

UNIVERSIDAD CENTRAL MARTA ABREU DE LAS VILLAS

FACULTAD DE QUÍMICA Y FARMACIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



Metodología de diagnóstico técnico ambiental en fuentes fijas industriales para prevenir y mitigar los Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica y el impacto a la salud humana.

Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas

Autor: Ing. Vladimir Núñez Caraballo

Santa Clara

2014

UNIVERSIDAD CENTRAL MARTA ABREU DE LAS VILLAS

FACULTAD DE QUÍMICA Y FARMACIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



Metodología de diagnóstico técnico ambiental en fuentes fijas industriales para prevenir y mitigar los Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica y el impacto a la salud humana.

Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas

Autor: Ing. Vladimir Núñez Caraballo

Tutores: Dra. C. Mayra Morales Pérez

Dr. C. Julio Pedraza Gárciga

Santa Clara

2014

AGRADECIMIENTOS

A mis padres PABLO y ROSA por lo que siempre han sido y por lo que representan.

A mi esposa MERLY por su paciencia, apoyo, colaboración y ayuda infinita con mis metas.

A mis hijos LORENITA y LORVITO que siempre han estado a mi lado con amor y cariño.

A mi amigo Dr. C. JULIO PEDRAZA GARCIGA por su calidez humana y la atinada profesionalidad en sus orientaciones y contribuciones científicas.

A mi amiga Dra. C. MAYRA MORALES PÉREZ quien ha tenido gestos de hermandad y solidaridad para que pudiera vencer esta gran meta, además de su colaboración científica.

A mi amigo Dr. IDALBERTO quien siempre me ha brindado su ayuda fraternal y científica.

A mis amigas AYMÉ y DIANELYS quienes me ha ayudado con toda paciencia y cariño.

A mis amigas MARLENIS y MARILIN quienes siempre me han ayudado sin reparos.

A mis compañeros INOCENCIO, MARISELA, JULIA y NANCY por sus informaciones.

Al MSc. RICARDO quien nunca tuvo reparos para ayudarme cuando más lo requerí.

A la Dr. DANIELLYS quien me brindó su apoyo ilimitado.

A mi amigo Dr. ALDO MOYA por sus criterios científicos y la colaboración prestada.

A mi amigo MSc. WILLIAM por su comprensión humana y asimilación de mis dificultades.

A todos mis compañeros de trabajo del Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara, que con sus sugerencias y aliento han colaborado en la elaboración de la presente tesis.

A todos los que confiaron en mí, gracias.

SÍNTESIS

El presente trabajo, elabora una metodología de diagnóstico técnico ambiental a fuentes fijas industriales, para prevenir y mitigar los episodios críticos de contaminación atmosférica provocados por estas y minimizar el impacto a la salud de la población, aplicando métodos sin control agregado y con este. Se creó un nuevo método de clasificación de las fuentes fijas industriales, teniendo en cuenta los escenarios de la dirección del viento, “predominante y variable”, inducido este último por “fenómenos meteorológicos” y se elaboró un método de pronóstico de calidad del aire que tiene en cuenta el escenario de emisión cubano y aplica medidas de control de operaciones y operatividad del proceso productivo para reducir las emisiones en las fuentes industriales, ambos métodos se incorporaron a la metodología de diagnóstico técnico ambiental. Además se propone la utilización de equipos de reducción de la emisión, seleccionando la combinación de los ciclones y filtro de mangas como método con control agregado más efectivo. Los resultados permitieron clasificar a la planta de zeolita, ubicada al norte del poblado de San Juan de los Yeras, municipio de Ranchuelo, como una fuente fija industrial “parcialmente bien ubicada”, que sus emisiones de material particulado originan episodios críticos de contaminación atmosférica, bajo la influencia de los frentes fríos, exacerbando las crisis agudas de asma bronquial en 4,2 veces. Los pronósticos de calidad del aire y las medidas de control, permitieron minimizar estos episodios, con 24 horas de antelación su efectividad fue del 86% y la confiabilidad del $88,32 \pm 4,77\%$, influyendo positivamente en la salud de las personas, con un ahorro de los costos ambientales de \$ 396 854,82 MT y una factibilidad económica de \$ 381 788,80 MT, siendo el método más viable.

