precisar que las normas cubanas están dirigidas a la protección del medio ambiente y al cuidado de la calidad del aire aunque el país no cuente con tecnologías limpias o de primer nivel y el combustible utilizado contenga un elevado por ciento de azufre. Es importante tener en cuenta que independientemente de las regulaciones designadas por la Organización Mundial de Salud, cada país debe imponer valores aproximados puesto que estos están basados en los riesgos que tienen los seres humanos. Estos tienen en cuenta los niveles de contaminación que presente el territorio, dado por el combustible que se consume. Beneficiando entre otras especies al hombre como receptor de las emisiones contaminantes.

1.5.1. Normas Cubanas sobre la calidad del aire.

Norma Cubana 39: 1999. Calidad del aire: requisitos higiénico-sanitarios.

Esta 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 fuentes de contaminación del aire. La norma usa el modelo Berlyand [24], mejorado y ajustado a las condiciones de Cuba.

Para calcular la dispersión local de gases alrededor de la fuente, en un radio de hasta 50 veces la altura de la chimenea, necesita la matriz de frecuencia Velocidad vs Rumbo y la Temperatura ambiente [25].

Se deberá dar prioridad al diseño y/o adquisición de tecnologías limpias o de baja emisiones. (Enmienda de la NC39/1999.) [26]. Esta norma no ha cambiado en los últimos 20 años y no refleja los últimos avances de la ciencia en modelación de la dispersión [28].

Norma Cubana 111 del 2004. Calidad del aire. Reglas para la vigilancia de la calidad del aire en asentamientos humanos.

Esta norma establece las reglas para el desarrollo de la vigilancia de la calidad del aire en los asentamientos humanos. Los principios de organización de la vigilancia son: regional, urbano y local. La situación de la calidad o grado de contaminación del aire en los asentamientos humanos se evalúa mediante el índice de calidad del aire [28].

1.5.2. Determinación del Índice de Calidad del Aire en los asentamientos humanos.

La situación de la calidad o grado de contaminación del aire en los asentamientos humanos se evalúa mediante el ICA, el cual incluye una escala de seis categorías [29].

1-Buena. 2- Aceptable. 3- Deficiente. 4- Mala. 5- Pésima. 6- Crítica.

El ICA se determina utilizando como criterio el valor resultante del cociente de las concentraciones reales de cada uno de los contaminantes principales, tomando como denominador las concentraciones máximas admisibles (**Cma**) correspondientes al período de tiempo evaluado según la NC 39: 1999. El Índice de Calidad del Aire puede ser representado en una escala de valores o colores y ser utilizado por las autoridades ambientales para mostrar al público la limpieza o contaminación del aire. Cuando el ICA se representa por los colores verde y amarillo (Valores del ICA menores de 99), la calidad del aire se considera satisfactoria para la mayoría de la población. Valores de la calidad del aire por encima de 100 (naranja, rojo) son considerados como perjudiciales a la salud humana, sobre todo a grupos sensibles de la población y los colores púrpura y marrón corresponden a valores del ICA por encima de 300, los cuales producen el aumento de la frecuencia y gravedad de efectos adversos en grupos de alta susceptibilidad y en la población en general. Para la aplicación de la escala de colores se tomaron como referencia a los índices utilizados por la EPA, 2003 y el Índice de Calidad del Aire para las Islas Canarias entre otras. [7].

Los índices que se muestran a continuación se encuentran bajo la NC.111:2004 [28].

- **Índice de valor 0:** Corresponde a un nivel de concentración inferior al límite de detección del método analítico normalizado.
- **Índice de valor 100:** Corresponde al valor (100 %) de la **Cma** del contaminante principal evaluado según la NC 39: 1999, en mg/m^3 .
- **Índice de valor 200:** Corresponde a un valor de concentración real que supera en 2 veces la **Cma** del contaminante principal evaluado según la NC. 39: 1999.
- **Índice de valor 300:** Corresponde a un valor de concentración real que supera en 3 veces la **Cma** del contaminante principal evaluado según la NC 39: 1999.
- **Índice de valor 500:** Corresponde a un valor de concentración real que supera en 5 veces la **Cma** del contaminante principal evaluado según la NC 39: 1999.

A continuación se presenta una tabla que muestra la concentración de los principales contaminantes y su repercusión en los índices de calidad del aire.

Tabla 3. Límite de concentración de los contaminantes principales en mg/m^3 [28].

Contaminante Principal	Índice: 100 Calidad Aceptable		Índice 300: Límite inferior de Calidad Pésima		Índice 500: Límite inferior de Calidad Crítica	
	Diario	Horario	Diario	Horario	Diario	Horario
Dióxido de Azufre (SO₂)	0,05	0,5	0,15	1,5	0,25	2,5
Dióxido de Nitrógeno (NO₂)	0,04	0,085	0,12	0,255	0,2	0,425
Partículas en suspensión totales (PST)	0,1	0,3	0,3	0,9	0,5	1,5
Partículas en suspensión de $10\ \mu\text{m}$ (PM₁₀)	0,05	No se aplica	0,15	No se aplica	0,25	No se aplica
Monóxido de Carbono (CO)	3	5	9	15	15	25
Ozono (O₃)	No se aplica	0,08	No se aplica	0,24	No se aplica	0,4

El ICA teniendo en cuenta las categorías para su evaluación pueden ser observadas en la tabla 4. En esta tabla serán ofrecidos algunos comentarios referentes a estas categorías.

Tabla 4- Relación entre el Índice de Calidad del Aire (**ICA**) y posibles implicaciones sanitarias relacionadas con cada Categoría de Calidad.

Unidad de medida	Índice	Categoría	Comentarios
%	0 - 79	Buena	No sobrepasa el 79 % del valor de la Cma prescrito en la NC 39: 1999. Óptima calidad sanitaria del aire. Supuesta protección de toda la población (aunque no puede asegurarse que no sobrepase el umbral de respuesta de efectos adversos en individuos aislados).
%	80 - 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 39:1999. Ligero incremento en la frecuencia y severidad de los efectos adversos agudos y crónicos en la población general y principalmente en personas con enfermedades cardiovasculares, respiratorias y alérgicas y en otras de elevada susceptibilidad, solo detectables mediante investigaciones muy específicas y sensibles.
%	200 - 299	Mala	Supera entre 2 y 3 veces (200 – 300 %) el valor de la Cma . Aumento de la frecuencia y gravedad de los efectos adversos en grupos de alta susceptibilidad y en la población general, ya medibles mediante investigaciones específicas a escala individual y ecológica, basadas en registros morbilidad. Da lugar a una situación de atención.
%	300 – 499	Pésima	Supera entre 3 y 5 veces el valor de la Cma . En dependencia del incremento de la concentración del contaminante y el tiempo de exposición continua el aumento de la frecuencia y gravedad de efectos adversos en los grupos de alta susceptibilidad y en la población general. Da lugar a una situación de alerta.
%	> 500	Crítica	Se supera el límite de 5 veces la Cma , dando lugar a un incremento aún mayor del riesgo o probabilidad de ocurrencia de los efectos adversos sobre la salud de la población general y en grupos de riesgo, que se traduce en un evidente incremento agudo de la morbilidad y mortalidad que sobrecarga los servicios asistenciales; da lugar a una situación de emergencia ambiental.

1.6. Modelos de dispersión.

Los modelos de dispersión de contaminantes son una técnica para determinar la calidad del aire resultante de diversas fuentes que emiten tanto gases como partículas a la atmósfera. Son conocidos además como la representación matemática de los procesos de transporte, transformación y remoción de los contaminantes con el objetivo de predecir la calidad del aire. Los modelos pueden simular situaciones simples como una única fuente puntual, con un solo receptor y condiciones constantes, hasta situaciones complejas de varias fuentes, con varios receptores y variaciones de las condiciones atmosféricas, así como otras condiciones particulares [31]. Estos permiten básicamente:

- La modelación de los posibles impactos ambientales por emisiones al aire en una determinada área de influencia. Esto implica simular con una metodología apropiada la manera como el medio ambiente es afectado por una determinada emisión y evaluar los efectos de la acción propuesta y de sus alternativas (estrategias de control). En las emisiones se pueden analizar los efectos de descargas o escapes accidentales de gases tóxicos.
- Predecir concentraciones de contaminantes en el tiempo y en el espacio, a través de la aplicación de ecuaciones de conservación de masa y energía ofrece la ventaja de poder estimar futuros factores de emisión en obras que aún no se construyen y que podrían servir como guía de modificaciones en los diseños para evitar un alto impacto negativo en la calidad del aire de la zona. Este mismo uso puede ser aplicado a zonas industriales y fabricas actuales o futuras.
- Analizar las tendencias de calidad del aire y además sus resultados sirven para seleccionar sitios apropiados para la ubicación de estaciones [32].

1.6.1 Tipos de modelos.

Entre los modelos de mayor utilidad en el análisis de calidad del aire pueden citarse:

- **Modelos Gaussianos** de difusión para penachos de chimeneas. Es la técnica más ampliamente usada para contaminantes no reactiva.

Proporciona una excelente aproximación matemática a la dispersión de contaminantes (K2, 2002). Estos modelos han sido usados satisfactoriamente para simular la distribución de concentraciones de contaminantes sobre áreas urbanas e industriales con una escala típica de uno a menos de 50 kilómetros [33]. El tamaño del área de la aplicación está limitado desde abajo por el hecho de que los coeficientes del modelo Gaussiano no son válidos cerca de la fuente (distancias por debajo de 100 metros. El límite superior está dado por el hecho de que las condiciones estacionarias deben prevalecer más o menos por el tiempo que toma una parcela de aire en avanzar a través del área.

Los valores medios horarios son simulados ya que el viento puede ser más o menos constante durante tal periodo. Con velocidades promedio de 2 m/s a 5 m/s, una parcela de aire viajará entre 7km a 18 km en una hora. Esta limitación del modelo Gaussiano debe ser tomada en cuenta cuando se desarrollen simulaciones sobre escalas mayores a los 20 km [32].

En la actualidad la mayoría de las teorías tienden a llegar a la misma función de distribución para la concentración del contaminante y en general, estas ecuaciones de dispersión tomarán el formato de una doble distribución gaussiana (o distribución normal de estadísticas) en dos direcciones y y z. Estos modelos se basan en la difusión de la masa del contaminante en estas direcciones (y,z) según un elemento fluido es arrastrado por el viento; incluyen procesos en estado estacionario y asume que el material proveniente de una fuente, es transportado continuamente en dirección de la velocidad de viento, estando las concentraciones más altas en el centro del

penacho y las más bajas en los extremos (Wark y Warner, 1996). Los desarrollos generados en estos modelos han sido del tipo matemático incluyendo métodos que contribuyen a involucrar una mayor cantidad de fuentes de emisión y al cálculo de la concentración de un contaminante específico en un lugar determinado involucrando el aporte de cada fuente². Cabe mencionar que la mayoría de los modelos de calidad del aire recomendados por la Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos (EPA) son Gaussianos [31].

- **Modelos estadísticos.** Las técnicas estadísticas o empíricas son frecuentemente empleadas, cuando no se dispone de una clara interpretación científica de los procesos físico-químicos o en situaciones en las que no se cuente con una fiable y completa base de datos. Están basados en técnicas estadísticas o semi-empíricas para analizar tendencias, relaciones de la calidad del aire, las mediciones atmosféricas y para predecir la evolución de situaciones de contaminación de corto plazo. Lo anterior se realiza mediante el análisis de distribución de frecuencias, análisis de series de tiempo y otros métodos estadísticos [31].

- **Modelos numéricos-químicos.** Este tipo de modelos son mucho más apropiados que los modelos Gaussianos para análisis de una fuente de área urbana cuando están involucrados contaminantes reactivos que forman contaminantes secundarios; pero requieren unas bases de datos mucho más extensas y complejas, por lo cual su aplicación es restringida [31].

- **Modelos Refinados.** Este tipo de modelos se usa con fines regulatorios principalmente. La entrada de datos debe ser bastante específica e incluye: meteorología detallada (preferentemente micro meteorología de la zona a modelar), características topográficas, ubicación de fuentes y receptores, factores de emisión, concentración de fondo, entre otros datos [31].

- **Modelos de caja.** Este modelo asume que los contaminantes emitidos a la atmósfera se mezclan uniformemente en un volumen o caja de aire de dimensiones finitas. Se deben establecer las dimensiones con viento a favor, viento de costado y verticales de la caja y establecer el periodo de tiempo de emisión de contaminantes. Se considera que los contaminantes son químicamente estables y que permanecen en el aire. Estos modelos son comúnmente utilizados para evaluar la calidad del aire en aeropuertos [31].

1.6.2 Descripción del modelo ISC3

Generalidades

El modelo ISC3 (Industrial Source Complex Model) para fuentes industriales, es un modelo de tipo Gaussiano en estado estacionario, el cual puede ser usado para modelar emisiones y evaluar la concentración de los contaminantes desde una amplia variedad de fuentes que pueden estar presentes en un complejo típico de fuentes industriales. Mediante la aplicación de este modelo se puede analizar lo siguiente: flujos de deposición seca y sedimentación de partículas; caída de flujo aerodinámico debido a la cercanía de edificios; fuentes puntuales, de área, línea y de volumen; ascenso del penacho¹ como una función de la distancia a favor del viento; separación de fuentes puntuales; y ajustes a terrenos limitados. El ISC3 opera en dos modalidades: largo plazo (ISC3-LT, por la sigla en inglés Long Term) y corto plazo (ISC-ST, por la sigla en inglés Short Term). Esta última modalidad es la más factible de utilizar en el presente trabajo pues lo que se desea es realizar análisis en periodos cortos (horas o días) [31].

¹Este término hace relación al volumen de aire que contienen los gases emitidos por una fuente de emisión, en este caso la chimenea industrial.

1.6.3 Descripción del modelo ISCST

La base del modelo es la ecuación de penacho Gaussiana en estado estacionario lineal, la cual es usada con algunas modificaciones para modelar emisiones desde fuentes puntuales simples como chimeneas, emisiones desde chimeneas que experimentan caída de flujo aerodinámico cerca de edificios, conductos de ventilación, pilas de almacenamiento y bandas transportadoras, entre otras.

El ISCST acepta registros de datos meteorológicos horarios para definir las condiciones de ascenso del penacho, transporte, difusión y deposición. El modelo estima el valor de la concentración o deposición para cada combinación fuente y receptor en cada hora de entrada meteorológica y calcula los promedios a corto plazo que el usuario del modelo elija. Para valores de deposición, calcula el flujo de deposición seca, húmeda o total. También se tiene la opción de seleccionar promedios para todo el periodo de entradas meteorológicas.

A continuación se describe, específicamente para fuentes puntuales, la ecuación Gaussiana que está incorporada en el modelo, el perfil de velocidad del viento, las fórmulas propuestas para determinar los parámetros de dispersión y las fórmulas para el ascenso del penacho y las fórmulas usadas para la determinación de los parámetros de dispersión [34, 35].

1.7 Ecuación Gaussiana.

Como se comentó anteriormente, la base del modelo es la ecuación de penacho. En estado estacionario para una fuente continua.

Para cada fuente y cada hora, el origen del sistema de coordenadas está ubicado en la base de la chimenea (superficie del suelo). El eje X es positivo en la dirección a favor del viento, el eje Y es normal al eje X y el eje Z se extiende verticalmente.

Las concentraciones que se calculan en forma horaria para cada fuente en cada receptor se suman para obtener la concentración (las unidades de salida de la concentración son microgramos por metro cúbico y la de deposición gramos por metro cuadrado) total producida en cada receptor por la combinación de las fuentes.

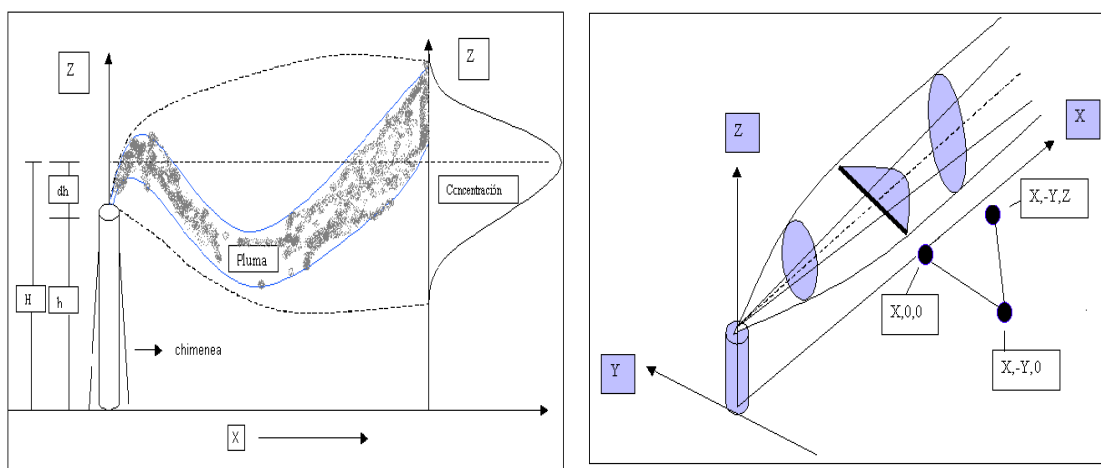


Figura 1 y 2: Sistemas de coordenadas del modelo Gaussiano.

1.8 Selección del sitio de muestreo.

La localización del sitio de toma de muestras que cumpla con los requisitos normados debe tenerse en cuenta desde la etapa de diseño de una planta, ya que estas constituyen fuentes de emisiones contaminantes que deberán estar sujetas a muestreos periódicos. Cuando esto no se prevé requiere luego de identificar sitios de muestreo que pueden requerir construcciones adicionales, o un análisis detallado de las posibilidades de muestrear en algunos puntos del sistema ya construido, esto último con el riesgo de que tales puntos no cumplan con los requisitos necesario para que las variables muestreadas sean representativas, a partir de que la toma de muestras no cumpla con los requisitos normados para el monitoreo.

En Cuba el monitoreo de las emisiones de gases de fuentes fijas puntuales, como las plantas de generación de energía eléctrica con motores de combustión interna a base de Fueloil, es regulado por la norma cubana NC TS 803 del 2010: Calidad del aire. Emisiones máximas admisibles de contaminantes a la atmósfera en fuentes fijas puntuales de instalaciones generadoras de electricidad y vapor. Dicha norma refiere para la selección del sitio de muestreo lo estipulado por la Agencia de Protección ambiental de los Estado Unidos (EPA de sus siglas en inglés Environmental Protection Agency) [41].

Los aspectos que se deben tener en cuenta para seleccionar los puntos de muestreo de las emisiones de gases y para el estudio del impacto sobre la calidad del aire en las Plantas Generadoras de Electricidad con motores a base de fueloil son: la selección del sitio de muestreo, la determinación del número de puntos y su localización.

A continuación se describe brevemente el método referido y el proceder en el estudio antes mencionado.

1.8.1 Metodología para la selección del sitio de muestreo, determinación del número de puntos y su localización.

El propósito de una metodología es proveer de una guía para la localización de sitios de muestreo en los cuales se medirán los contaminantes del aire con el fin de regular sus emisiones. Este método es aplicable a flujos de gases a través de tuberías, conductos y chimeneas, el mismo se diseñó para contribuir a lograr mediciones representativas de las emisiones contaminantes.

La selección de sitio de medición.

El muestreo de los gases se realizará en un punto ubicado a una distancia de: al menos a 8 veces el diámetro de la chimenea antes del punto de liberación de los gases a la atmósfera; o dos veces el diámetro corriente arriba de cualquier perturbación del flujo de gases, tales como, cambios de dirección, reducción o expansión del conducto o desde una llama visible. Si es necesario se puede seleccionar una ubicación alternativa del punto de muestreo, pudiendo seleccionarse un punto ubicado a una distancia de: al menos dos veces el diámetro del conducto corriente abajo del punto de liberación de los gases a la atmósfera o a una distancia de la mitad del diámetro corriente arriba de cualquier perturbación del flujo [41].

Alcance y aplicación del método.

El propósito del método es proveer de una guía para la localización de sitios de muestreo en los cuales se medirán los contaminantes del aire con el fin de regular sus emisiones. Este método es aplicable a flujos de gases a través de tuberías, conductos y chimeneas, el mismo se diseñó para contribuir a lograr mediciones representativas de las emisiones contaminantes [41].



Figura 3: Punto de muestreo en los motores MAN [41].



Figura 4: Punto de muestreo en los motores MAN [41].

1.9. Metodología para la realización del estudio.

La metodología que se presenta tiene como objetivo vincular el consumo de energía y las tecnologías, la contaminación del aire y los impactos sobre la calidad del aire. De esta manera, se implementa un enfoque de evaluación integrado, mediante los modelos de dispersión de contaminantes obteniendo diferentes valores que indiquen el índice de la calidad del aire y la epidemiología. Es importante destacar el esfuerzo para combinar el estado actual en el tema, la tecnología existente y la disponibilidad de datos en el contexto cubano [4].

A continuación se muestra el diagrama correspondiente a la representación metodológica que se utilizará en este estudio.

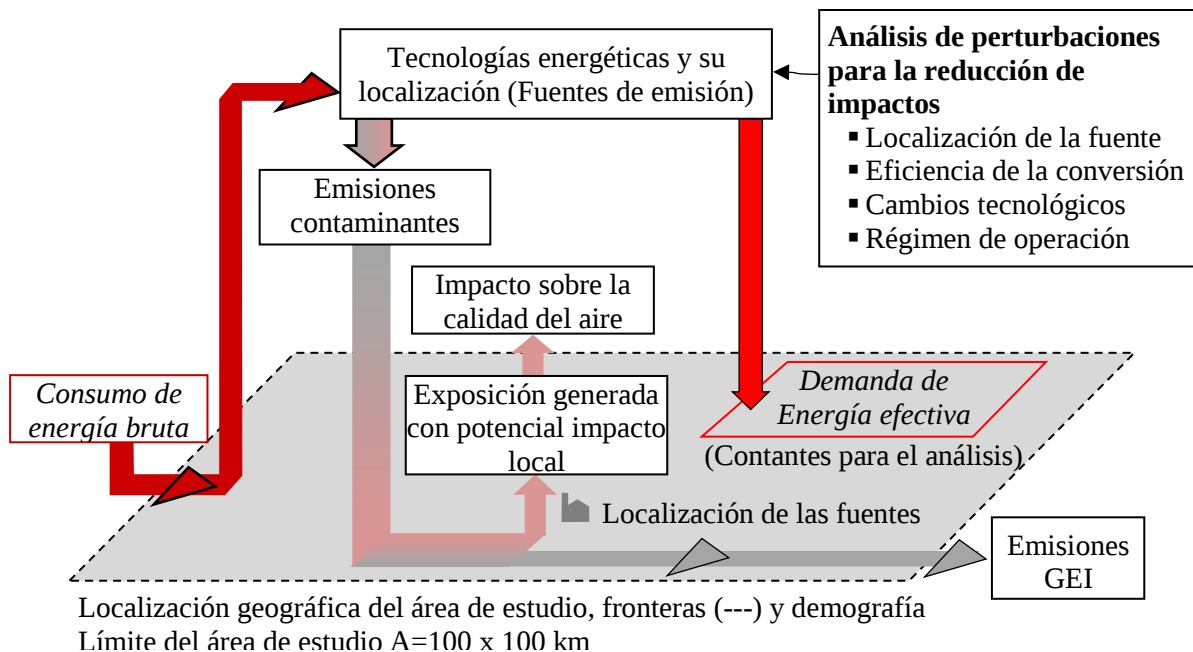


Figura 5: Representación del enfoque para el análisis de escenarios de energía local.

Entre las principales características de la metodología se encuentran:

- La demanda de energía efectiva (DEE), es considerada constante para el análisis de alternativas, lo que tiene como objetivo centrarse en la conversión de energía.
- Como la (DEE) es constante, reducir el consumo de energía bruta (CEB) sólo es posible incrementando la eficiencia de la conversión energética.
- La variabilidad de los parámetros y sus efectos, son estimados a través de la evaluación de los diferentes escenarios inducidos.
- Una vez definidos los parámetros para determinado escenario, el análisis se realiza en estado estacionario, analizando los datos para ventanas de tiempo horarias.
- La frontera geográfica del sistema de análisis para la evaluación del impacto está restringido a 100x100Km, esto se debe a que se hace hincapié en los efectos locales y se ha seleccionado un modelo de pluma gaussiana para modelar la dispersión de los contaminantes.
- Se requiere de la distribución de la población en la zona de estudio con el fin de evaluar el efecto de la ubicación de las fuentes de emisión, así como el impacto que causan, considerando la variabilidad de la exposición causada.
- El análisis basado en los escenarios dan la posibilidad de diagnosticar cualquier escenario.

Los principales pasos para realizar el análisis se muestran en la Figura 6.

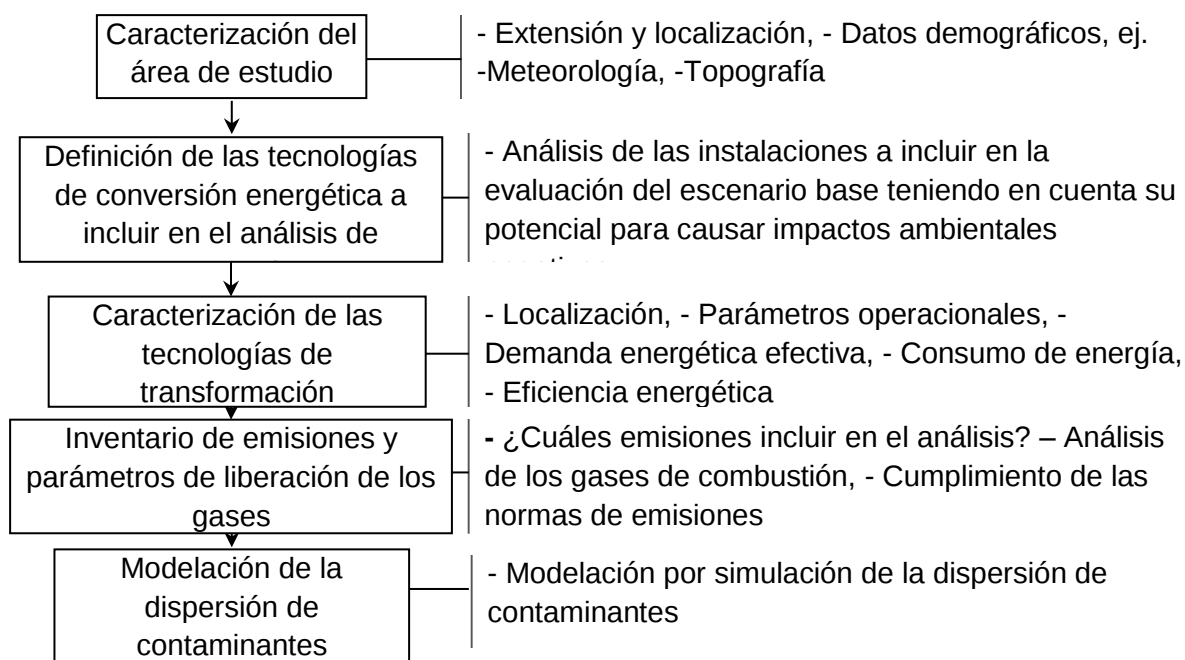


Figura 6: Pasos principales para la valoración integrada del suministro de energía.

Los pasos mencionados anteriormente describen el escenario base y n nuevos escenarios pueden ser inducidos posteriormente introduciendo perturbaciones. De

esta manera, es posible evaluar los impactos debido a cambios o perturbaciones de variables como: La localización de las fuentes de emisión, variaciones en la eficiencia que modifiquen el consumo de energía bruta para cubrir la demanda neta de energía, las tasas y patrones de emisión de contaminantes y su impacto sobre la calidad del aire local así como las variaciones en los niveles de población afectada. El procedimiento para el análisis de escenarios se describe a continuación [4].

1.9.1. Caracterización de las áreas de estudio y sus límites

Para la caracterización del área de estudio tenemos que tomar como punto de partida, la ubicación, la demografía, la meteorología y la topografía. La meteorología es un factor determinante en la dispersión de gases contaminantes. Los principales datos demográficos necesarios son: la población en el área de estudio, la distribución espacial de la población (una resolución recomendable es la población por 100x100m), y la mortalidad total en la muerte al año por cada mil habitantes. La topografía, puede afectar significativamente el patrón de dispersión de la pluma de descarga, por eso los modelos para el análisis de la dispersión de contaminantes incluyen algoritmos para dar cuenta de los efectos del terreno [4].

Las fronteras deben ser designadas para captar los impactos de la mejor forma posible. Para el presente trabajo se seleccionó un año como resolución temporal típica aunque se puede extender dependiendo de la disponibilidad de datos. Las fronteras geográficas se evalúan dependiendo de la extensión y localización del área implicada, donde los efectos de la contaminación se asocian a la transformación energética por ciclos de combustión.

En términos de fronteras del escenario el análisis es algo diferente al Análisis de Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés), en el LCA todos los componentes del sistema dado se analizan “de la cuna a la tumba” pero no se considera la infraestructura. La emisión de gases y su impacto se siguen, desde el tanque de combustible a la cámara de combustión como receptor final, como el objetivo principal de este trabajo. De esta forma el análisis presentado es más preciso que el LCA, haciendo énfasis en la cuantificación de los impactos y el análisis de las opciones de mitigación debido a que las personas cuidan más los impactos y las posibles opciones para reducirlos que las propias emisiones. Los límites espaciales dependen de la extensión del área afectada y del modelo seleccionado para la dispersión de contaminantes. Como esta metodología es concebida para la valoración de escenarios locales el modelo seleccionado es el modelo de Pluma Gaussiana, el área de estudio para modelar está concentrada en 100x100 km [4].

La meteorología es un factor determinante en la dispersión de gases contaminantes. Las concentraciones de contaminantes en la superficie son controladas primordialmente por dos elementos meteorológicos. La dirección y la velocidad del viento. Tales datos pueden ser provistos por los Centros Meteorológicos como ficheros de datos meteorológicos de cada hora para un año o períodos más cortos. Estos archivos incluyen: la dirección y velocidad del viento, la temperatura del ambiente, la clase de estabilidad y la altura de la mezcla [4].

1.9.2 Definición de las instalaciones energéticas

La definición de las instalaciones de energía para ser incluido en el análisis de escenarios depende del ámbito de aplicación definido. El alcance máximo es el que incluye todas las instalaciones de energía (fuentes de emisión) en el dominio del

estudio, pero esto no es siempre necesario. A menudo se requiere para analizar sólo el escenario generado por un sector específico (por ejemplo, el sector de generación de energía), una instalación específica (por ejemplo, una nueva instalación) o un grupo de ellos como en el caso de estudio que se presenta, o el análisis incluido en la prioridad de las instalaciones con el mayor potencial de causar impactos negativos. Algunos criterios pueden dar una idea previa de las instalaciones con el mayor potencial para causar impactos negativos, por ejemplo: La ubicación (instalaciones situadas cerca de zonas densamente pobladas podrían causar un alto impacto). El consumo de energía en bruto (con un alto consumo de combustible implica mayores emisiones de gases a la atmósfera). El consumo de Combustible (combustibles de baja calidad, como el carbón y el fueloil, generan gases más contaminantes y por tanto un alto impacto) [4].

Auditoría energética

La auditoría energética constituye un paso de importancia significativa para evaluar la eficiencia de la transformación energética. Ésta constituye la herramienta base para identificar las principales pérdidas energéticas, y consecuentemente los principales potenciales de ahorro energético y económico. El mejoramiento de la eficiencia energética puede ser el aspecto más apropiado de realizar en un corto tiempo. A escala global, el mejoramiento de la eficiencia energética es la vía más satisfactoria para adaptar la civilización a la reducción de las fuentes energéticas y minimizar el daño al medioambiente [4].

En este análisis del sistema de auditoría energética se debe incluir el análisis de los gases de combustión. Este es el factor clave para determinar las condiciones de combustión, la eficiencia y las pérdidas. El análisis de los gases hace posible determinar la eficiencia por método directo, el cual involucra el cálculo de todas las pérdidas específicas, se basa en balances de masa y energía; es un método apropiado para identificar las posibles causas de las pérdidas en calderas de vapor. El análisis de los gases de combustión incluye la determinación de las siguientes variables: Composición de los gases de salida (SO_2 , NO_2 , NO , CO , CO_2 , O_2), temperatura de los gases a la salida de la chimenea y el coeficiente de exceso de aire. Para determinar el flujo y la velocidad de los gases de salida así como la tasa de emisiones contaminantes se puede determinar mediante mediciones o la modelación de la reacción de combustión y realizando balances de masa y energía, por esta vía se ha desarrollado una herramienta para modelar el proceso de combustión basado en los parámetros medidos por análisis de los gases, las propiedades y la tasa de consumo del combustible [4].

La auditoría energética y el inventario de emisiones se realizan en paralelo.

Conclusiones parciales

Es importante tener en cuenta que a pesar del desarrollo alcanzado por la humanidad se continúa cometiendo grandes errores que traen consecuencias nefastas para la atmósfera y para el propio hombre. En la actualidad se emiten al ambiente millones de toneladas de elementos químicos tanto desde países desarrollados como principales exponentes hasta países cuyo nivel de desarrollo no es de primera línea. Esto ocurre sobre todo con las transformaciones energéticas a base de ciclos de combustión debido a que durante ese proceso son expulsados a la atmósfera sustancias como: CO, NO_x, SO_x entre otras, las cuales pueden causar enfermedades crónicas. Debido a que en Cuba en los últimos diez años se ha estado utilizando la generación distribuida se han realizado grandes esfuerzos por disminuir las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera para ello han sido implementadas diferentes medidas como la implementación de un sistema de calidad del ambiental y del aire donde incorpora varias instituciones del país.

Las emisiones de gases contaminantes se pueden monitorear mediante analizadores automáticos, métodos pasivos y métodos activos; en dependencia de las particularidades del caso en estudio.

Capítulo 2.

Capítulo 2. Caracterización y análisis general del impacto de la Central Eléctrica Cayo Santa María.

Introducción

La creación de la UEB Cayo Santa María subordinada a la Unión Nacional Eléctrica surge como una fuerte alternativa económica ya que el país se encontraba pasando por una situación económica crítica. Ante esta coyuntura el Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz, lanza una estrategia de desarrollo turístico para aprovechar la belleza de nuestras playas, valores naturales y paisajes, la tradicional hospitalidad del pueblo cubano así como la seguridad y confianza que como destino turístico podía ofrecerse. Como parte de esta estrategia es creado el pedraplén más largo del país, para comenzar a desarrollar el turismo en la cayería norte de Villa Clara. El polo turístico que comenzaba a desarrollarse pretendía construir instalaciones para estos fines en Cayo Las Brujas, Ensenachos y Santa María. La creación de la planta eléctrica está avalada por la Resolución 242 del 23 de julio del 2001 dictada por el Director General de la Empresa Eléctrica de Villa Clara en funciones en dicha fecha Ing. Silvio Dorta Herrera. Queda oficialmente inaugurada el 24 de octubre del 2001, encontrándose en Perfeccionamiento Empresarial desde esa fecha según el Acuerdo 3867 del Comité Ejecutivo del Consejo de Ministros [36].

Su constante crecimiento va encaminado a la necesidad de satisfacer las necesidades de generación eléctrica para el sector turístico, de forma tal que permita establecer en este lugar una mayor cantidad de instalaciones hoteleras que permitan mayores ingresos al país.

2.1. Localización de la Entidad.

El cayo Santa María cuenta con 13 km², ubicado en la costa norte de Villa Clara en el archipiélago Jardines del Rey. En este, se encuentra localizada la planta eléctrica, que permite llevar la electricidad hasta los todos hoteles. Esta se encuentra en el límite suroeste de dicho cayo, el cual constituye una de las unidades insulares del noreste de Villa Clara perteneciente al sub-archipiélago Sabana Camagüey, colindando por el este con la (UEB) de atención al hombre perteneciente a la empresa constructora de obras para el turismo (ECOT); por el norte y oeste con bosque siempre verde micrófilo y por el sur con el bosque de mangle. En la figura 2 puede precisarse la ubicación de la planta.

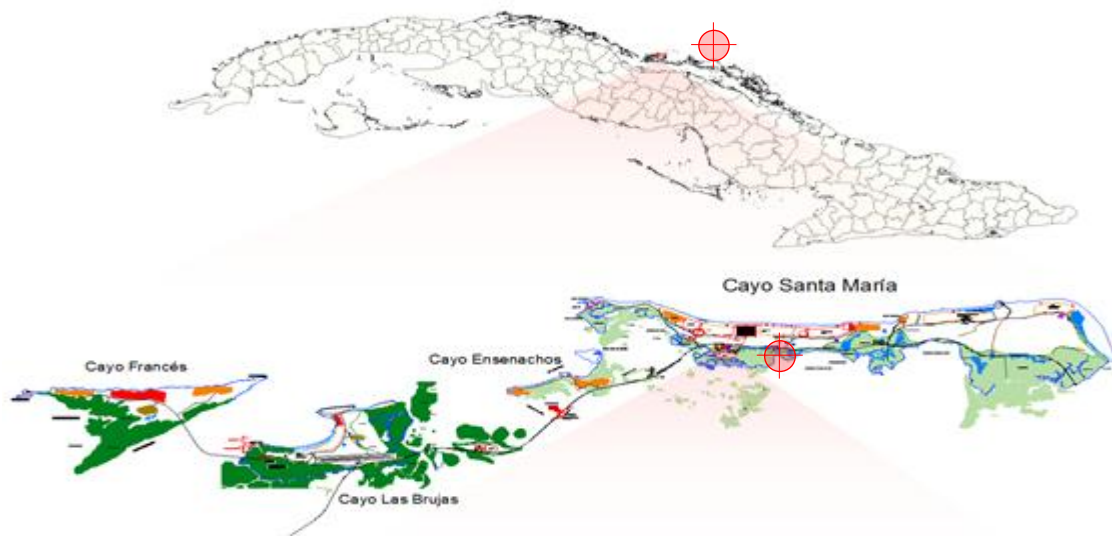


Figura 6: Localización de la central eléctrica y las unidades de generación de electricidad [38].

2.2. Caracterización real del área de estudio.

La zona de la cayería norte de la provincia de Villa Clara, lugar donde será efectuado el análisis presenta un área de 80km², con una capacidad en habitaciones de 10000 entre todos los hoteles. La población es inestable ya que depende de la entrada de turistas a. Teniendo en cuenta que el índice de calidad del aire para la provincia de Villa Clara es deficiente, se hace necesario determinar de afectación de las emisiones de sustancias contaminantes producidas por la planta eléctrica. Para realizar este trabajo es importante incorporar también información acerca de los vientos y de la topografía.

2.2.1. Condiciones climáticas

La zona en estudio tiene un clima tropical, estacionalmente húmedo con influencia marítima debido a su ubicación geográfica. Hay dos períodos climáticos, el período húmedo (caliente) de mayo para el período de octubre y seco (el frío) de noviembre hasta abril. La influencia de la masa de aire subtropical con un constante régimen de temperatura de aire, ondas tropicales y tormentas locales es típica durante el verano. Los procesos extra-tropicales como frentes fríos y las masas de aire continentales son predominantes en el invierno. La temperatura anualmente promedia es 27 °C, mientras que la temperatura promedio mensualmente se maximiza en el período húmedo en julio en alrededor de 26.4 °C y su alcance mínimo de 21 °C en enero. El valor mínimo de temperatura diaria se graba en enero (17°C) mientras que el máximo valor en Agosto alcanza hasta los 33 °C. La insolación más alta está en el abril y la nubosidad mínima está en febrero. La humedad relativa es alta con un máximo de 97 % en octubre y un mínimo de 46 % en abril. Su valor promedio anual es 85 %. El filo del viento predominante es del este. La velocidad promedia del viento se trata de 2.85 m/s en el período húmedo y 3.88 m/s en el período seco. La precipitación es el parámetro de más variación; La lluvia más alta es 231 mm en junio y lo más bajo es 31 mm en diciembre por término medio. Los datos se expuestos anteriormente corresponden a información histórica registrada. Para el período en que se realiza este estudio se muestra en la Figura 7 el diagrama de los vientos reinantes y su velocidad.