ÍNDICE

“Pág”

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	7
1.1 Origen y evolución de la contaminación atmosférica	7
1.2 Clasificación de las fuentes fijas industriales y los contaminantes atmosféricos.....	7
1.3 Material particulado.....	8
1.4 Diagnóstico técnico ambiental a fuentes fijas industriales	9
1.5 Inventario de focos de emisión, escenarios de máxima emisión	10
1.6 Determinación de las emisiones	11
1.7 Modelación de la dispersión de los contaminantes	14
1.8 Modelos de dispersión	15
1.8.1 Tipos de modelos.....	16
1.8.2 Variables a considerar para la aplicación del modelo Gaussiano.....	21
1.9 Pronósticos de calidad del aire	23
1.9.1 Validación de los resultados de los pronósticos de calidad del aire, monitoreo atmosférico.....	25
1.9.2 Análisis de las muestras.....	26
1.9.3 Control y aseguramiento de la calidad del análisis gravimétrico.....	27
1.10 Evaluación del Índice de Calidad del Aire	27

1.11 Control de la emisión de contaminantes provenientes de fuentes fijas industriales.....	27
1.12 Efectos de la contaminación por PM ₁₀ sobre la salud humana.....	28
1.13 Criterios económicos	30
Conclusiones parciales	31
CAPÍTULO 2. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTO.....	32
2.1 Método de clasificación de las fuentes fijas industriales para cada escenario de la dirección del viento.....	33
2.2 Método de pronóstico de calidad del aire para fuentes fijas industriales, bajo la incidencia de “fenómenos meteorológicos” para prevenir y mitigar ECCA ...	38
2.2.1 Términos controlados en la actualización del PCA.....	40
2.2.2 Comunicación del PCA a responsables e implicados.....	41
2.2.3 Plan de medidas de las fuentes contaminadoras para evitar ECCA	41
2.2.4 Validación del PCA	43
2.2.4.1 Selección de los sitios de monitoreo	43
2.2.4.2 Monitoreo atmosférico.....	43
2.2.4.3 Control y aseguramiento de la calidad de monitoreo.....	43
2.2.4.4 Selección de las técnicas de análisis.....	43
2.2.5 Evaluación del PCA.....	44
2.2.5.1 Evaluación de la confiabilidad	44
2.2.5.2 Evaluación de la discrepancia.....	44
2.2.5.3 Evaluación del porcentaje de efectividad del aviso.....	45
2.3 Caracterización de la zona de estudio.....	46

2.3.1 Inventario de fuentes fijas industriales.....	46
2.3.2 Evaluación del cumplimiento de la norma del Radio Mínimo Admisible de Protección Sanitaria para cada fuente.....	47
2.3.3 Contaminantes que emiten a la atmósfera cada fuente fija industrial	47
2.3.4 Población circundante a las fuentes fijas industriales	47
2.3.5 Caracterización geográfica, topográfica, físico natural, climática y de fenómenos meteorológicos	47
2.4 Cuantificación de la emisión	48
2.4.1 Diagrama de flujo del proceso, por áreas de actividades	48
2.4.2 Formas de emisión de los contaminantes a la atmósfera según diagrama de flujo	48
2.4.3 Balances de materiales para diferentes ritmos productivos representativos de la emisión, cuantificando la misma.....	48
2.5 Evaluación de la dispersión de los contaminantes emitidos por las fuentes fijas industriales.....	49
2.5.1 Modelación de la dispersión de los contaminantes.....	49
2.5.1.1 Datos de las fuentes de emisión.....	49
2.5.1.2 Datos de superficie	50
2.5.1.3 Datos meteorológicos.....	50
2.5.2 Índice de Calidad del Aire y clasificación de las fuentes fijas industriales de acuerdo EDV, según resultados de la modelación	50
2.5.3 Impacto de la calidad del aire sobre la población expuesta a estas condiciones.....	50
2.6 Control para reducir la emisión y mitigar los ECCA	50
2.6.1 Sin control agregado.....	51

2.6.2 Con control agregado.....	51
2.7 Evaluación de la emisión con la aplicación de sistemas de control	51
Conclusiones parciales	51
CAPÍTULO 3. CASO DE ESTUDIO.....	53
3.1 Caracterización de la zona de estudio.....	53
3.1.1 Inventario de fuentes fijas industriales.....	54
3.1.2 Evaluación del cumplimiento de la norma del Radio Mínimo Admisible de Protección Sanitaria	54
3.1.3 Contaminantes que emite a la atmósfera la planta de zeolita.....	55
3.1.4 Población circundante a la planta de zeolita.....	55
3.1.5 Caracterización geografía, topografía, medios físicos naturales, climática y de fenómenos meteorológicos en la zona de estudio	55
3.2 Cuantificación de la emisión de la planta de zeolita	57
3.2.1 Diagrama de flujo del proceso, por áreas de actividades	57
3.2.2 Formas de emisión de los contaminantes a la atmósfera según diagrama de flujo	58
3.2.3 Balances de materiales para diferentes ritmos productivos representativos de la emisión, cuantificación la misma.....	59
3.3 Evaluación de la dispersión de los contaminantes emitidos por la planta de zeolita..	60
3.3.1 Modelación de la dispersión de los contaminantes	60
3.3.1.1 Datos de la fuente de emisión.....	61
3.3.1.2 Datos de superficie	63
3.3.1.3 Datos meteorológicos.....	63