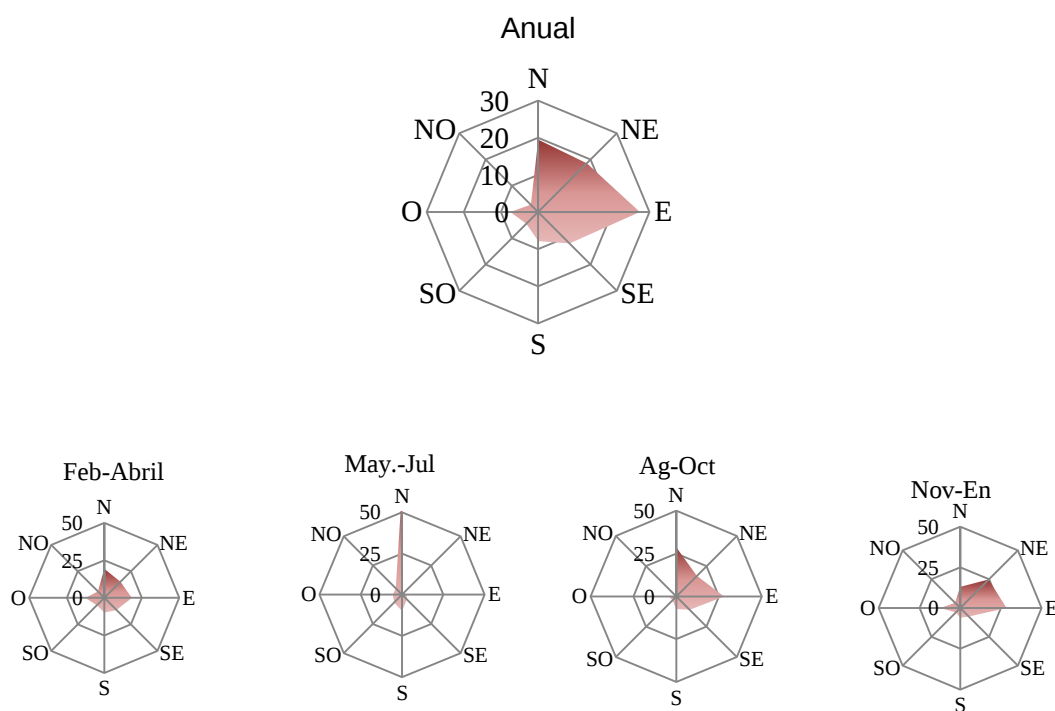


Figura 7: Rosa de los vientos. Anual y resumen trimestral. (2013).

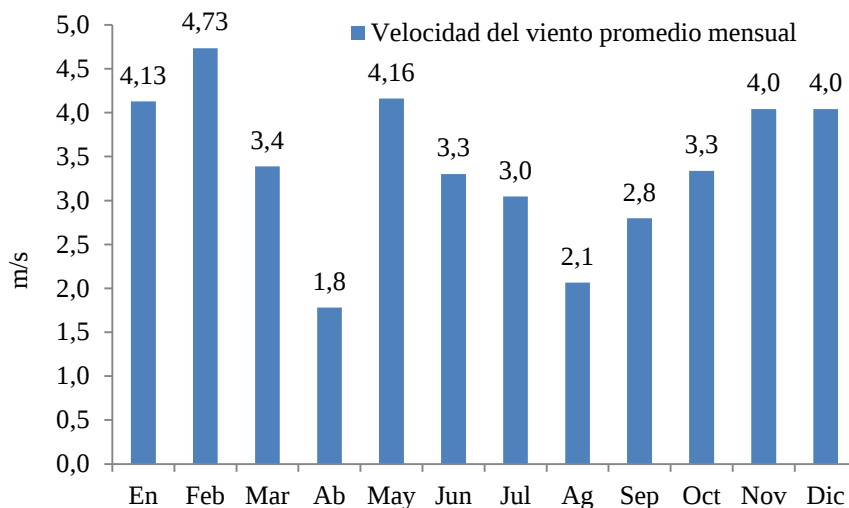


Figura 8: Velocidad de los vientos promedios para el año 2013 en m/s.

2.3. Capacidad instalada en la planta.

La UEB comenzó con una sala de máquinas de generación eléctrica que contaba con tres máquinas de fabricación canadiense marca CUMMINS; de las cuales una con 1400 kVA y dos con 681 kVA de potencia, obteniendo una capacidad instalada de 2762 kVA, suficiente para responder a la demanda de 200 kW solicitada por el único cliente existente en los inicios, el Hotel Meliá Cayo Santa María.

En el año 2003, dado el crecimiento de la cantidad de clientes, se hace necesario el incremento de dos nuevas máquinas CUMMINS, de 1400 kVA cada una. A raíz de la Revolución Energética y de la construcción de emplazamientos a lo largo de todo el país es que se decide colocar en la UEB cinco máquinas Motores (MTU) de nacionalidad alemana, las cuales suplirán la generación de las CUMMINS que debido al tiempo de explotación así como al aumento de la demanda, ya resultaban insuficientes y se requería aportarle al sistema una mayor confiabilidad, resultando ser la UEB Cayo Santa María un centro aislado dentro de la generación distribuida en Villa Clara.

Debido al alto costo del diesel en el mercado mundial, y el desarrollo aún más acelerado del polo turístico, en el año 2008 se ejecuta una inversión con la instalación de dos máquinas Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg AG, tecnología más eficiente que utiliza como combustible el Fueloil, más económico que la generación con diesel. En la actualidad se cuenta con una capacidad instalada de 20,3 MW, para atender una demanda de 13 MW como promedio [36].

Tabla 5: Capacidad de generación desde la creación de la planta [36].

Año	Inversión	Capacidad instalada (MW)	Capacidad Disponible (MW)	Máxima demanda (MW)
2001	3 Maquinas "CUMMINGS"	2.762	2.072	0.20
2003	2 Maquinas "CUMMINGS"	5.562	4.172	2.80
2005	2 MTU	9.338	7.0	3.10
2006	1 MTU	11.226	8.42	4.23
2007	2 MTU	15.02	11.25	5.30
2008	2 grupos MAN	17.180	13.4	5.76
2010	2 MTU	20.916	16.2	8.58
2013	1 MTU	22.804	17.6	13.56
2013	4 Hyundai	29.604	22.615	13.56

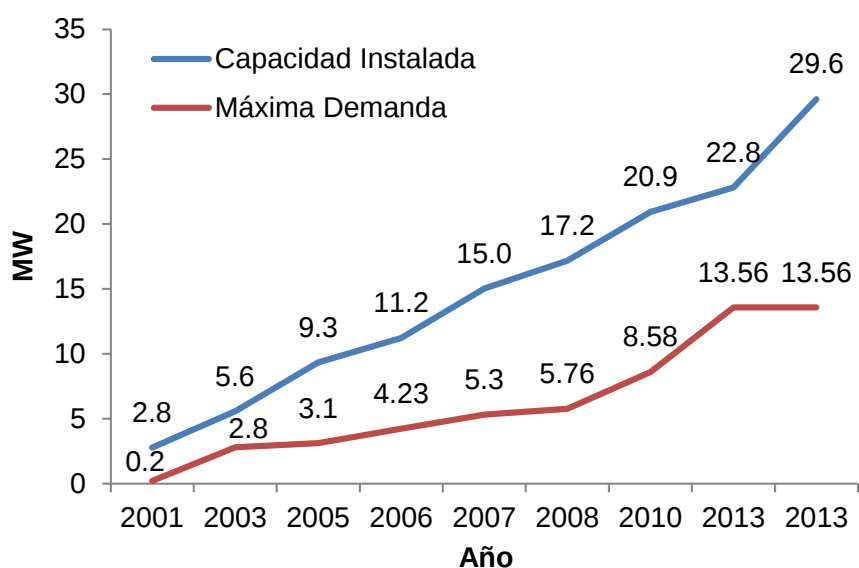


Figura 9: Crecimiento histórico de la demanda y la capacidad instalada.

Puede notarse en la figura 9 el progresivo y rápido crecimiento de la demanda de potencia y en respuesta a ello el crecimiento de la capacidad instalada.

2.4 Tecnología instalada en la Planta. (Fueloil).

Los grupos electrógenos tanto de diesel como los que consumen fueloil son equipos formados por un motor primario de combustión interna y un generador sincrónico de corriente alterna acoplado mecánicamente para producir energía eléctrica. Estos dispositivos pueden estar sincronizados al sistema electro-energético nacional (SEN) para solucionar los déficit de potencia y contingencias, aislados (pertenecientes a la Unión Eléctrica Nacional (UNE)) para suministrar energía eléctrica en lugares donde no llegue la Red Eléctrica Nacional o de emergencia, ubicados en una entidad para operar en caso de fallo, desconexión o insuficiencias del fluido eléctrico proveniente de la red nacional. Para el caso de este estudio los grupos electrógenos son utilizados como fuentes de abastecimiento de energía eléctrica a toda la cayería norte del municipio Caibarién debido que esta zona es un polo turístico al cuál no ha podido llegar la red nacional.

Descripción de los motores MAN y Hyundai.

La tecnología fueloil MAN y Hyundai representan el 50% de la capacidad instalada en la planta.

En las tablas de la 7 a la 15 se muestran los principales parámetros para ambas tecnologías entre las que se encuentran: las revoluciones a las que trabaja el eje, así como la potencia por cada cilindro entre otras. También se muestran las características de aspectos como el sistema de enfriamiento y los parámetros que tienen en cuenta la salida de los gases de combustión, aspecto en el cual está centrada la realización de este trabajo.

Tabla 6: Parámetro principales de las unidades de generación MAN de 3.85 MW [38].

Equipo	Parámetros	Valor nominal
Motor modelo:18V28/32 S	Tipo de Motor	18V28/32 S
	Rango de velocidad	720 rpm – 750 rpm
	Potencia por cilindro	225 KW
	Diámetro interior	280 mm
	Carrera del pistón	320 mm
	Área del pistón por cilindro	616 cm ²
	Velocidad media del pistón	7.7 m/s
	Radio de compresión	13.9
	Peso del motor seco	70.8 ton
	Longitud del motor	6626 mm
Generador	Tipo	AMG 0900SK 10 DSE
	Voltaje	13800 V
	Corriente	204 A
	Frecuencia	60 Hz

Tabla 7: Parámetros requeridos para el agua de enfriamiento para motor MAN. [38].

Parámetros	Valores
pH	7- 10
Cloruro	Máximo 50 ppm (mg/l)
Sulfato	Máximo 100 ppm (mg/l)
Silicato	Máximo 150 ppm (mg/l)
Residuos que alteran la evaporación	Máximo 400 ppm (mg/l)

Tabla 8: Parámetros nominales de operación del motor MAN [38].

Sistema	Descripción	Rango normal de operación	Valor de alarma
Control de velocidad	Velocidad del motor	Velocidad (rpm)	710
		720-750	
Sistema de fueloil	Presión de fueloil a la entrada del motor, operación continua HFO	2.0 a 3.0 bar	1.5
	Presión de fueloil a la salida del motor (operación continua HFO).	7.0 a 8.0 bar	$P_{MDO} < 6.0$
Sistema de aceite lubricante	Caída de presión en el filtro.	0.5 a 1.0 bar	1.5
	Presión de aceite lubricante entrada al motor después del filtro.	4.0 – 5.0 bar	3.5
	Temperatura del aceite lubricante entrada al motor.	50 a 72°C	80
	Presión aceite lubricante entrada al turbo compresor	1.5 ± 2.0 bar	0.9
	Temperatura a la salida del motor.	65 - 82°C	100
	Nivel de pre-lubricación.	0.12 a 0.3 bar.	0.12
Sistema de H ₂ O de enfriamiento	Presión a la entrada del motor del H ₂ O a baja temperatura	1~2.5 bar	+0.4
	Temp. de entrada al motor del H ₂ O	30~40 °C	>45
	Temperatura de salida del motor del H ₂ O	75~85°C	>90

Tabla 9: Parámetros nominales para el sistema de gases de escape motor MAN [38].

Sistema	Descripción	Rango normal de operación	Valor de alarma
Gas de escape y aire de carga	Temperatura del aire de carga después del enfriador.	55~ 75 °C	
	Temperatura de los gases de escape del cilindro	300 a 400°C	470°C
	Temperatura de gases de escape a la entrada del turbo compresor	425 ~ 475°C	>570°C
	Temperatura de gases de escape a la salida del turbo compresor	275~350°C	450°C
Sistema de aire comprimido	Presión de entrada al motor.	8~10 bar	8.5 bar

Los parámetros de operación de los motores son estrictamente observados y mantenidos en los rangos de operación que da el fabricante. Esto ha incidido en la alta disponibilidad que presenta esta tecnología.

Descripción de los motores Hyundai

La tecnología Hyundai que se ha instalado en la planta es de segunda mano, por lo que la observación de los parámetros de funcionamiento deberá ser más estricta. No obstante en la planta se pudo constatar una alta disciplina tecnológica.

En las tablas 10 y 11 se dan los principales parámetros de la tecnología Hyundai.

Tabla 10: Principales características de las unidades de generación Hyundai de 1.7 MW [38].

Equipo	Características	Especificaciones
Himsen Hyundai	Tipo de Motor	Himsen Hyundai /9H21
	Diámetro interior	210 mm
	Carrera del pistón	320 m/s
	Diámetro del pistón por cilindro	210 mm
	Velocidad media del pistón	9.6 m/s
	Peso total del motor	50 ton
	Longitudes del motor	2.4x3.4x12 m
	Consumo de combustible	187-193 g/kWh
	Potencia.	1710 kW
	Tiempo de mantenimiento	12000 h
	Frecuencia	60 Hz

Tabla 11: Parámetros principales del motor Hyundai /9H21 [38].

Motor Himsen Hyundai	
Potencia activa por cilindro	50-100KW
Velocidad. Turbo.	<4092
Velocidad. Motor.	891-909rpm
Combustible.	
Presión.	7.0 – 10 bar
Temperatura.	110 - 149°C
Aceite lubricación	
Nivel de aceite en el cárter	50 – 75%
Temperatura.	60 - 73°C
Presión de aceite a la entrada del motor.	4 – 5 bar
Presión a la entrada del filtro.	5.0 – 6.0 bar
Temperatura del aire.	
Temperatura del aire dentro del contenedor	30 - 45°C
Temperatura del aire de carga	35 - 55°C
Presión de sistemas de aire.	
Presión de aire de carga.	1.0 – 3.2 bar
Presión de arranque.	20 – 30 bar
Presión de aire en las válvulas de emergencia.	7.0 – 8.0 bar.
Presión de aire en las válvulas de cambio de combustible.	7.0 – 8.0 bar.
Sistema de agua de enfriamiento.	
Presión de agua a la entrada del radiador.	0.7 - 0.9 bar
Presión de agua a baja temperatura..	0.1 – 0.3 bar
Presión de agua a alta temperatura.	2.5 – 4.5 bar
Temperatura de agua a la entrada al enfriador del aire de carga.	30 - 40 °C
Temperatura de agua al la entrada del enfriador de aceite.	40 - 50°C
Temperatura del agua a la entrada de la camisa.	75 - 78°C
Temperatura del agua a la salida de la camisa.	77 - 87°C
Temperatura del sistema de gases	
Temperatura de los cilindros.	250 - 390°C
Temperatura a la entrada del turbo.	450 - 520°C
Temperatura a la salida del turbo.	250 - 380°C
Presión.	
Presión de aceite del sistema de enfriamiento	3- 5bar

2.5 Principales Consumos.

El consumo de fueloil en la planta eléctrica Cayo Santa María constituye una de las tareas de primer orden debido a que ese aspecto está directamente relacionado con el aspecto económico del país. El consumo máximo de fueloil correspondió al mes de diciembre con un total de 1195 toneladas. En el año se consumió un promedio de 820 toneladas de fueloil. Teniendo en cuenta que los motores de tecnología fueloil consumen combustible Diesel para realizar el arranque y precalentar el fuel pesado, fueron señalados también los consumos mensuales de este tipo de combustible. A continuación se muestra tanto el consumo de combustible fueloil como diesel en toneladas durante el año 2013. Encontrándose con un mayor consumo el mes de junio con 118 toneladas de Diesel.

Consumo de combustible Fueloil en el año 2013.

Tabla 12: Consumo de combustible fueloil mensual en el 2013 en toneladas. [39].

Mes	Consumo Fueloil. (Ton)
Enero	801
Febrero	759
Marzo	492
Abril	570
Mayo	632
Junio	670
Julio	1072
Agosto	1055
Septiembre	922
Octubre	899
Noviembre	779
Diciembre	1195
Total	9846

Consumo de Diesel en la tecnología MAN para el año 2013.

Tabla 13: Consumo de Diesel en la tecnología MAN. [39].

Meses.	Consumo de Diesel en los motores MAN.(Ton)
Enero	88.9
Febrero	74.7
Marzo	56.0
Abril	22.3
Mayo	53.3
Junio	118.3
Julio	32.8
Agosto	15.3
Septiembre	23.7
Octubre	33.6
Noviembre	257.5
Diciembre	87.4
Total	863

2.6 Generación bruta y generación neta promedio para cada tecnología.

La generación bruta de energía eléctrica está referida a la generación de energía eléctrica, incluyendo el insumo, de todas las plantas eléctricas de servicio público o de instalaciones generadoras de otros productores, mientras que la energía neta es la parte utilizable de la energía. La máxima generación ocurrió en el mes de enero con un total en megas de 1959,54 MWh debido a que en este mes la demanda energética aumenta considerablemente con el alojamiento de clientes. En caso de la tecnología Hyundai el máximo valor fue generado en el mes de octubre con 855.07 MWh. En la siguiente tabla se muestra el comportamiento de cada motor en cuanto a la cantidad de energía bruta generada durante el año 2013.

Generación bruta para la tecnología MAN y Hyundai para el año 2013

Tabla 14: Generación bruta de energía por motor [40].

Meses	MAN 1 (MWh)	MAN 2 (MWh)	Hyundai 1 (MWh)	Hyundai 2 (MWh)	Hyundai 3 (MWh)	Hyundai 4 (MWh)
Enero	1959,54	1873,40	0	0	0	0
Febrero	1804,00	1813,00	0	0	0	0
Marzo	592,59	1780,74	0	0	0	0
Abril	858,33	1690,54	1,67	8,89	8,92	2,10
Mayo	1137,47	1751,14	0	1,58	1,28	1,17
Junio	1553,85	1163,84	182,70	188,59	198,38	102,44
Julio	1582,50	524,58	929,63	778,20	800,26	263,13
Agosto	1446,78	582,67	711,77	686,60	722,54	547,31
Septiembre	1502,34	0	723,6	560,07	702,18	660,53
Octubre	1525,86	288,44	698,95	276,82	361,80	855,07
Noviembre	1071,97	1183,49	651,35	558,54	760,87	375,83
Diciembre	1475,84	1305,49	661,20	607,14	687,12	606,18

Generación neta para la tecnología MAN y Hyundai.

La energía neta de un equipo determinado es aquella que puede ser utilizada esta es obtenida teniendo en cuenta la energía bruta generada y el insumo. Durante el año 2013 se observa que la mayor generación de energía para los motores MAN correspondió al mes de enero con 3708.92 MW, lo cual está asociado con la entrada de extranjeros a los hoteles durante la temporada alta. Mientras que la menor generación fue realizada en el mes de septiembre con 1430.73 MW. Es importante mencionar que los motores Hyundai comenzaron a generar a partir del mes de abril siendo este mes el de menor representación en la generación de esta tecnología. El valor máximo de generación para estos motores ocurrió en el mes de julio con 2666.15 MW de potencia.

Tabla 15: Generación neta de energía para la tecnología MAN y Hyundai en MWh para el año 2013 [40].

Meses.	MAN. (MWh)	Hyundai. (MWh)
Enero.	3708.92	0
Febrero.	3502.24	0
Marzo.	2282.53	0
Abril.	2452.87	20.48
Mayo.	2787.05	37.60
Junio.	2621.00	554.67
Julio.	2016.5	2666.15
Agosto.	1940.76	2570.50
Septiembre.	1430.73	2537.72
Octubre.	1729.25	2095.84
Noviembre.	2617.63	2247.26
Diciembre.	2672.48	2456.03

Conclusiones Parciales

El progreso en las construcciones de los diferentes hoteles ha incrementado considerablemente la demanda la cual alcanzó 13.56 MW en el año 2013, por lo que fue necesario aumentar el número de motores de mayor capacidad. La planta eléctrica Cayo Santa María generó 29762 MWh con motores MAN y 15186 MWh con motores Hyundai durante el año 2013 para un consumo total de combustible fueloil de 9846 toneladas y 863,8 toneladas de diesel. En cuanto a las condiciones climáticas, la mayor incidencia de los vientos ocurre desde el este, noreste y del norte, alcanzando valores de 2.85 m/s en los meses desde mayo hasta octubre y 3.88m/s desde de noviembre hasta abril. Los valores de máxima precipitación llegan hasta 231 mm y los mínimos registrados hasta 31 mm.

Capítulo 3

Capítulo 3. Impactos sobre la calidad del aire.

Introducción

En este capítulo se pretende realizar el análisis de las emisiones de gases contaminantes que presenta la planta eléctrica Cayo Santa María en la tecnología a base de combustible fueloil. Es importante tener en cuenta los principales regímenes de trabajo a los que opera esta tecnología ya que permitirá establecer la carga más representativa en la que se efectuará la medición, el comportamiento de la demanda durante el año 2013 entre otras. Se realizará además la simulación del comportamiento de los gases contaminantes, para lo cual se tendrán en cuenta aspectos meteorológicos como la velocidad y dirección del viento, el diámetro y altura de las chimeneas, así como también aspectos como la composición del combustible, las propiedades de la mezcla, las tasas de emisiones etc.

3.1. Variabilidad de la carga.

Para analizar el régimen de carga de la planta es necesario conocer la variación la variación horaria de la demanda de energía, la cual alcanzó los 13.44 MW en el año 2013 y un promedio de 7.3MW. La planta cuenta con dos motores (MAN) de 3, 85 MW de potencia y cuatro motores (Hyundai) de 1.7 MW de tecnología fueloil. Ver figura 10.

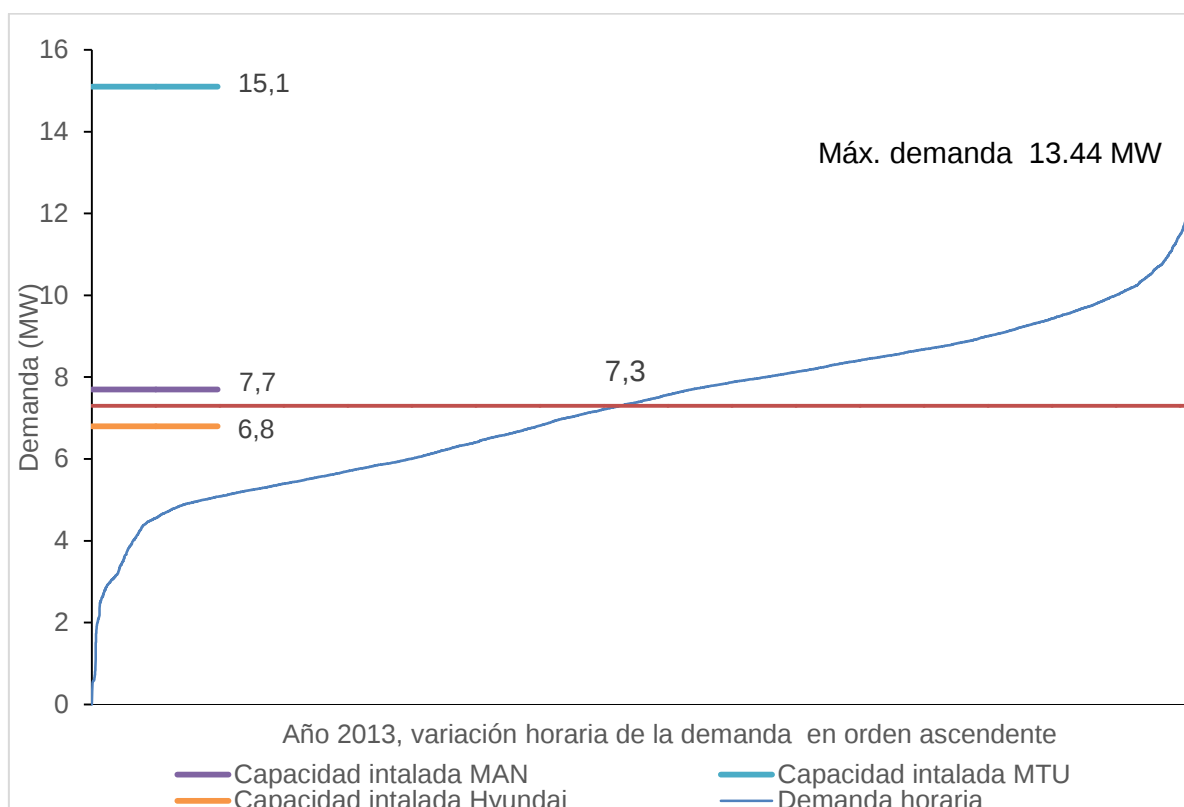


Figura 10: Variación horaria de la demanda en orden ascendente para el año 2013.

Los motores operan teniendo en cuenta la demanda existente en ese tiempo, pero de las tres tecnologías instaladas, la que primero responde a la demanda es la MAN, por lo que representa la mayor parte de la generación, es importante señalar que nunca se encuentran trabajando al máximo de potencia, cuando la demanda se encuentra cerca de los siete megas, o sobrepasa la capacidad, se conecta inmediatamente un motor de tecnología Hyundai a una carga fija del 75%, para que cubra esta demanda mientras que los motores MAN se regulan hasta el punto donde la demanda sea cubierta. La entrada de la tecnología Hyundai a esta capacidad de carga está relacionada con el índice de consumo. A continuación se muestra un gráfico que muestra el por ciento de la generación que cubre cada tecnología, incluyendo los motores MTU, así como la generación que representan, siendo los motores MAN los de mayor cubrimiento con un 46% generando 29462 MWh de energía y el menor para los motores Hyundai por su posterior incorporación a la generación en la planta.

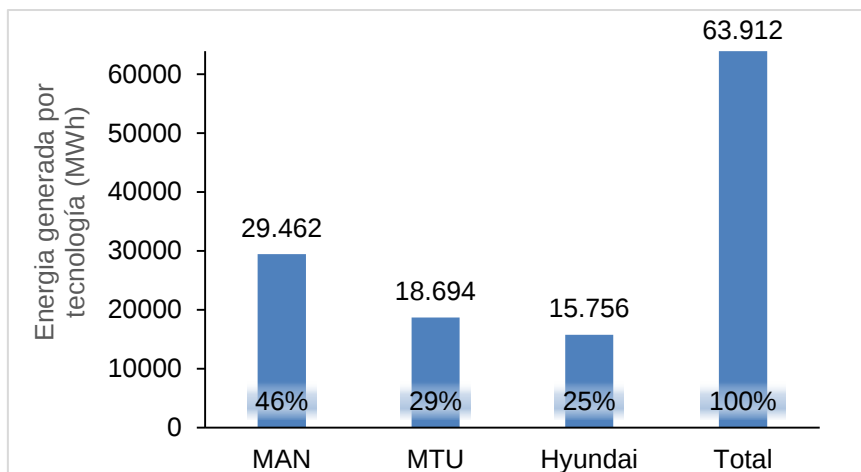


Figura 11: Representación del cubrimiento de la demanda por tecnologías y su generación.

Para demostrar la situación del cubrimiento de la demanda en la planta eléctrica Cayo Santa María se puede observar los gráficos en el anexo 1

3.2 Índice de consumo de la central eléctrica en el 2013.

El índice de consumo al igual que el tiempo de interrupción al cliente, constituyen índices de calidad en la central eléctrica Cayo Santa María, pero a pesar de esto no cuentan con el equipamiento necesario para realizar esta actividad. El sistema de medición de este indicador se realiza por la diferencia de nivel existente en el tanque y la generación diaria de electricidad. En la tabla 16 se muestra la variación del índice de consumo de combustible fueloil, en el mismo se observa variación para cada uno de los meses del año 2013, se puede observar que la media se encuentra entre los valores establecidos para el índice de consumo diario de combustible teniendo un valor promedio de 229 g/kWh mientras que los meses de mayor consumo fueron diciembre y octubre con 240 y 237g/kWh respectivamente. Es necesario señalar que existe un solo tanque de uso de fueloil donde se alimentan las dos tecnologías por lo que no se puede establecer índices de consumos para cada tecnología por separado.

Tabla 16: Consumo específico de combustible fueloil para el año 2013 en g/kWh [40].

Consumo específico de combustible fueloil en g/kWh (2013).	
Enero	233
Febrero	220
Marzo	222
Abril	228
Mayo	237
Junio	232
Julio	226
Agosto	227
Septiembre	228
Octubre	231
Noviembre	225
Diciembre	240
Promedio	229

Consumo específico mensual de Fueloil (2013).

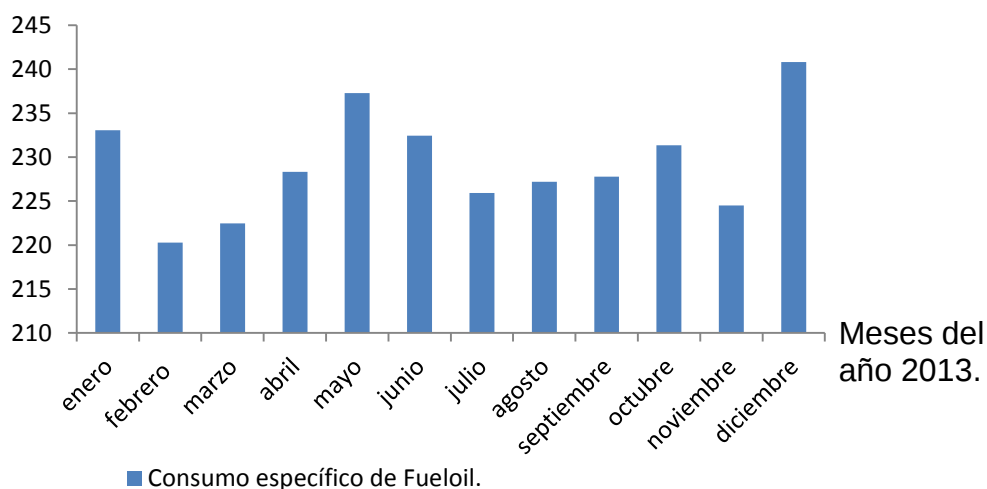


Figura 12: Consumo específico de combustible fueloil para el año 2013.

3.3. Regímenes de carga por unidades de generación para la tecnología Fueloil en el 2013.

En este epígrafe serán analizados los regímenes de carga a los cuales se encuentran sometidos los motores MAN y Hyundai de la planta eléctrica Cayo Santa María. Se muestra además la cantidad de horas que estuvieron generando cada uno de los motores. El motor que mayor cantidad de horas estuvo operando fue el MAN 1 con un total de 7110 horas al año y posteriormente el MAN 2 con un total de 5758 horas. En el mes de septiembre este motor se encontraba de mantenimiento por lo que no generó. Los motores Hyundai trabajaron alrededor del 50% de las horas anuales por su introducción a la generación en el mes de abril.

Tabla 17: Cantidad de horas de trabajo de los motores [40].

Horas de trabajo de los motores						
Meses	Motores					
	MAN 1	MAN 2	Hyundai 1	Hyundai 2	Hyundai 3	Hyundai 4
Enero	737	707	0	0	0	0
Febrero	672	671	0	0	0	0
Marzo	218	694	0	0	0	0
Abril	351	706	1	7	7	2
Mayo	419	743	0	2	2	2
Junio	683	503	136	147	149	12
Julio	744	212	688	583	601	198
Agosto	682	274	569	558	581	468
Septiembre	718	0	620	491	603	568
Octubre	707	135	549	212	306	664
Noviembre	492	513	516	457	646	300
Diciembre	687	600	543	507	569	500
Total	7110	5758	3622	2964	3464	2714

En la tabla 18 se muestra la frecuencia de trabajo en las que trabajaron los motores a los diferentes estados de carga. El motor MAN 1 permaneció operando aproximadamente el 75% de las horas de trabajo entre el 50 y 80% de carga, permaneciendo apagado solo el 17% del total de horas al año. El MAN 2, en este mismo intervalo trabajó el 57% del tiempo de operación y permaneció apagado el 34,5% del tiempo de trabajo. En el caso de los motores de Hyundai, la mayor parte del tiempo funcionaron entre el 70 y 90% de carga.

Tabla 18: Resumen del régimen de carga para los motores de tecnología fueloil (MAN y Hyundai).

Por ciento de carga.	Por ciento de frecuencia en horas de trabajo de los motores.					
	MAN 1	MAN 2	Hyundai 1	Hyundai 2	Hyundai 3	Hyundai 4
Apagado	17.00%	34.50%	38.90%	49.90%	41.60%	54.10%
5	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
10	3.80%	4.70%	0.10%	0.10%	0.10%	0.00%
20	0.30%	0.10%	0.10%	0.00%	0.00%	0.10%
30	0.20%	0.10%	0.10%	0.00%	0.10%	0.10%
40	0.50%	0.10%	0.10%	0.00%	0.10%	0.00%
50	7.20%	2.60%	0.30%	0.20%	0.20%	0.20%
60	30.20%	18.40%	2.90%	2.70%	3.50%	2.90%
70	27.60%	25.00%	14.10%	14.50%	17.70%	14.00%
80	11.20%	11.80%	25.30%	20.30%	25.60%	19.60%
90	1.40%	1.90%	18.10%	12.10%	11.00%	9.10%
Mayor de 90	0.10%	0.10%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Total	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

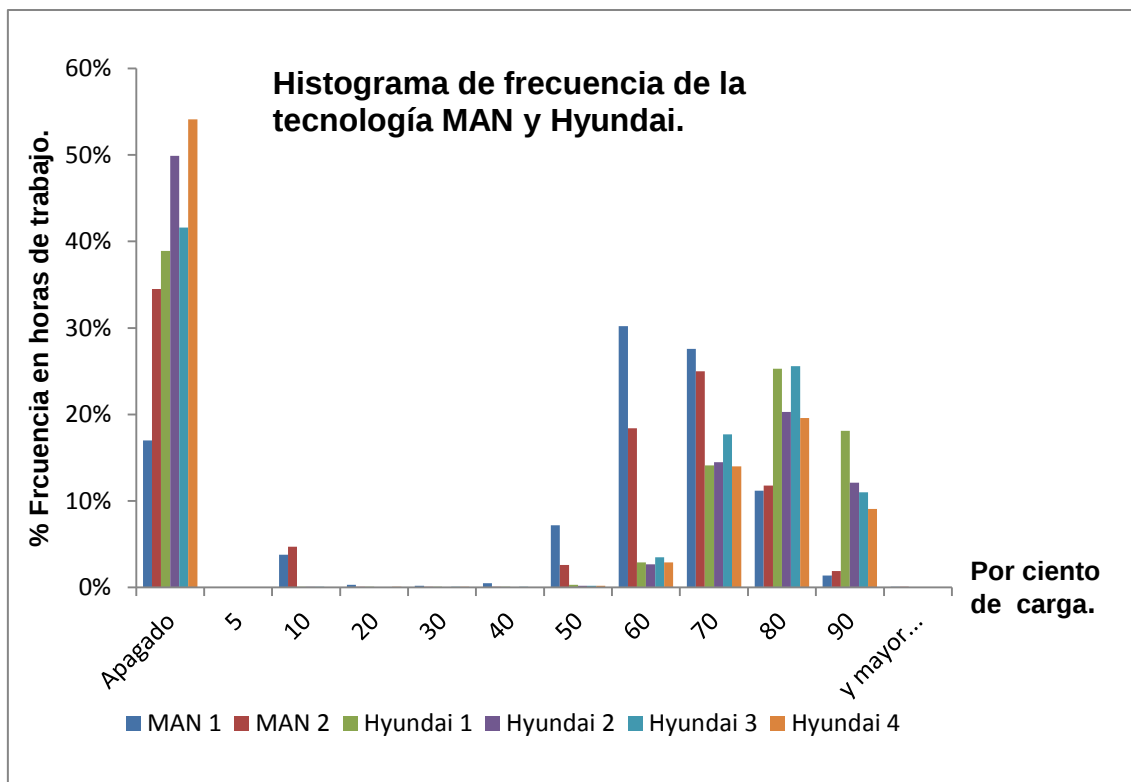


Figura 13: Histograma de frecuencia de trabajo de los motores de tecnología fueloil.

3.4. Valoración de la eficiencia y el consumo de combustibles en las centrales.

Un tema medular en cualquier instalación de transformación energética es la eficiencia; del valor de este parámetro dependerá la energía primaria requerida para satisfacer la demanda. Por otra parte en la medida que se demande mayor cantidad de energía los volúmenes de gases emitidos a la atmósfera serán mayores con el consecuente incremento del impacto ambiental.

En la tabla 19 se muestran los parámetros de operación determinados como típicos para los moto-generadores que se encuentran en operación en la central objeto de análisis. Estos parámetros fueron extrapolados a partir de mediciones en las centrales de similar tecnología que operan en Santa Clara. Los parámetros para las plantas a partir de extrapolar el comportamiento típico a todos los motores se muestran en la

Tabla 19: Parámetros típicos de la unidad de generación.

Motor	Combustible		Consumo específico al factor de carga dado			Eficiencia (%)	Factor de carga	Potencia máx.(MW)
	Tipo	NCV (MJ/kg)	(g/kWh)	(kWh _f /kWh _e)	(kg/h)			
MAN	FOP	41.2	229	2.62	529	38.2	0.6	3.85
Hyundai	FOP	41.2	229	2.62	292	38.2	0.75	1.7

Como se puede apreciar en las tablas anteriores la eficiencia calculada de los motores es de 38.2 %, este valor está cerca del límite superior para este tipo de tecnología, por lo que se puede decir que el combustible se está aprovechando al máximo.

3.5. Equipamiento a utilizar en la medición.

El analizador de gases a utilizar en la medición es el Testo 340, el mismo está diseñado para una realizar diversas aplicaciones tales como el monitorio de las emisiones contaminantes, el control de la reducción de emisiones por la instalación de dispositivos, el monitoreo de la eficiencia de la combustión y la fiabilidad de las instalaciones con ciclos de combustión. Puede ser utilizado en diferentes dispositivos entre los que se encuentran las chimeneas de equipos como grupos electrógenos y turbinas de gas. No debe ser utilizado para realizar medidas continuas de más de dos horas.

Con este analizador se puede medir la concentración en los gases de salida y cumple con los requisitos que requieren los métodos de medición de la EPA 6C, 7E y 10. Las características del instrumento se pueden ver en la tabla 3.

El equipo posee cuatro pantallas. La primera y principal, marca los % o ppm (partes por millón) del gas en la mezcla de productos gaseosos de la combustión y la temperatura del gas y del local (este sería el ambiente del equipo). Los valores mostrados son de la emisión instantánea, y los valores calculados de CO_2 , ϵ , λ , las pérdidas sólo se indican cuando el por ciento de O_2 medido está por debajo del 20,5% y la diferencia de temperatura es mayor que $(T_{\text{gás}} - T_{\text{local}}) > 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Las otras tres pantallas muestran la información (durante el transcurso de las mediciones) de valores medios de forma automática en intervalos de tiempo dados. Otra muestra de las pantallas es la de programación. Todas las emisiones son reportadas en ppm, pero estas unidades pueden ser variadas expresando los resultados en por ciento o mg/m^3 [30].



Figura 14: Analizador de gases de combustión. (Testo 340).