3.3.2 Índice de Calidad del Aire y clasificación de la planta de zeolita de acuerdo EDV, según resultados de la modelación	65
3.3.3 Impacto de la calidad del aire en el poblado de San Juan de los Yeras.....	65
3.4 Control para reducir la emisión de la planta de zeolita y mitigar los ECCA	65
3.4.1 Reducción de la emisión de la planta de zeolita con control agregado	66
3.4.1.1 Selección de los equipos de control de la emisión	67
3.4.1.2 Evaluación del ICA con la aplicación de reducción de la emisión con control agregado..	68
3.4.2 Reducción de la emisión sin control agregado.....	68
3.5 PCA a la planta de zeolita	68
3.6 Comunicación del PCA a responsables e implicados.....	70
3.7 Validación del PCA	71
3.7.1 Selección de los sitios de monitoreo.....	71
3.7.2 Monitoreo atmosférico.....	71
3.7.3 Control y aseguramiento de la calidad de monitoreo	72
3.7.4 Procedimiento para determinar el PM ₁₀	73
3.7.5 Análisis gravimétrico	73
3.8 Evaluación del PCA	74
3.9 Resultados del monitoreo del PM ₁₀ . Análisis estadístico	77
3.10 Relación entre la concentración del PM ₁₀ y las variables meteorológicas ..	78
3.11 Análisis estadístico del PM ₁₀ . Determinación de un modelo de pronóstico	79
3.12 Resultados de la aplicación del PCA en los días activos desfavorables.....	81
3.13 Impacto del PM ₁₀ emitido por la planta de zeolita en la salud de la población de San Juan de los Yeras	81

3.13.1 Comportamiento de las CAAB con el ICA en el periodo de monitoreo.....	81
3.14 Análisis estadístico	82
3.15 Modelo de pronóstico de las CAAB. Análisis estadístico.....	84
Conclusiones parciales	85
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS ECONÓMICO	86
4.1 Costos de los equipos de control de la emisión	86
4.2 Cuantificación de las posibles pérdidas económicas productivas en la planta de zeolita con la aplicación de PCA	89
4.3 Costos de los PCA	90
4.4 Costos ambientales y sociales del tratamiento de las CAAB que se ahorraron con los PCA	91
4.4.1 Costos directos.....	91
4.4.2 Costos Indirectos	93
4.4.3 Costo ambiental del tratamiento de CAAB.....	96
4.4.4 Factibilidad económica de los PCA.....	96
Conclusiones parciales	97
CONCLUSIONES	98
RECOMENDACIONES.....	99
REFERENCIAS.....	100
ANEXO	

ÍNDICE DE TABLAS

“PÁG.”

TABLA 1.1. ESCALAS PARA LOS ESTUDIOS DE MODELAMIENTO METEOROLÓGICO Y DE CALIDAD DEL AIRE.....	15
TABLA 1.2 MÉTODOS DE ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS DE CONTAMINANTES.....	26
TABLA 2.1 CLASIFICACIÓN DE LAS FUENTES FIJAS INDUSTRIALES DE EMISIÓN.....	35
TABLA 2.2 PLAN DE MEDIDAS SEGÚN LA CLASIFICACIÓN DE LAS FUENTES FIJAS INDUSTRIALES.....	38
TABLA 2.3 PLAN DE MEDIDAS PARA PRONÓSTICOS DE CALIDAD DEL AIRE A FUENTES FIJAS INDUSTRIALES.....	42
TABLA 3.1 EMISIÓN DEL PM_{10} PARA DIFERENTES RITMOS PRODUCTIVOS.....	62
TABLA 3.2 EMISIÓN DE GASES PARA DIFERENTES RITMOS PRODUCTIVOS.....	62
TABLA 3.3 REDUCCIÓN DE LA EMISIÓN CON EQUIPOS DE CONTROL.....	66
TABLA 3.4 ACCIÓN PARA REDUCIR LA EMISIÓN DE PM_{10} EN LA PLANTA DE ZEOLITA EN LOS DÍAS ACTIVOS DESFAVORABLES.....	70
TABLA 3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA CONCENTRACIÓN PROMEDIO DEL PM_{10}	77
TABLA 3.6 ESTADÍSTICOS DEL MODELO.....	79
TABLA 3.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS CAAB CON LA CPROM. PM_{10}	83
TABLA 3.8 ESTADÍSTICOS DEL MODELO.....	83
TABLA 4.1 COMPARACIÓN ECONÓMICA ENTRE LOS DIFERENTES EQUIPOS DE CONTROL DE LA EMISIÓN DE PM_{10} EN CUC.....	88