Tabla 20: **Datos técnicos de analizador Texto 340 [30].**

Variable	Rango de medición	Precisión	Tiempo	Resolución	Principio de medición
O ₂	0-25 %	±0.2 Vol. %	<20s	0,01 Vol. %	Sensor electroquímico
CO, H ₂	0-10000 ppm	±10 ppm ó ±10% desde 0...200ppm ±20 ppm ó ±5% desde 201...2000ppm ±10% desde 2001...10000ppm	<40s	1 ppm	
NO	0-3000 ppm	±5ppm desde 0...99ppm ±10% desde 2000...3000ppm ±5% desde 100...1999ppm	<30s	1 ppm	
NO ₂	0-500 ppm	±10ppm desde 0...199ppm ±5% para el resto del rango	<40s	0.1 ppm	
SO ₂	0-5000 ppm	±10ppm at 0...99ppm ±10% para el resto del rango	<40s	1 ppm	
Gas Temp	-40...1200 °C	±0.5°C at 0.0...99°C ±0.5% para el resto del rango		0.1°C desde - 40.0...999.9°C 0.1°C desde 1000...1200°C	Termopar
Amb. Temp	0-99 °C	2 % (2 °C)		1 °C	

3.6 Resultados de las mediciones.

Para este caso de estudio fueron realizadas diez replicas en diferentes motores en el caso de los motores Hyundai, en caso de los motores MAN solo se logró medir uno de los dos motores ya que en el momento de la medición uno de ellos se encontraba de mantenimiento. Las mediciones fueron realizadas al 60 % de carga, siendo esta una carga representativa en los motores MAN. En el caso de los motores Hyundai las mediciones fueron realizadas al 75 % de carga (carga a la que están regulados estos motores para operar). Teniendo en cuenta estos datos se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 21: Mediciones en el motor MAN 1al 60% de carga.

Parámetros medidos	U/M	Valores medidos.										Media	SD
Replicate	n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
T. env	°C	33	34	33	32	34	33	34	35	34	33	34	0.85
T Gas	°C	322	319	319	320	323	324	323	322	321	322	322	1.72
O ₂	%	13.8	13.8	13.7	13.6	13.8	13.9	13.9	13.8	13.7	13.9	13.8	0.10
CO	ppm	170	168	169	171	172	170	171	169	170	171	170	1.20
NO	ppm	648	649	650	651	650	652	648	649	652	650	650	1.45
NO ₂	ppm	8	7	9	10	9	10	7	9	8	7	8	1.17
NO _x	ppm	656	656	659	661	659	662	655	658	660	657	658	2.31
SO ₂	ppm	491	489	488	493	492	494	489	490	491	492	491	1.91
CO ₂	%	5.6	5.7	5.6	5.5	5.7	5.7	5.6	5.7	5.6	5.7	5.6	0.07
α		2.95	2.95	2.90	2.86	2.95	3.00	3.00	2.95	2.90	3.00	2.9	0.05

Tabla 22: Mediciones en los motores Hyundai al 75 % de carga.

Parámetros medidos	U/M	Valores medidos										Media	SD
Réplicas	n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
T. env	°C	33	34	33	32	34	33	34	35	34	33	34	0.85
T Gas	°C	262	259	260	262	260	259	259	262	260	261	260	1.26
O ₂	%	13.4	13.5	13.4	13.5	13.4	13.5	13.3	13.4	13.5	13.4	13.43	0.07
CO	ppm	200	199	198	200	201	202	200	199	200	201	200	1.15
NO	ppm	806	805	804	805	804	807	808	806	805	806	806	1.26
NO ₂	ppm	10	11	11	11	11	9	9	10	10	11	10	0.82
NO _x	ppm	816	816	815	816	815	816	817	816	815	817	816	0.74
SO ₂	ppm	528	526	527	525	526	527	530	529	530	528	528	1.71
CO ₂	%	5.8	5.7	5.6	5.9	5.8	5.8	5.6	5.8	5.7	5.8	5.8	0.10
α		2.77	2.81	2.77	2.81	2.77	2.81	2.73	2.77	2.81	2.77	2.8	0.03

3.7 Inventario de emisiones y modelación de la dispersión de contaminantes.

Los inventarios de emisiones son una herramienta fundamental en la gestión de la calidad del aire local. Un inventario de las emisiones atmosféricas es una relación de las fuentes de contaminación dentro del área geográfica en particular. El inventario incluye generalmente información sobre la cantidad de los contaminantes liberados por fuentes claves, y figura el promedio de las emisiones de fuentes más pequeñas en toda el área. Para el procedimiento de análisis que se sugiere en este trabajo, se requiere un inventario de emisiones con alta resolución geográfica y temporal de la fuente emisora en evaluación, principalmente basado en la tasa de consumo de combustible y el análisis de las emisiones gaseosas en el lugar específico.

Los contaminantes involucrados en este análisis son aquellos de mayor interés en la contaminación local (PM₁₀, SO₂, NO₂, CO). Para la evaluación, las emisiones contaminantes se deben determinar llevando a cabo mediciones de acuerdo a métodos establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) y adoptadas por las Normas Cubanas para regular las

máximas emisiones admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas de instalaciones de generación de vapor y electricidad [4].

3.7.1 Determinación de las emisiones de gases contaminantes.

Las tasas de emisión y el inventario de emisiones son fundamentales en este trabajo. En la práctica se determinan de dos formas: una mediante mediciones en las fuentes de emisión y otra utilizando factores de emisión generalmente en función del tipo de combustible y la tecnología.

Cálculo de las tasas de emisión mediante mediciones.

Existen métodos de referencia establecidos para el monitoreo de las emisiones contaminantes, la EPA ofrece varias recomendaciones sobre qué método usar en cada caso así como algunos métodos complementarios. Los métodos que se utilizaron en este trabajo son para el dióxido de azufre el método 6C, para los NO_x el 7E y para el CO el 10 (EPA 2004).

3.7.2 Tasas de emisión e inventario de emisiones.

Para el cálculo de las tasas de emisión se parte de los parámetros típicos de operación de los motores y las emisiones como son: el exceso de aire, el consumo de combustible, la concentración de contaminantes en los gases de escape y su temperatura. Es importante destacar que los parámetros típicos representan el comportamiento promedio de todos los motores y estos son extrapolables a todos los motores de las centrales evaluadas u otras con tecnología similar siempre y cuando operen en las mismas condiciones. Es por eso que no necesariamente se requiere medir en todos los motores de hecho solo se midió en algunos, y los valores se extrapolaron a los demás para calcular los parámetros de emisiones de las baterías y las centrales. Las tasas de emisión, el flujo de gases y su velocidad de salida se determinaron a partir de los parámetros antes mencionados y mediante la modelación de la reacción de combustión y balances de masa y energía. Debido a la conexión de cuatro unidades de generación por chimenea los parámetros de emisión obviamente dependerán en gran medida del número de motores que estén operando simultáneamente, lo que puede constatarse en las tablas 23 y 24. Los valores dados para el caso en que opera una sola unidad son los típicos de un motor.

Tabla 23: Parámetros de salida de los gases según las unidades MAN en operación.

Variable	MU	Parámetros liberados
Unidades en operación	Units	1
Velocidad de salida de los gases	m/s	5.61
NO _x	g/s	0.6
NO _{2eq.}	g/s	4.10
NO _{2eq.(25%)}	g/s	1.06
SO ₂	g/s	2.31
CO	g/s	2.05
PM ₁₀	g/s	0.44
Temperatura	K	523

Tabla 24: Parámetros de salida de los gases según las unidades Hyundai en operación.

Variable	MU	Parámetros liberados			
		1	2	3	4
Unidades en operación	Units				
Velocidad de salida de los gases	m/s	5.61	11.21	16.82	22.43
NO _x	g/s	0.6	1.2	1.8	2.4
NO _{2eq.}	g/s	4.10	8.20	12.30	16.40
NO _{2eq.(25%)}	g/s	1.06	2.12	3.18	4.24
SO ₂	g/s	2.31	4.62	6.94	9.25
CO	g/s	2.05	4.11	6.16	8.21
PM ₁₀	g/s	0.44	0.89	1.33	1.78
Temperatura	K	523	523	523	523

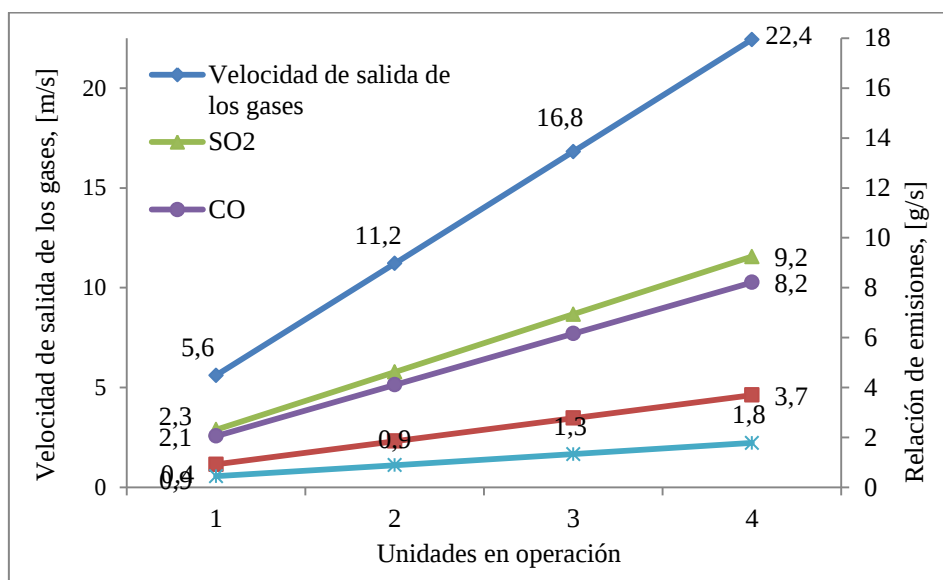


Figura 15: Parámetros de liberación de las chimeneas contra máquinas en operación.

A partir de las tasas de emisión, las horas de funcionamiento de la central, el consumo de combustible y su composición se calcularon las emisiones anuales de los contaminantes principales. El inventario anual del consumo de combustible y de las emisiones de gases producto de la combustión en los motores MAN y Hyundai se muestra en las tablas 25 y 26 ilustrándose en las figuras 16 y 17.

Tabla 25: Consumo de combustible y emisiones anuales en los motores MAN.

Central	Combustible (hton)	CO (ton)	SO ₂ (ton)	NO _x (ton)	PM ₁₀ (ton)	CO ₂ (hton)
Cayo Santa María	9.846	6	39	25	5	31

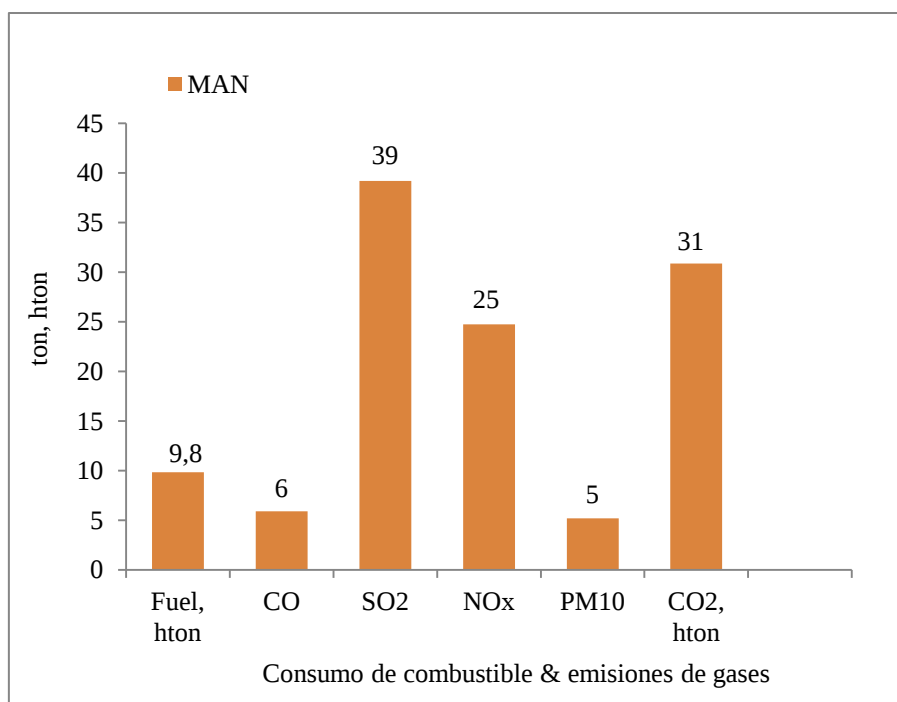


Figura 16: Emisiones de gases contaminantes motores MAN.

Tabla 26: Consumo de combustible y emisiones anuales en los motores Hyundai.

Central	Combustible (hton)	CO (ton)	SO ₂ (ton)	NO _x (ton)	PM ₁₀ (ton)	CO ₂ (hton)
Cayo Santa María	9.840	7	40	19	5	31

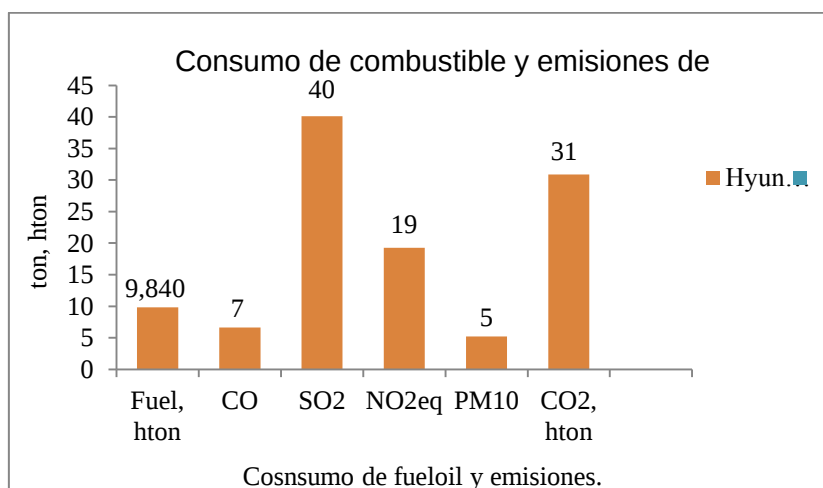


Figura 17: Emisiones de gases de los motores Hyundai.

3.8 Cumplimiento de las Normas de emisión.

En Cuba, las emisiones gaseosas a la atmósfera por fuentes fijas se regulan por la Norma Cubana- TS 803:2010, esta norma establece los límites superiores de las emisiones contaminantes por fuentes fijas de instalaciones de generación de vapor y electricidad con el objetivo de proteger la salud humana y el medioambiente. Los

límites superiores de las emisiones se expresan como concentraciones de los contaminantes en base a los gases secos liberados a la atmósfera desde fuentes estacionarias, estos se expresan en mg/Nm³, lo cual corresponde con el contenido en peso del contaminante por unidad de volumen del gas seco liberado a la atmósfera en condiciones normales de temperatura y presión. De acuerdo a la norma referida anteriormente, los límites superiores de las emisiones deben ser controlados en la etapa operacional y tomados en consideración en la etapa de diseño de nuevas instalaciones energéticas [4].

Tabla 27: Comparación de los resultados de emisión de cada contaminante con la NC TS 803:2010. (Motores MAN).

Contaminantes	Emisiones, mg/Nm ³ (273.15 K, 101.325 kPa, gases seco, O ₂ ref 15%)	
	Máximos permisibles	Valores medidos
SO ₂	2500	1166
NO _x	2000	736
CO	--	176
PM	200	--
PM ₁₀	160	154

Tabla 28: Comparación de los resultados de emisión de cada contaminante con la NC TS 803:2010. (Motores Hyundai).

Contaminantes	Emisiones, mg/Nm ³ (273.15 K, 101.325 kPa, gases seco, O ₂ ref 15%)	
	Máximos permisibles	Valores medidos
SO ₂	2500	1191
NO _x	2000	868
CO	—	197
PM	200	—
PM ₁₀	160	154

3.9. Dispersión de contaminantes, determinación de la concentración de contaminantes.

La valoración de los impactos asociados a las emisiones de gases contaminantes originadas por ciclos de combustión conduce a modelar su dispersión. Para los contaminantes del aire, a excepción de los gases de efecto invernadero, es significativo conocer su dispersión en la atmósfera debido a importantes efectos, no despreciables, a escala local y regional.

Los modelos de dispersión atmosférica más importantes requieren no solo tener en cuenta el transporte físico de los contaminantes por la acción de los vientos, sino además sus transformaciones químicas. Sin embargo, la dispersión de contaminantes químicamente estables en la región de la emisión se puede predecir usando modelos de pluma Gaussiana. Estos modelos asumen que las emisiones contaminantes son transportadas por el viento en una línea continua, mientras se mezclan en la dirección horizontal y vertical con el aire circundante para producir concentraciones del contaminante con una distribución espacial normal (o Gaussiana) (EPA, 2000). Para este estudio se evalúan mayormente efectos a escala local y las distancias siempre son mucho menores que 100 km por lo que se ha adoptado un modelo de pluma Gaussiana implementado en el software ISC-AERMOD View.

En este modelo la concentración está dada en función de las condiciones del terreno, la meteorología y los parámetros de emisión de la fuente (PEF). Los dos primeros factores, permanecen constantes pero los PEF pueden ser perturbados para modificar el efecto de las fuentes en la concentración resultante. Los PEF incluyen la localización de la fuente, altura de la chimenea, tasa de emisión, temperatura de los gases de salida, velocidad de salida de los gases y diámetro interior de la chimenea en el punto de liberación [4].

A continuación se presenta el modelo de dispersión utilizado por el software con el cuál será realizada la simulación de los gases de emisión.

3.9.1. Modelo de dispersión atmosférica utilizado para el estudio

Modelo de dispersión atmosférica ISCST3 AERMOD.

Entre los métodos que existen para valorar las emisiones de gases y conocer su impacto se encuentra la modelación de dispersión a través de esta se obtienen resultados que muestran el comportamiento del efecto causado por las concentraciones de contaminantes desde escalas locales hasta globales. Este modelo de dispersión atmosférico es un tipo de modelo gaussiano, fue desarrollado y es mantenido por la Agencia de Protección del Medioambiente de Estados Unidos (USEPA), y es un modelo de dispersión atmosférico ampliamente usado y probado a nivel mundial [31].

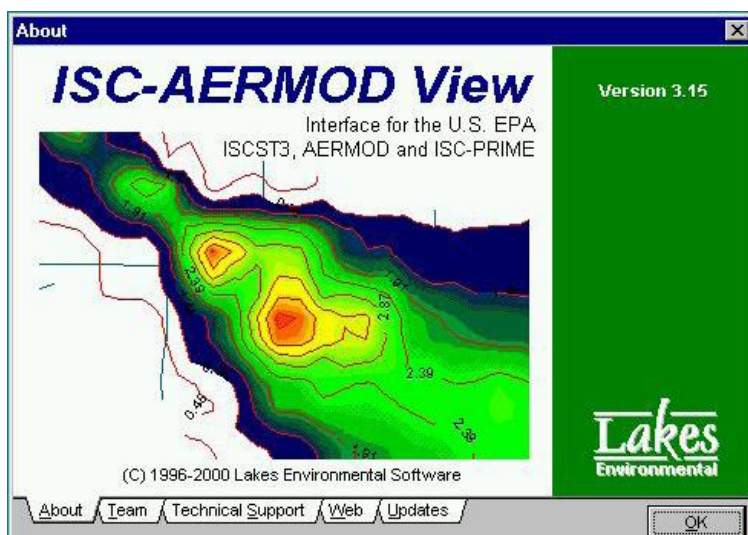


Figura 18: Vista panorámica del programa ISCST3 [4].

El modelo ICST3 simula la dispersión en la atmósfera de contaminantes emitidos por las fuentes industriales y estima las concentración de los compuestos en 24hs a nivel de terreno. El modelo permite evaluar tanto las descargas puntuales (como las chimeneas y las descargas de un edificio) y fuentes distribuidas en un área como el polvo levantado por el viento. El modelo ICST3 es un modelo de pluma de Gauss de dispersión que asume que las concentraciones del contaminante en la pluma (vertical y lateralmente) pueden representarse por curvas basadas en la función estadística de distribución estándar normal (distribución de Gauss).

A continuación se muestra la figura que corresponde a la plataforma interactiva del programa ISCT3. Ver figura 5.

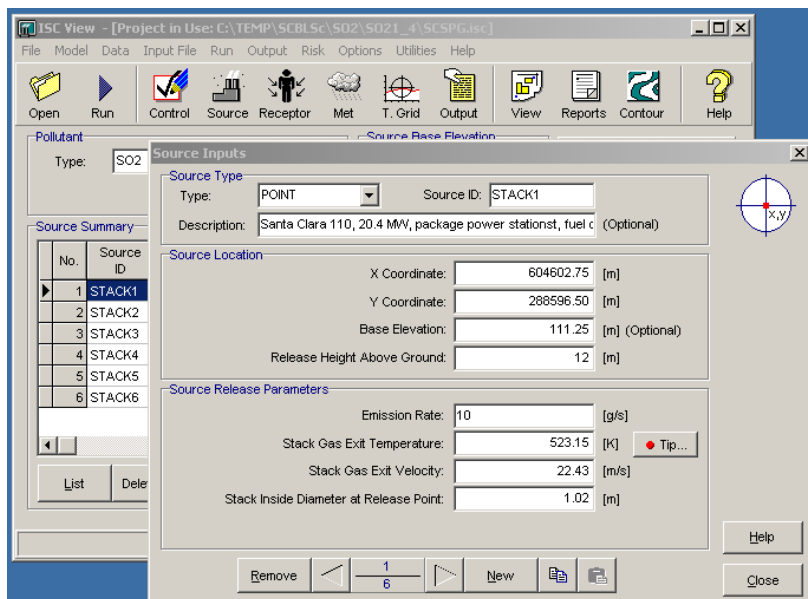


Figura 19: Interfaz del programa para la introducción de los datos [4].

Los datos de entrada al software son:

- Localización de las fuentes emisoras en coordenadas x; y (Mapa de AutoCAD en formato dxf).
- Diámetro chimenea D en m.
- Altura de la chimenea sobre el nivel del suelo H en m.
- Temperatura de la mezcla de gases y aire Tg en °K.
- v: Velocidad de salida de la mezcla de gases y aire (m/s).
- RC – Régimen de carga de los motores horario.
- T – Tasa de emisión del contaminante que se esté analizando (g/s).

Datos meteorológicos de la superficie y el aire superior:

- Dirección del viento.
- Velocidad del viento FF (m/s).
- Temperatura (°C).
- Estabilidad atmosférica.
- Altura capa de mezcla (m).
- Punto de rocío (°C).

3.10 Impactos sobre la calidad del aire de las emisiones de gaseosas.

Los impactos de los contaminantes atmosféricos se tratan generalmente como efectos asociados a cortos períodos de exposición (24 h) o períodos largos (un año), por lo que mayormente las normas regulan las concentraciones máximas admisibles promedio para estos períodos de tiempo en asentamientos humanos. En la norma cubana NC 39:1999 aparecen las regulaciones para períodos de 24 horas, pero esta no regula el nivel de las concentraciones para períodos de un año por lo que las concentraciones promedio anuales límites admisible que se usan como referencia en este trabajo se toman de la NAAQS, EPA 2010 en el caso de SO₂ y de **AIR QUALITY STANDARDS, European Commission 2011** para el PM₁₀ y NO₂.

3.10.1. Impacto asociado al dióxido de azufre.

El dióxido de azufre es uno de los contaminantes de mayor incidencia en las afectaciones a la calidad del aire de los ciclos de combustión, su origen está dado por la oxidación del azufre contenido en el combustible.

Para este caso de estudio se ha modelado la dispersión de las emisiones de este contaminante y se calculan los incrementos de concentraciones promedio para períodos de 24 h y un año, los máximos valores de concentración promedio se muestran en las tablas respectivamente.

Tabla 29: Concentración incremental máxima de SO_2 promedio de 24 h, índice y categoría de calidad de aire.

Máximo	Concentración 24 h, (mg/m^3)	Índice de calidad del aire	Categoría de calidad del aire	Fecha (A/M/D)	Localización (UTM)	
					x	y
CMA	50*	100	Aceptable	—	—	—
1	172.6	345	Pésima	13/10/12	699000	314800
2	119.1	238	Mala	13/11/28	699200	314800
3	88.0	176	Deficiente	13/11/02	699200	314800
4	73.9	147	Deficiente	13/05/11	699200	314800
5	72.1	144	Deficiente	13/11/20	699200	314800

Nota: CMA: Concentración máxima admisible del contaminante en el aire como promedio de 24 h.

* Concentración máxima admisible como promedio de 24 h establecida por la NC 39:1999.

Se observa en la tabla 29 los cinco valores más altos (máximos) de concentración incremental de dióxido de azufre calculados para períodos de 24 h, se presentan además en esta tabla la fecha de ocurrencia y la localización en el sistema de coordenadas UTM, en el Anexo 2 puede verse el mapa de concentraciones para el área de estudio del primer máximo. Es importante mencionar que el primer máximo de concentración es la condición más crítica de contaminación que se presenta en cada receptor (se denomina receptor a cada punto de la maya para la modelación donde se calculó el incremento de concentración).

Al comparar a partir de la Tabla 29, el valor de la CMA con el valor de la concentración incremental calculada de SO_2 para los cinco primeros máximos puede concluirse que solo un valor excede en aproximadamente 3 veces lo que establece la norma como límite, lo que se ilustra en la Figura 20, correspondiéndole a los dos primeros máximos la categoría de calidad del aire de pésima y a los cuatro siguientes la categoría de mala, constituyendo puntos de atención por la posibilidad de eventos críticos de contaminación.

En la Tabla 30 se muestra la magnitud de los diez máximos de concentraciones incrementales promedio de SO_2 para un año y la localización del receptor donde fue calculada, en el Anexo 3 puede verse el mapa de concentraciones para el área de estudio. Al comparar la magnitud CIC con la CMA que refiere la norma para este contaminante puede concluirse que en todos los casos los valores de la concentración incremental calculada están por debajo del límite que establece la norma, esto se ilustra en la Figura 21.

Tabla 30: Concentración promedio de SO₂ y localización.

Máximo	Concentración promedio para un año, (µg/m ³)	Localización (UTM)	
		x	y
CMA	80*	—	—
1	13.5	699000	314600
2	13.0	698800	314600
3	12.9	699000	314800
4	12.4	699200	314800
5	11.6	698800	314800
6	10.6	698600	314600
7	10.0	699200	314800
8	9.9	698600	314800
9	9.9	698400	314400
10	9.4	698400	314600

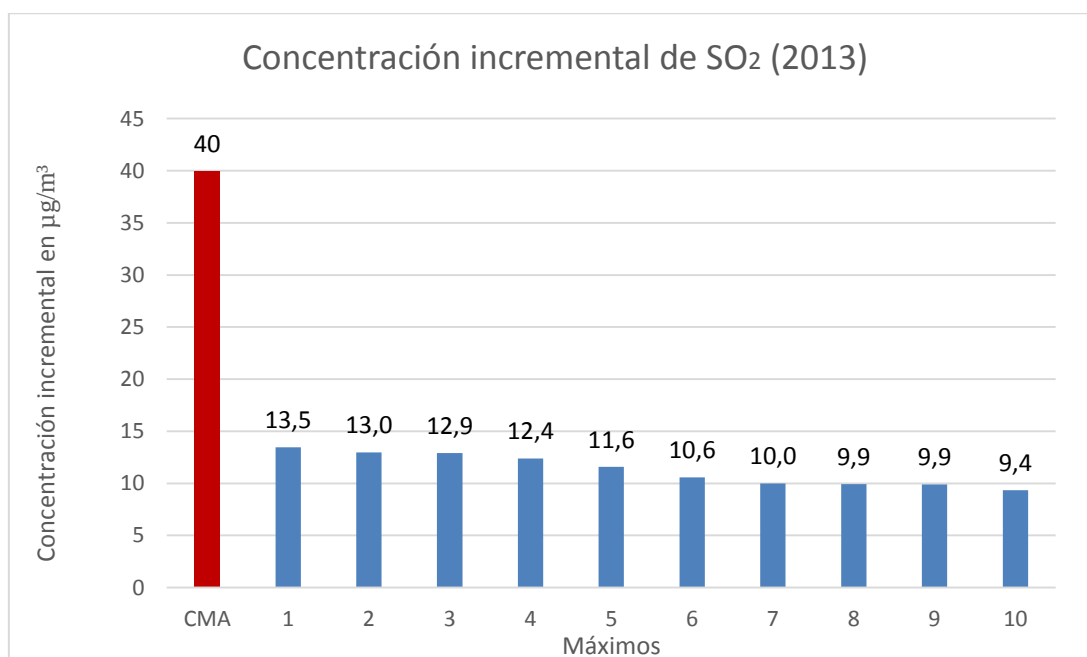


Figura 20: Concentración incremental promedio de un año.

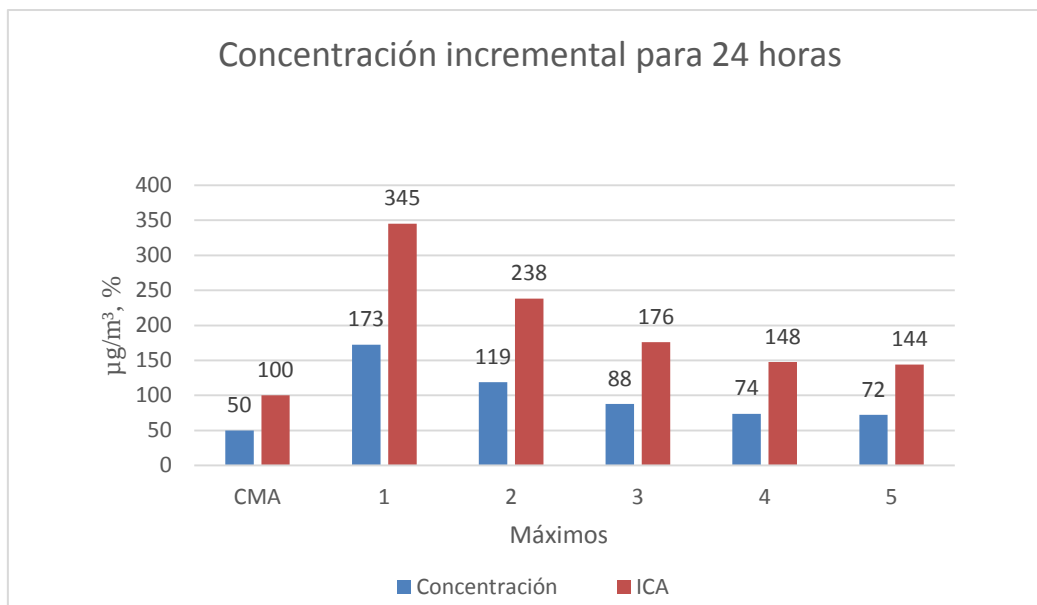


Figura 21: Concentración incremental para 24 horas e índice de calidad del aire para el año 2013.

3.10.2. Impacto asociado al dióxido de nitrógeno.

El NO_2 es uno de los contaminantes atmosféricos de mayor preocupación con relación a la salud humana. Este se genera principalmente cuando en el proceso de combustión el nitrógeno del combustible es convertido a óxido de nitrógeno y además cuando el nitrógeno y el oxígeno atmosférico se combinan por las altas temperaturas de la combustión. Por esta razón la generación de electricidad es una de las mayores fuentes de emisión de óxidos de nitrógeno.

Para este contaminante al igual que para el caso anterior se ha modelado la dispersión de las emisiones desde las centrales 1SPG y 4SPG y se calculó los incrementos de concentraciones promedio para períodos de 24 h y un año en el área de estudio. Los valores máximos de la concentración incremental promedio se muestran en las tablas 30 y tabla 31.

En la tabla 30, se muestran los cinco máximos de concentración incremental promedio de 24 h de dióxido de nitrógeno y se reporta además la fecha de ocurrencia y la localización, en el Anexo 4 puede verse el mapa de concentraciones para el área de estudio del primer máximo.

Tabla 31: Concentración incremental máxima de NO_2 promedio de 24 h, índice y categoría de calidad de aire.

Máximo	Concentración 24 h, (mg/m ³)	Índice de calidad del aire	Categoría de calidad del aire	Fecha (A/M/D)	Localización (UTM)	
					x	y
CMA	40*	100	Aceptable	—	—	—
1	26.3	66	Buena	13/11/19	699000	314200
2	21.7	82	Aceptable	13/11/23	698800	314600
3	19.2	88	Aceptable	13/12/30	698800	314800
4	19.1	99	Aceptable	13/11/20	698800	314800
5	17.5	91	Aceptable	13/11/21	698800	314800

Nota: CMA: Concentración máxima admisible del contaminante en el aire promedio de 24 h.

* Concentración máxima admisible como promedio de 24 h establecida por la NC 39:1999.

Al analizar de manera comparativa el valor de la CMA con el valor de los seis primeros máximos de CIC promedio para 24 h de NO₂ puede concluirse que todos se encuentran ubicados por debajo de lo que establece la norma como límite, lo que se ilustra en la Figura 22, correspondiéndole a los dos primeros máximos la categoría de calidad del aire es buena y a los cuatro siguientes la categoría de aceptable.

Se presenta en la Tabla 32 la magnitud de los diez máximos de concentraciones incrementales promedio de NO₂ para un año y la localización del receptor donde fue calculada, en el Anexo 5 puede verse el mapa de concentraciones para el área de estudio.

Al comparar la magnitud de los máximos de la CIC reportados en la Tabla 32 con la CMA que refiere la norma citada para este contaminante puede concluirse que en todos los casos los valores de la CIC están por debajo del límite que establece la norma, lo que se puede constatar en la Figura 23.

Tabla 32: Concentraciones máximas incrementales de NO₂ promedio de un año.

Máximo	Concentración promedio para un año, (µg/m ³)	Localización (UTM)	
		x	y
CMA	40**	—	—
1	3.2	699000	314600
2	3.1	698800	314600
3	3.0	698800	314800
4	2.8	698800	314800
5	2.6	698600	314600
6	2.6	699200	314800
7	2.4	698600	314800
8	2.3	698400	314400
9	2.3	698400	314600
10	2.3	699200	314600

** Concentración máxima admisible en el aire como promedio para un año según European Commission Environment. Air Quality Standards 2010 (European Commission Environment 2010).

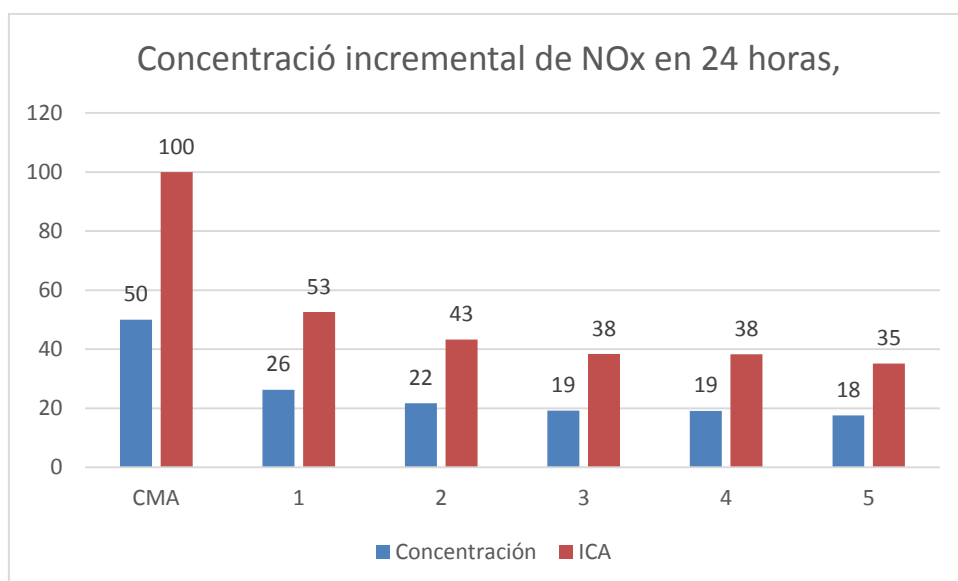


Figura 22: Concentración incremental de NO₂ en 24 horas.

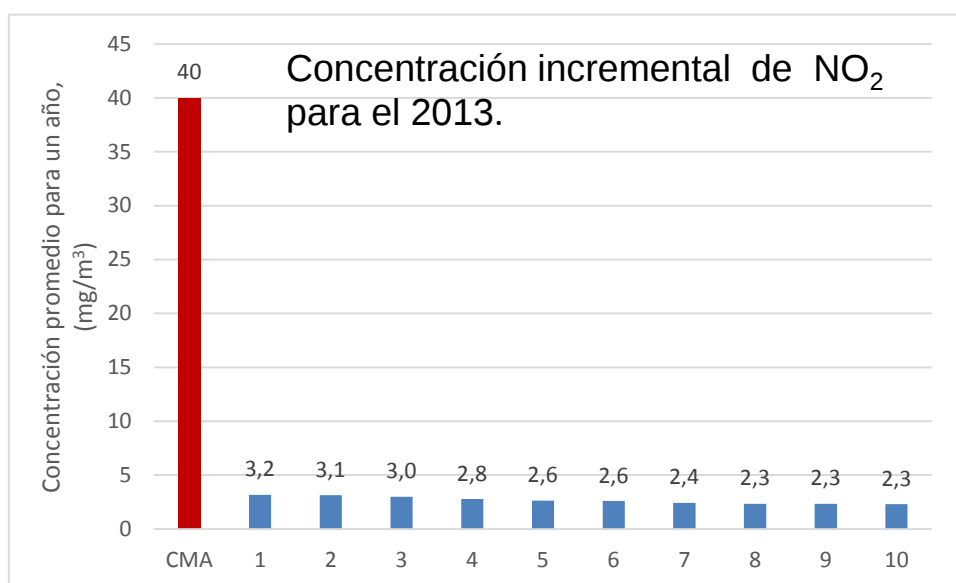


Figura 23: Concentración incremental de NO₂ para el año 2013.

En este caso se observa que aunque la CIC se encuentra por debajo del límite dado por la norma al respecto la diferencia entre la CIC y la CMA es tan amplia como en el caso anterior.

Al igual que para el SO₂ las emisiones de NO₂ son de mayor preocupación por los eventos agudos de contaminación que pueden provocar en algunos puntos del área de estudio y no por la exposición que generan como promedio durante períodos largos, lo cual se deduce cuando se verifica que en algunas zonas del área de estudio la concentración promedio diaria calculada excede la máxima admisible según la NC 39:1999, mientras que en ningún momento la concentración promedio anual supera el límite normado por la European Commission Environment. Air Quality Standards 2010.

3.10.2. Impacto asociado al PM10.

En la literatura se reporta como una de las fuentes principales de emisión de partículas la combustión en motores de combustión interna, por lo que las centrales objeto de este estudio constituyen un importante emisor.

Para este contaminante al igual que para los dos casos anteriores se ha modelado la dispersión de las emisiones desde las centrales 1SPG y 4SPG y se calculó los incrementos de concentraciones promedio para períodos de 24 h y un año en el área de estudio. Los valores máximos de concentración promedio determinados mediante la modelación para 24 h se muestran en las tabla 33 y para un año en la tabla 34 respectivamente.

Tabla 33: Concentración incremental máxima de **PM₁₀** promedio de 24 h, índice y categoría de calidad de aire.

Máximo	Concentración 24 h, (mg/m ³)	Índice de calidad del aire	Categoría de calidad del aire	Fecha (A/M/D)	Localización (UTM)	
					x	y
CMA	40*	100	Aceptable	—	—	—
1	23.3	58	Buena	13/10/31	699000	314800
2	16.1	69	Buena	13/11/28	699200	314800
3	11.9	74	Buena	13/11/02	699200	314800
4	10.0	84	Aceptable	13/05/11	699200	314800
5	9.7	97	Aceptable	13/11/20	699200	314800

Nota: CMA: Concentración máxima admisible del contaminante en el aire promedio de 24 h.

* Concentración máxima admisible como promedio de 24 h establecida por la NC 39:1999.

Aparecen en la Tabla 33 los cinco máximos de concentración incremental promedio de 24 h de **PM₁₀** y se reporta además la fecha de ocurrencia y la localización, en el Anexo 6 se muestra el mapa de concentraciones para el área de estudio del primer máximo.

Al analizar de manera comparativa el valor de la CMA con el valor de los cinco primeros máximos de CIC promedio para 24 h de **PM₁₀** se puede concluir que en ningún caso exceden lo que establece la norma como límite, esto se ilustra en la Figura 24, correspondiéndole a todos los máximos la categoría de calidad del aire de buena y aceptable.