TABLA 4.2 COSTO ATENCIÓN PRIMARIA, EN CUP.....	92
TABLA 4.3 COSTO DEL MEDICAMENTO SEGÚN EL GRADO DE SEVERIDAD DE LAS CAAB, EN CUP.....	92
TABLA 4.4 COSTO DEL MEDICAMENTO COMPARABLE INTERNACIONALMENTE, EN CUC.....	93
TABLA 4.5 COSTOS DIRECTOS, EN CUP.....	93
TABLA 4.6 COSTOS DIRECTOS TENIENDO EN CUENTA CMCI, EN CUC.....	93
TABLA 4.7 PÉRDIDAS SALARIALES POR AUSENCIAS LABORALES CUP.....	94
TABLA 4.8 GASTO DE BOLSILLO ANUAL EN CUP.....	95
TABLA 4.9 COSTOS INDIRECTOS EN CUP.....	95
TABLA 4.10 COSTO AMBIENTAL EN CUP.....	96

ÍNDICE DE FIGURAS

“PÁG.”

FIGURA 2.1. ESQUEMA METODOLÓGICO PARA REALIZAR EL DIAGNÓSTICO AMBIENTAL PARA PREVENIR Y MITIGAR LOS ECCA.	33
FIGURA 2.2. PORCENTAJE DE FUENTES FIJAS INDUSTRIALES SEGÚN SU CLASIFICACIÓN.	37
FIGURA 2.3. FUENTES FIJAS INDUSTRIALES DEL INVENTARIO Y EL PROMEDIO DE DÍAS TRABAJADOS/MES; VILLA CLARA.	37
FIGURA 2.4. SECUENCIA PARA ELABORAR LOS PCA.	40
FIGURA 2.5. PORCENTAJE DE FUENTES FIJAS INDUSTRIALES PARCIALMENTE BIEN UBICADAS DEL INVENTARIO DE VILLA CLARA QUE SE LES APLICAN PCA.	46
FIGURA 3. 1. ZONA DE ESTUDIO, POBLADO DE SAN JUAN DE LOS YERAS.	53
FIGURA 3.2 ROSA DE LOS VIENTOS, DAD.	56
FIGURA 3.3 ROSA DE LOS VIENTOS, DAF.	56
FIGURA 3. 4. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE ZEOLITA.	57
FIGURA 3.5. BALANCE DE MASA TOTAL.	60
FIGURA 3.6 MODELACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE LAS PM_{10} . POBLADO DE SAN JUAN DE LOS YERAS	64
FIGURA 3. 7. PCA CON SIETE DÍAS (A), TRES DÍAS (B) Y UN DÍA (C) ANTES DEL ECCA.	69
FIGURA 3. 8 CAPTADOR DE PEQUEÑO VOLUMEN, CPV-8D/A.	73
FIGURA 3. 9. COMPORTAMIENTO DEL PORCENTAJE DE CONFIABILIDAD DEL PCA.	75
FIGURA 3.10. VALORES PROMEDIOS DE LA CONFIABILIDAD DE LOS PCA.	75
FIGURA 3.11. COMPORTAMIENTO DE LA DISCREPANCIA DE LOS PCA DE PM_{10}	76

FIGURA 3.12. COMPORTAMIENTO DEL NIVEL DE AVISO DEL ECCA Y SU % DE EFECTIVIDAD. ...	76
FIGURA 3.13. COMPORTAMIENTO DE LA CONCENTRACIÓN DE PM_{10} EN LOS DAD.....	78
FIGURA 3.14. COMPORTAMIENTO DE LA CONCENTRACIÓN DE PM_{10} EN LOS DAF.	78
FIGURA 3.15. COMPORTAMIENTO DE LAS CAAB DIARIAS.....	82

INTRODUCCIÓN

Dentro de los problemas ambientales a que están expuestos los ecosistemas y que se han agudizado a partir de la mitad del siglo pasado, está la contaminación atmosférica, principalmente originada por la actividad antropogénica, dado por la quema de combustibles fósiles, el crecimiento del desarrollo industrial y del transporte, que contribuye a la disminución de la capacidad asimiladora y regeneradora de la naturaleza (Martínez 2004).