Se presenta en la Tabla 34 la magnitud de los diez máximos de concentraciones incrementales promedio de **PM₁₀** para un año y la localización del receptor donde fue calculada, en el Anexo 7 se muestra el mapa de concentraciones para este contaminante en el área de estudio.

Al comparar la magnitud de los máximos de la CIC reportados en la **Tabla 20** con la CMA que refiere la norma para este contaminante puede concluirse que en todos los casos los valores de la CIC están por debajo del límite que establece la norma, lo que se puede constatar en la Figura 25.

Tabla 34: Concentraciones máximas incrementales de **PM₁₀** promedio de un año.

Máximo	Concentración promedio para un año, (µg/m ³)	Localización (UTM)	
		x	y
CMA	40**	—	—
1	3.2	699000	314600
2	3.1	698800	314600
3	3	699000	314800
4	2.8	698800	314800
5	2.6	698600	314600
6	2.6	699200	314800
7	2.4	698600	314800
8	2.3	698400	314400
9	2.3	698400	314600
10	2.3	699200	314600

** Concentración máxima admisible en el aire como promedio para un año según European Commission Environment. Air Quality Standards 2010.

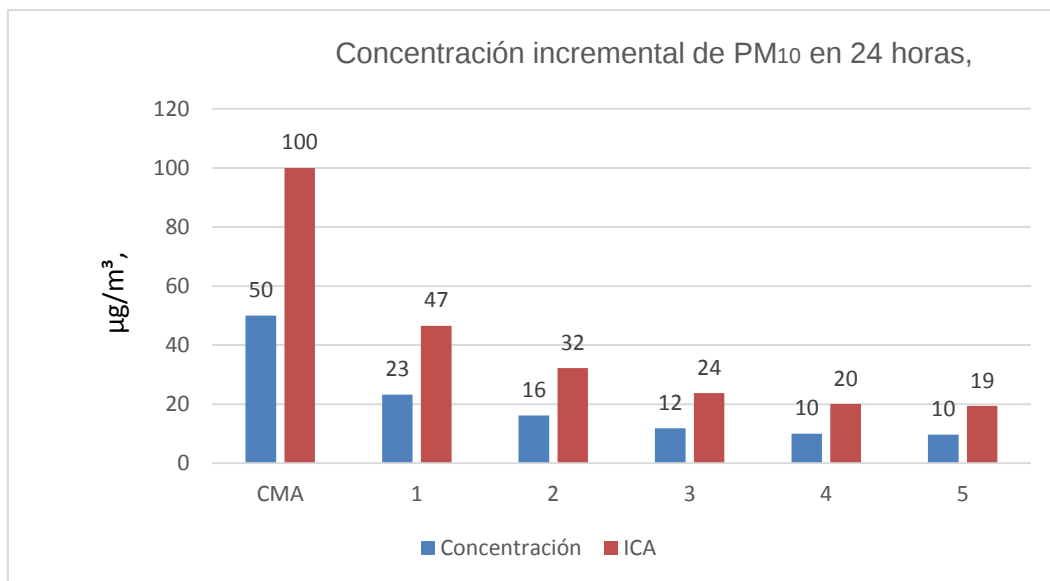


Figura 24: Concentración incremental de PM₁₀ en 24 horas.

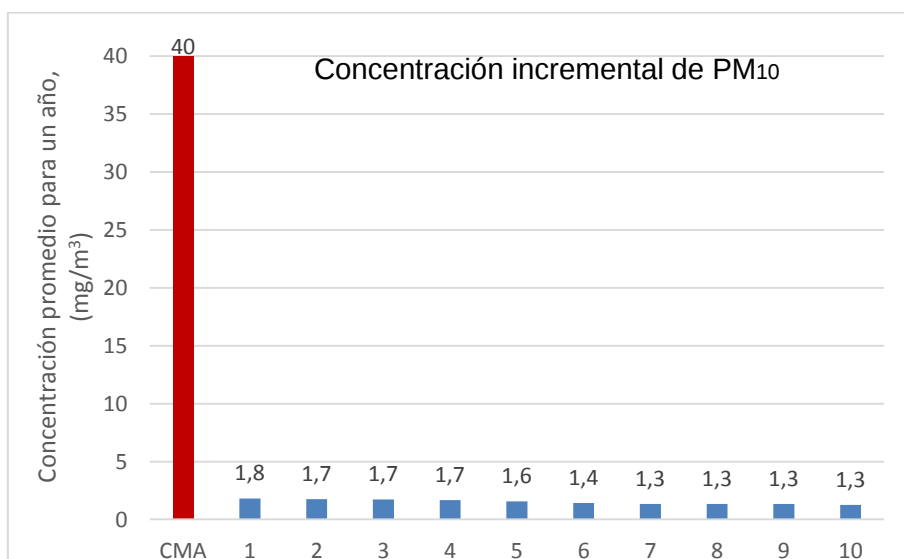


Figura 25: Concentración incremental de PM₁₀ para el año 2013.

Conclusiones

Se puede decir que el régimen de carga de mayor significación en los motores MAN se encuentran alrededor del 60% de carga, mientras que los motores Hyundai operan en el 75 % de carga, por lo que las mediciones fueron realizadas en estos valores. El equipo con el cuál se realizó la medición es un Testo 340. Los contaminantes medidos fueron SO₂ y NOx ya que ambos constituyen las principales emisiones de la Central Eléctrica Cayo Santa María.

En el caso de los SO₂ se demostró a través de la modelación de contaminantes que se encuentra por encima del límite permisible por lo que la evaluación de esta zona de estudio en cuanto a la calidad del aire por este contaminante es deficiente. En los demás contaminantes los valores fueron inferiores a los establecidos por la norma de emisión NC 39: 1999.

La planta es una alta consumidora de combustible fueloil, 9846 toneladas en el 2013. Cuenta con una potencia instalada de 29 MW de potencia distribuida de la siguiente forma:

- 7,7 MW en dos motores MAN (Representa el 46 % de la generación, 2013).
- 6,8 MW en cuatro motores Hyundai (Representa el 25 % de la generación, 2013).
- 14,4 MW en ocho motores MTU (Representa el 29 % de la generación, 2013).

Debido a la dirección en que soplan los vientos en esta zona, la mayor concentración de contaminantes se da en un área donde existe muy poca actividad humana, en zona de mangle y aguas bajas, de lo cual disminuye el posible impacto sobre la salud humana.

Recomendaciones.

Se recomienda a la empresa que priorice la existencia de equipos de medición como el flujómetro para establecer de forma más directa los índices de consumo de la empresa por cada tecnología, puesto que este constituye un índice de calidad muy importante y que solo se puede medir en el tanque de uso, donde son alimentados los motores MAN y Hyundai.

Se recomienda además que teniendo en cuenta la demanda, se trate de utilizar los motores en los porcentajes de carga donde la eficiencia sea máxima y el consumo de combustible al igual que las emisiones sea mínima.

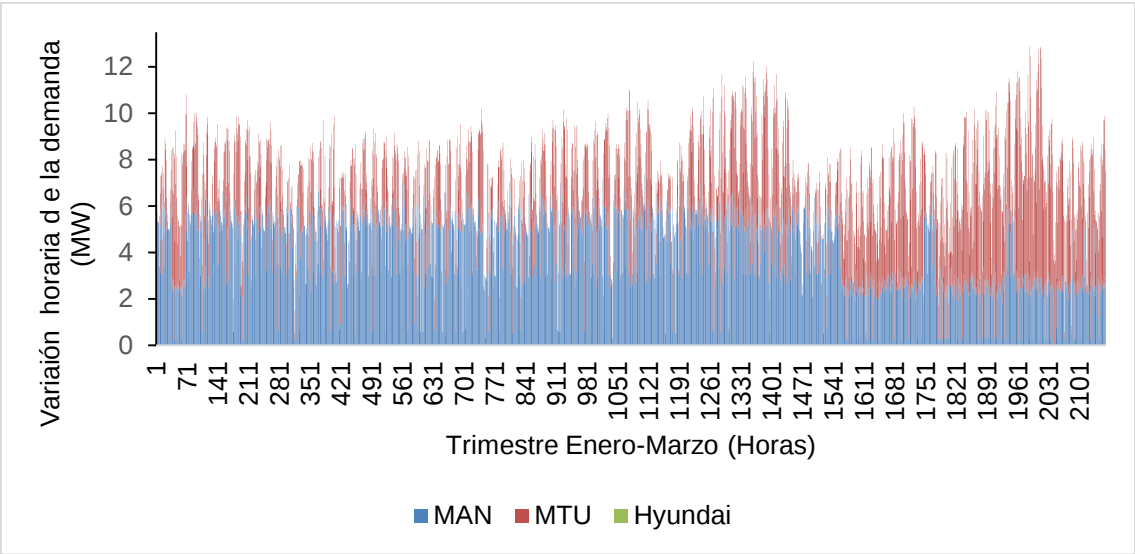
Bibliografía.

1. Suárez, J.A., *Energy, environment and development in Cuba, Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 16 (5). 2012. 2724-2731.
2. Office, S.N. *Statistical Yearbook of Cuba 2010*. 2010; Available from: <http://www.one.cu>.
3. Martínez R.M, V.O.y.J.J.V., *Contaminación Ambiental. Motores de Combustión interna*, U. UCLV, Editor. Septiembre de 2000: Nicaragua, Cuba.
4. Moya, I.H., *Energy scenario analysis at local scale integrating technology, air pollution and human health risk assessments*. March 2013, Vrije Universiteit Brussel: Bruselas.
5. *What Are the Six Common Air Pollutants?*. 2002; Available from: <http://www.epa.gov/oar/urbanair/6poll.html>.
6. Armendía, P.y.F., R, *¿Buenos Aires en Buenos Aires?*, in *Ciencia Hoy*. 1978, Buenos Aires.
7. Coyoacán, D., *Periférico 5000*, in *México D.F.* 2005.
8. Prado.R, *Manual de Gestión de la Calidad Ambiental* 1996.
9. CITMA, *Conferencia No.3. Tema II. Atmósfera.Caracterización y estructura. Fuentes de contaminación. Principales contaminantes: muestreo, cuantificación y efectos* 2003.
10. Ortiz.H.L, *Contaminación del aire y políticas ambientales en México*. Febrero de 2006.
11. Sibila.C, *Un gas altamente tóxico.*, in *Clarín*. 1997: Buenos Aires.
12. R.Álvarez., *Diagnóstico y pronóstico de la contaminación del aire en la zona de Nicaro*. Informe Resultado de Contrato 11225,INSMET-IPF, 1978.
13. Salud), O.O.M.d., *Guías para la calidad del aire*. 1999: Ginebra.
14. Peters, A., A.W. Döring, and W. H. Koenig, *Increased plasma viscosity during an air pollution episode: a link to mortality?* 1997, *Lancet*,: Lancet.
15. Katsouyanni, K.T., G. Spix, C, *Short-term effects of ambient sulphur dioxide and particulate matter on mortality in 12 European cities: results from time series data from the APHEA project*, in *Air Pollution and Health: a European* 1997, BMJ.
16. Morgenstern, H., *Ecologic studies in epidemiology: concepts, principles, and methods*, in. *Annu Rev Public Health*. 1995.
17. Office, S.N.S.Y.o.C. 2010; Available from: <http://www.one.cu>.
18. SWISSCONTACT, *Dispersión de la contaminación atmosférica causada por el tráfico vehicular. Aplicación de un modelo matemático para la ciudad de Guatemala y San Salvador*. Agosto de 2000.
19. Cinemat, *MEDIDA de la Contaminación Atmosférica Procedente de Centrales Térmicas.Medida de Emisiones*. 1991: Madrid.
20. Zaragoza, J., *Taller en redes de monitoreo continuo para calidad del aire México*. 21-23, 2002.
21. Gutiérrez, A.V.J., *El monitoreo atmosférico en la gestión ambiental del aire en México. Foro de monitoreo atmosférico y taller de gestión ambiental del aire*. 2006.
22. Kore, M., E, *Monitoreo de la calidad del aire en América Latina*, O.S.P. Programa de Control de Contaminación del Aire. CentroPanamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Organización Panamericana de la salud, Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud. , Editor. 1999, Lima.: Lima.
23. Ramírez, C.J., *Procedimiento integral de gestión energética y calidad del aire en fuentes fijas industriales para minimizar la contaminación atmosférica*. 2007, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas: Cuba.
24. Berlyand, M.E., *Modern problems of atmospheric diffusion and air pollution, Gidromet*. 1975, Leningrado.

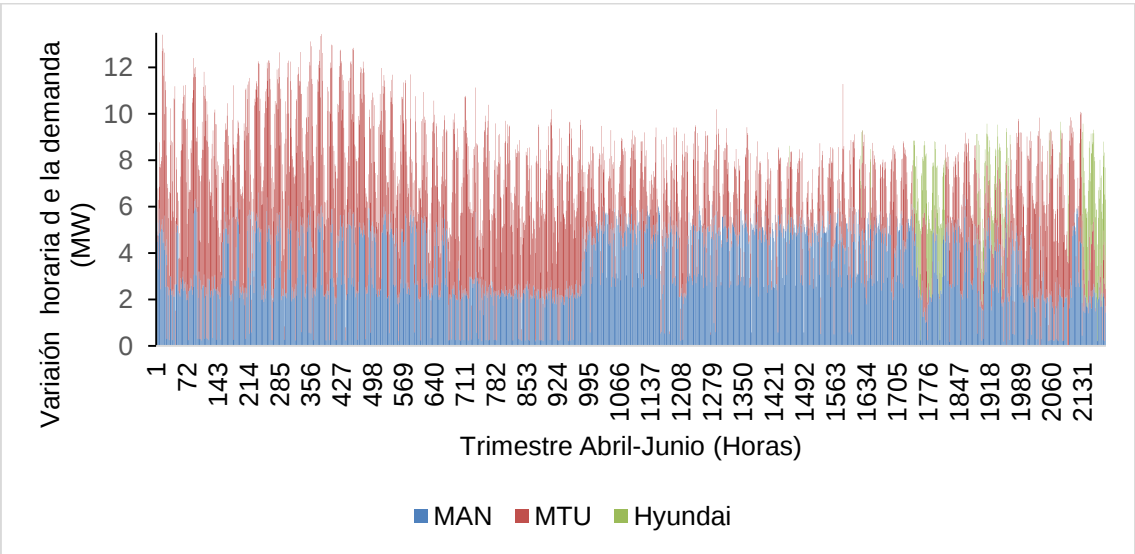
25. Álvarez, O., *Diagnóstico y Pronóstico de la contaminación del aire por SO₂ y H₂S en Moa. Modelación con consideraciones de terreno plano*. 1992: La Habana.
26. 39, N.C., *Calidad del aire: requisitos higiénico-sanitarios*. 1999.
27. Turtós, C.L., *Externalidades ambientales atmosféricas de la generación eléctrica*. Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía. CUBAENERGIA, 2004.
28. NC 111: 2004, *CALIDAD DEL AIRE—REGLAS PARA LA VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN ASENTAMIENTOS HUMANOS*
29. combustión., I.I.d.I.E.D.d.F.d.E.D.d.S.d., *Estudio de la Micro meteorología del Valle de México*. Tomo III: Metodología para la estimación de los flujos turbulentos en la capa superficial de la atmósfera Diciembre de 1993.
30. ECOM America Ltd. *Flue Gas Analysing System*. 2008; Available from: <http://www.rbr.de>.
31. Ballesteros., H.O.B., *Pronostico de la concentración de material particulado por chimeneas industriales en Bogotá.*, in *Facultad de Ciencias- Depatanento de Geociencia*. Diciembre de 2003., Universidad Nacional de Colombia.: Bogotá D.C.
32. Mundial, B., *Iniciativa del aire limpio. Gestión de la calidad del aire en las ciudades de América Latina*. Curso de aprendizaje a distancia, T. edición, Editor. Del 9 de mayo al 27 de junio de 2002.
33. Software., B.B.-L., *Industrial Source Complex Model (ISC3)*.
34. EPA, *Guía del usuario para el modelo de dispersión de complejos de fuentes industriales (ISC3)*. 1991. **Volumen 1**.
35. EPA., *Descripción de los algoritmos del modelo*. 1995. **Volúmen II**.
36. OBE, , *Reseña histórica Planta Eléctrica Cayo Santa María*. 2013.
37. Maps, G. 2014 12/5/2014]; Available from: <https://www.google.com/cu/maps>.
38. National Electric Union, *Management Manual (MAGEST)*. 2010, Cuba.
39. María, U.C.S., *Control de operadores fueloil*. 2013.
40. UEB Cayo Santa María, *Manual de operadores fueloil*. 2013.
41. EPA. *Factor Information REtrieval (FIRE) Software*. Technology Transfer Network Clearinghouse for Inventories & Emissions Factors 2004; Available from: <http://www.epa.gov/ttn/chief/software/fire>.

Anexos

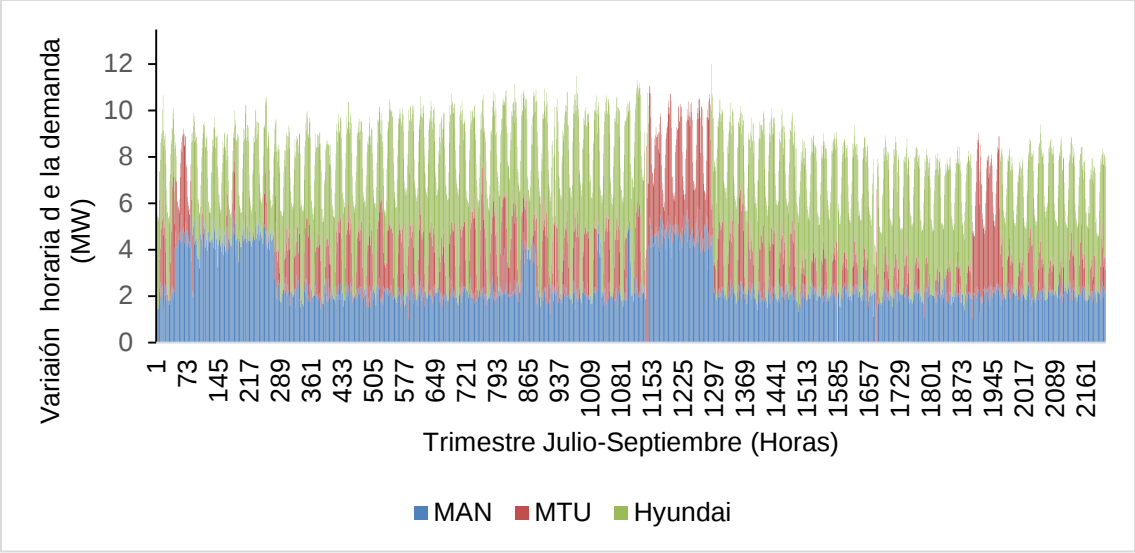
Anexo 1a: Cubrimiento de la demanda por trimestre de Enero –Marzo.



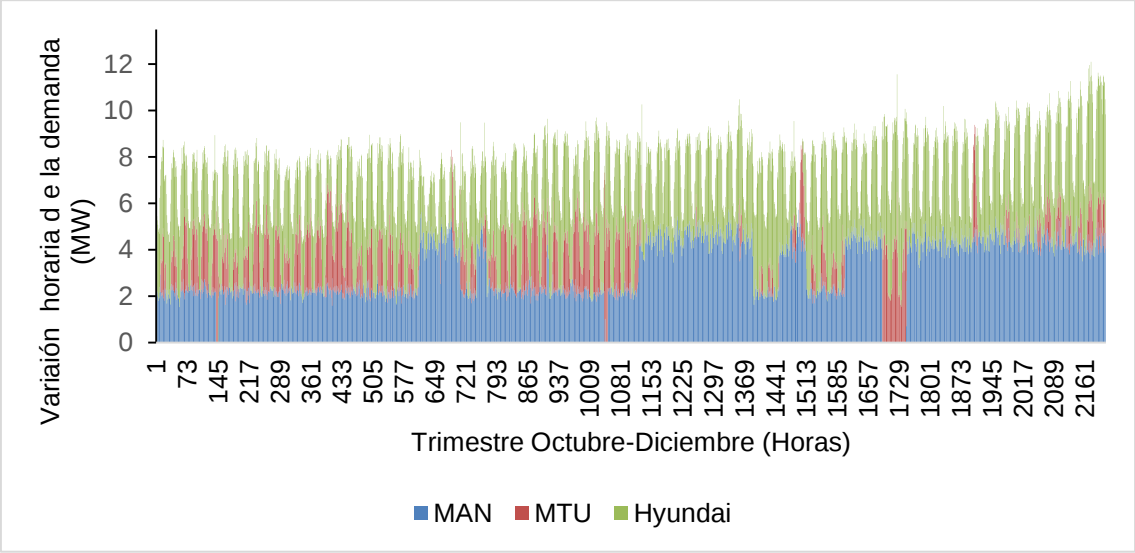
Anexo 1b: Cubrimiento de la demanda por trimestre de Abril –Junio.



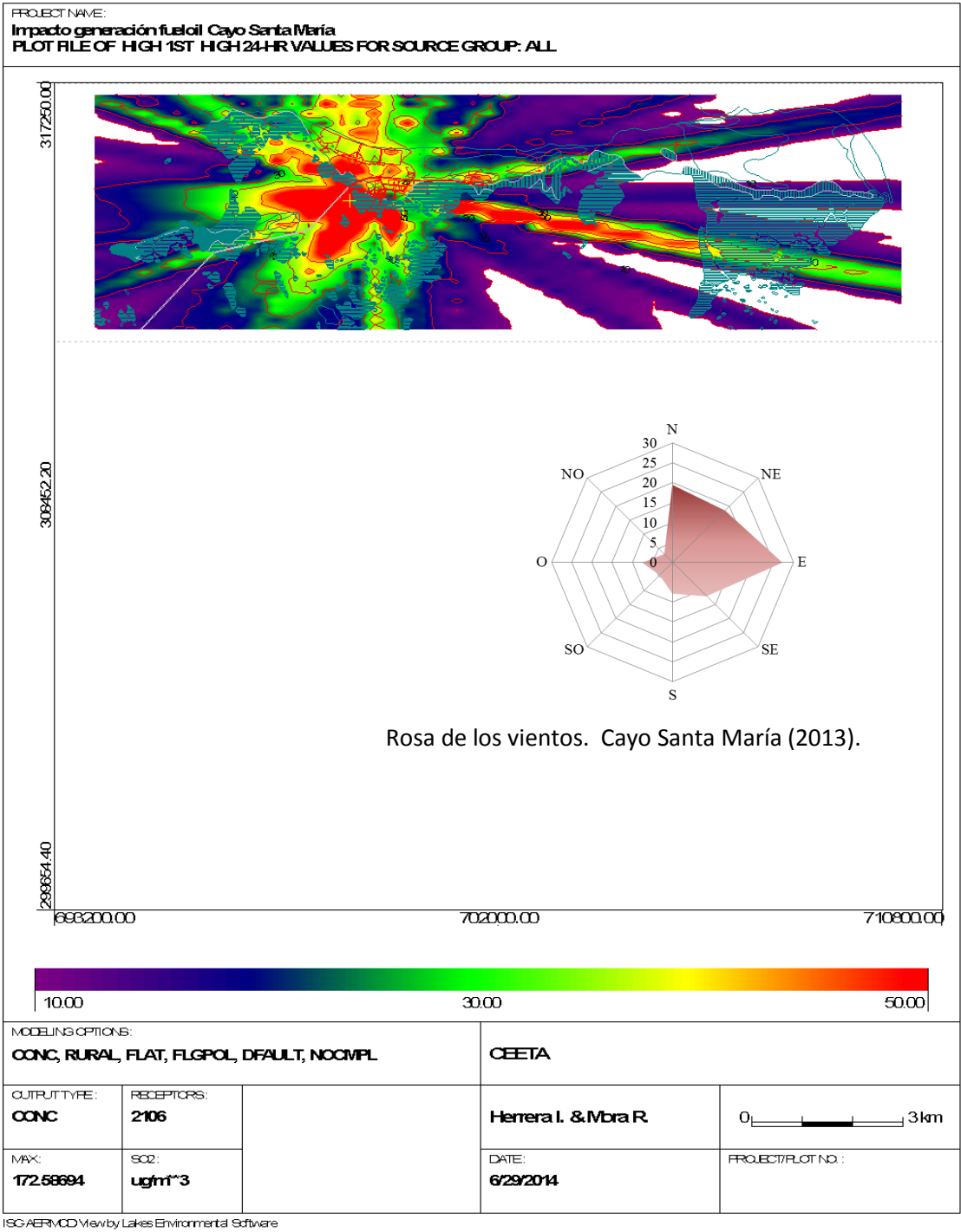
Anexo 1c: Cubrimiento de la demanda por trimestre de Julio –Septiembre.



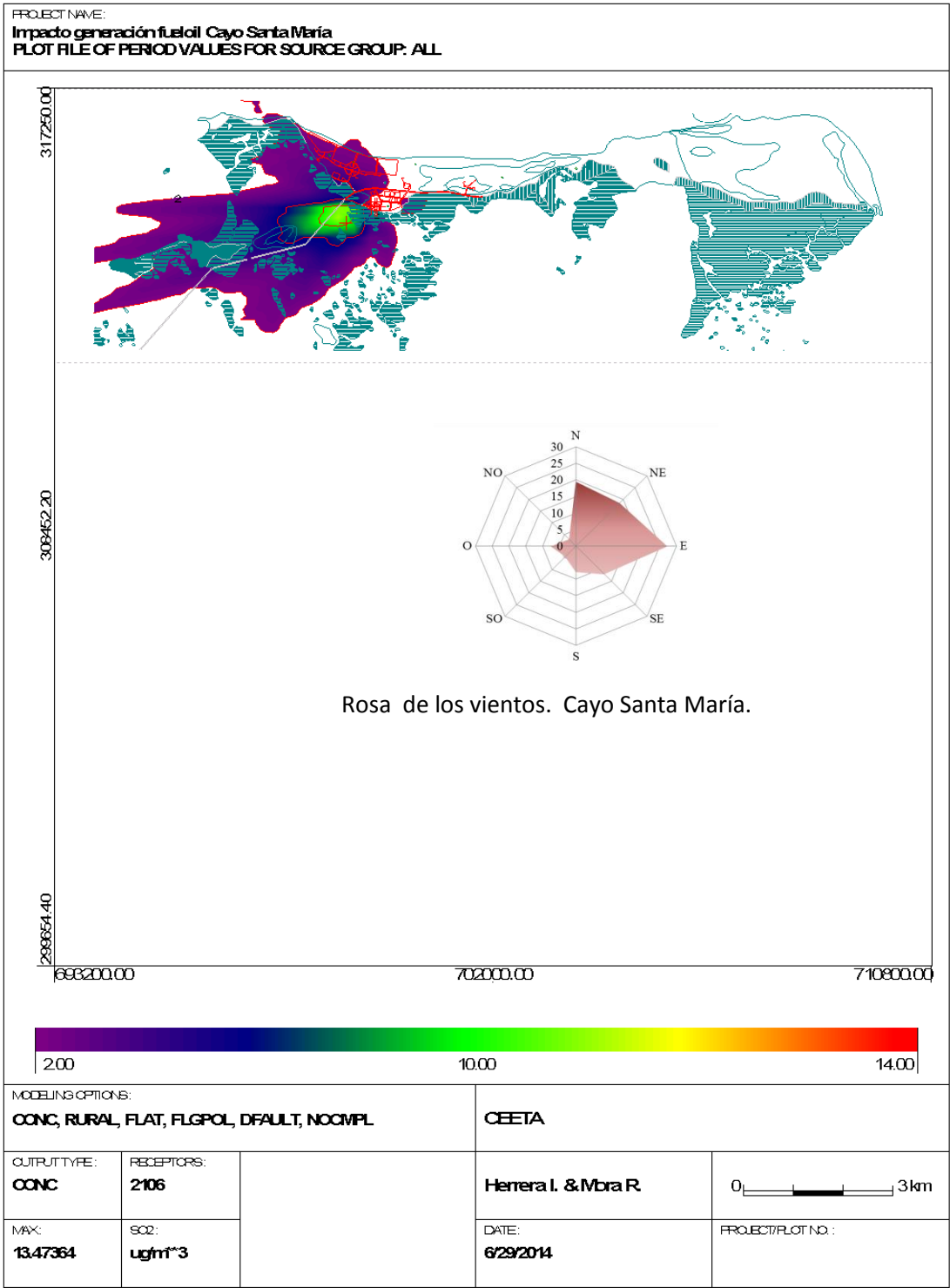
Anexo 1d: Cubrimiento de la demanda por trimestre de Octubre –Diciembre.



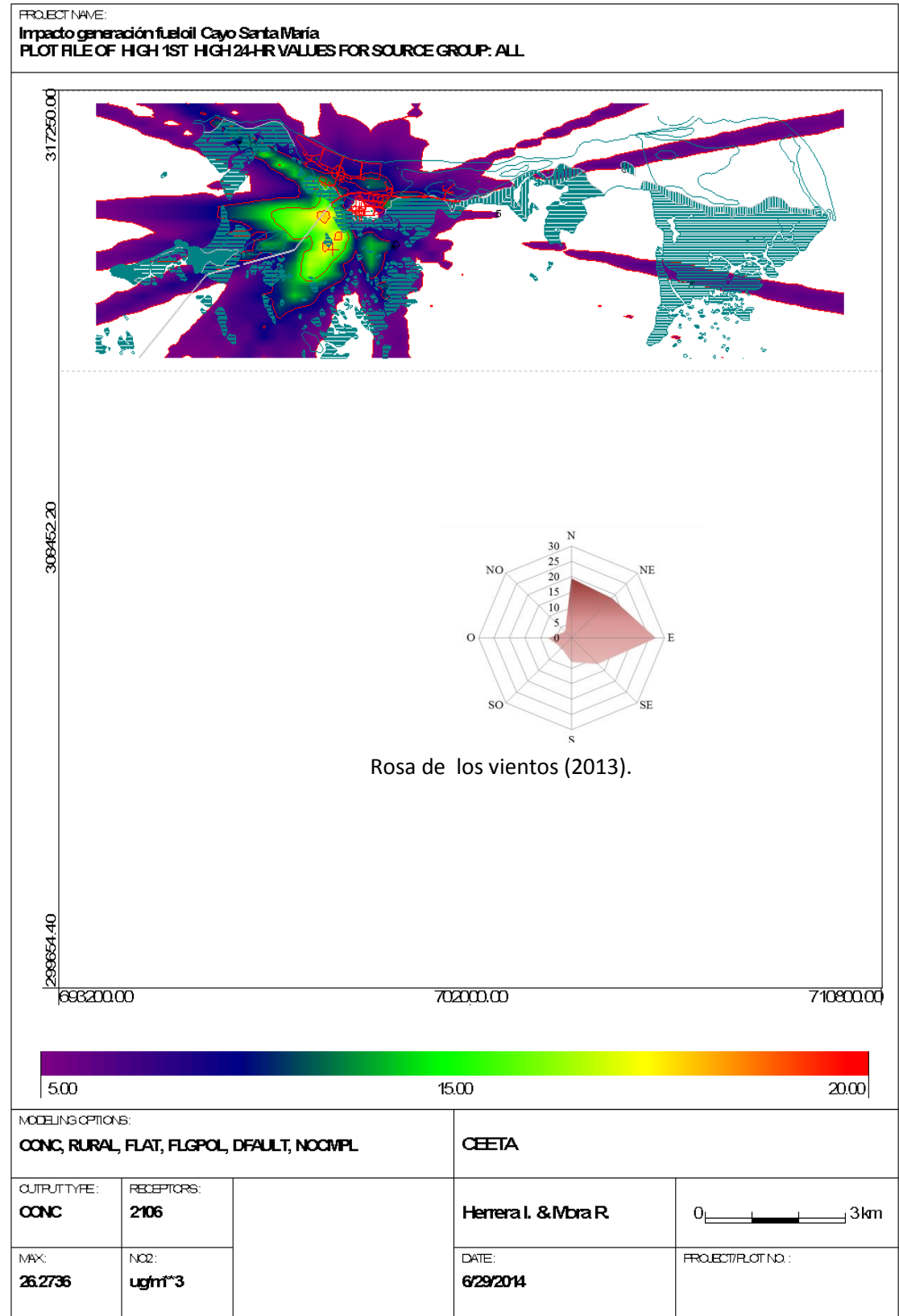
Anexo 2: Concentración de SO₂ para 24 horas.



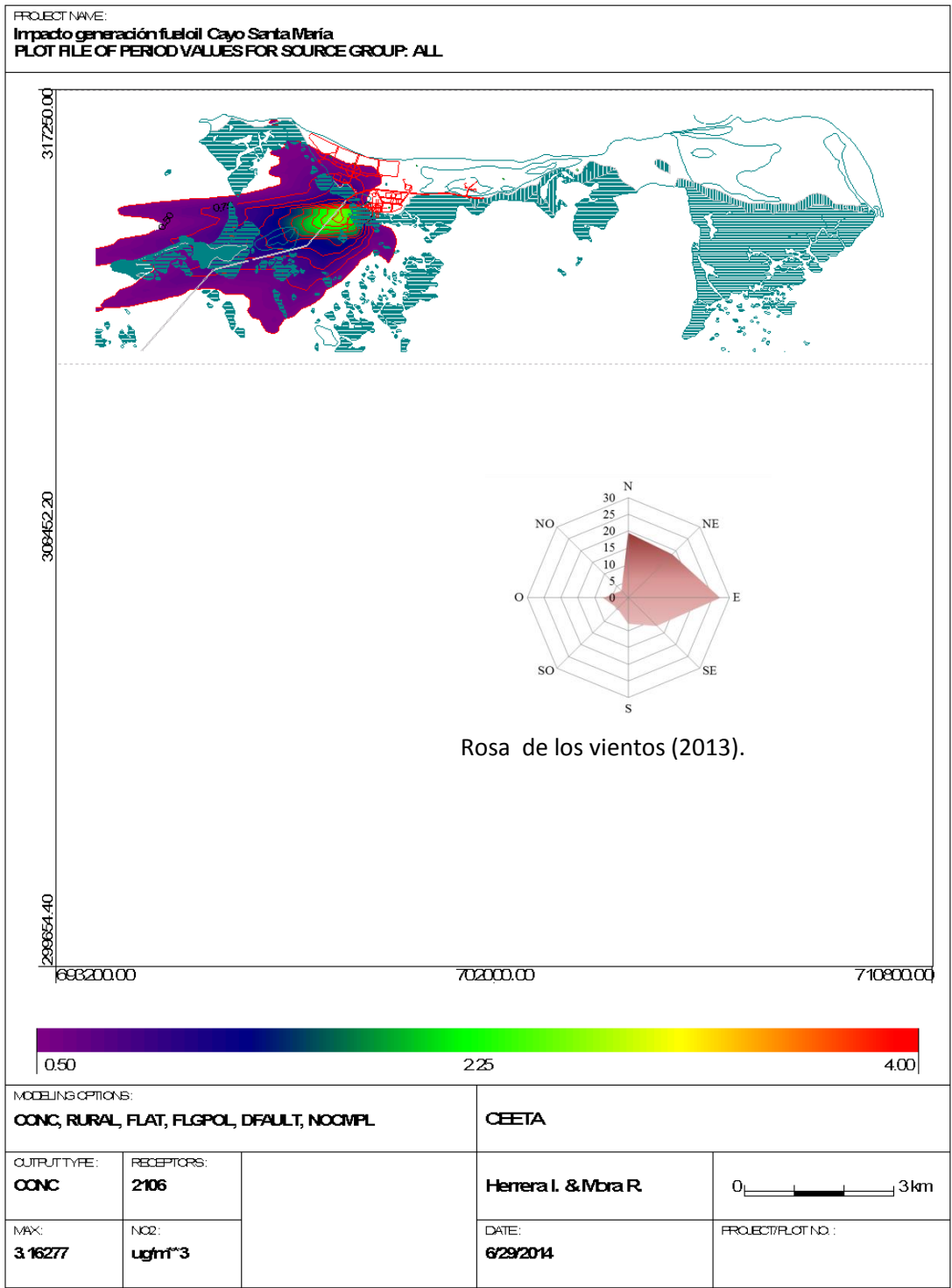
Anexo 3: Concentración promedio de SO₂ para el año 2013.



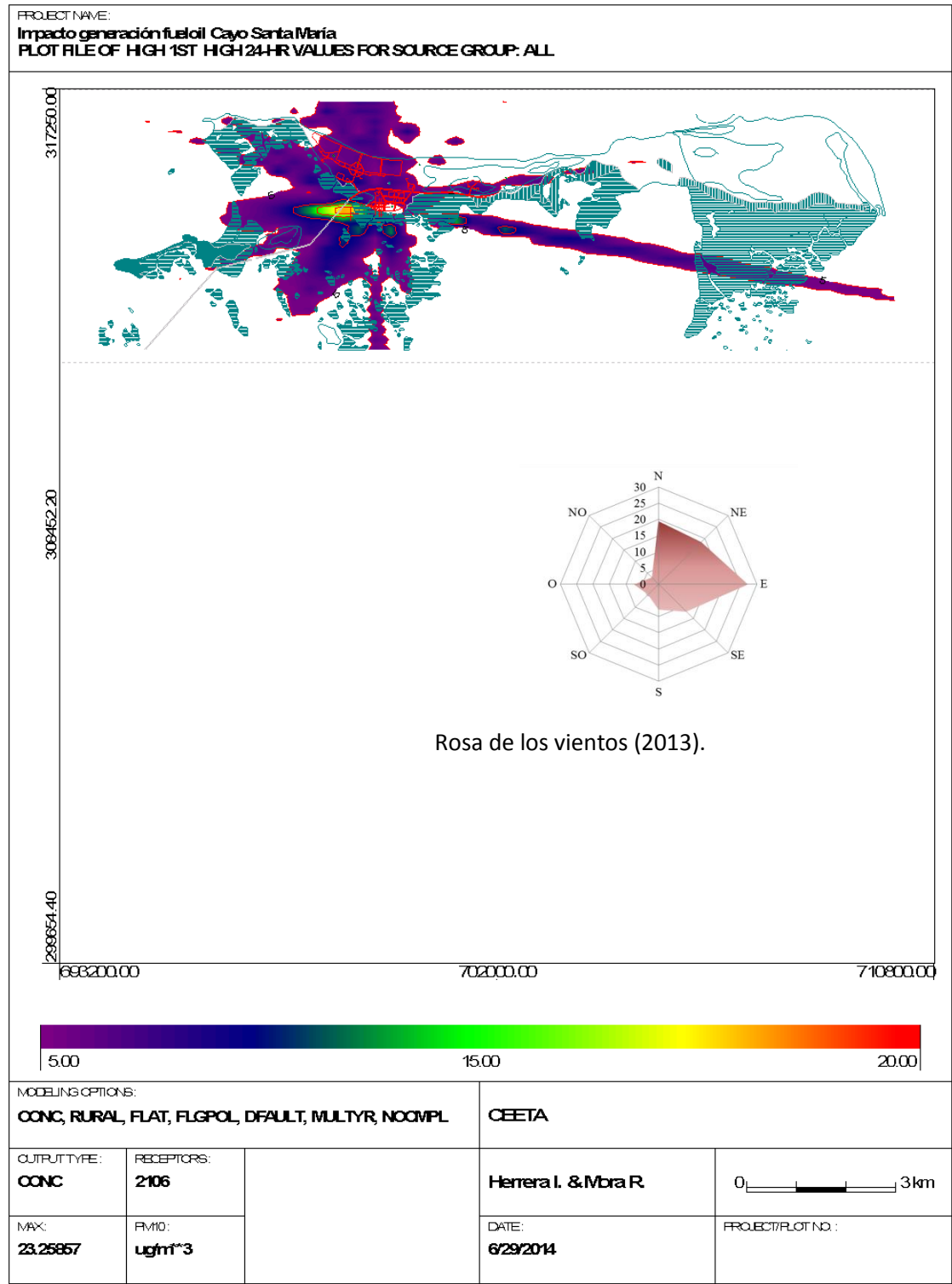
Anexo 4: Concentración de NO_x para 24 horas.



Anexo 5: Concentración promedio de NO_x el año 2013.



Anexo 6: Concentración de PM₁₀ en 24 horas.



Anexo 7: Concentración promedio de PM₁₀ para el año 2013.