Programas, técnicas y herramientas son usadas en materia de prevención, vigilancia y reducción de la contaminación atmosférica y los impactos que de esta puedan derivarse para el medio ambiente, entre los que se encuentran, el Índice de Calidad del Aire, red de monitoreo de calidad del aire, normas de emisión e inmisión de contaminantes, equipos de control de la emisión, pronósticos de calidad del aire, programas de Aire puro para Europa, de la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU, de Japón y otros (Martínez 2004; Stanley 2007).

Donde se localizan focos emisores de contaminantes a la atmósfera, con emisiones elevadas y continuas por encima de las normas y/o por debajo de estas pero que provienen de muchas fuentes, se originan episodios críticos de contaminación atmosférica, que se intensifican bajo condiciones meteorológicas desfavorables para el transporte y dispersión de los contaminantes, con impactos negativos al medio ambiente (Sánchez 2004; Ramírez 2006; Núñez 2007d; Pérez 2007; Núñez 2009a; Ramírez 2009; Cuesta 2010b).

Los pronósticos de calidad del aire como método sin control agregado a las fuentes fijas industriales, constituyen alternativas de prevención y reducción de los episodios de contaminación atmosférica, con la aplicación de medidas e informando a la población para

reducir exposiciones (Montes 2008a; Núñez 2007d; Núñez 2008a; Huertas 2010).

Entre los contaminantes del aire se encuentra el material particulado, el cual con diámetro aerodinámico menor igual a 2,5 y 10 μm ($\text{PM}_{2.5}$, PM_{10}) respectivamente, provoca efectos nocivos a la salud humana, elevando la morbilidad y mortalidad por enfermedades cardíacas y pulmonares, en la medida que se eleva la concentración del contaminante, tiende a deteriorarse la salud de los individuos expuestos a estas condiciones, esto se ha demostrado en estudios realizados por el Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global en las ciudades de Bogotá, Medellín, Buenos Aires, Lima, Santiago de Chile y Sao Paulo. Además, otros estudios en ciudades de Europa, Estados Unidos y Cuba, concuerdan con estos resultados (Folinsbee 1992; Harrison 2000; Fusco 2001; Alem 2005; Herrera 2011a).

Problema de estudio de esta investigación: Existen episodios críticos de contaminación atmosférica asociados a las emisiones de las fuentes fijas industriales y las metodologías de diagnóstico técnico ambiental en las fuentes solo consideran costosos equipos de control de las emisiones y no tienen en cuenta los escenarios de dirección del viento ni los pronósticos de calidad de aire que afectan la dispersión de estos contaminantes sobre asentamiento poblaciones con el consecuente riesgo a la salud.

Hipótesis: Si se aplica una metodología de diagnóstico técnico ambiental a fuentes fijas industriales que se clasifican como “parcialmente bien ubicada” y “mal ubicada”, de acuerdo a los escenarios de dirección del viento, se podrán prevenir y mitigar los episodios críticos de contaminación atmosférica sobre el asentamiento poblacional rural y/o urbano, disminuyendo el deterioro de la calidad del aire y la afectación a la salud de la población expuesta en este escenario ambiental.

Novedad científica: La elaboración de una metodología de diagnóstico técnico ambiental en

fuentes fijas industriales que se clasifican como “parcialmente bien ubicada”, de acuerdo a los escenarios de dirección del viento, que incorpora los pronósticos de calidad del aire para prevenir y mitigar episodios críticos de contaminación atmosférica y minimizar el impacto a la salud de la población en la zona afectada por las emisiones de estas fuentes.

Aportes de la investigación: El primer aporte es el nuevo método de clasificación de las fuentes fijas industriales, de acuerdo a los escenarios de dirección del viento “predominante” y “variable”, este último promovido por fenómenos meteorológicos. Sus resultados caracterizan y especifican los elementos necesarios para la aplicación de los pronósticos de calidad del aire a aquellas fuentes industriales que se clasifican como parcialmente bien ubicadas.

El segundo aporte está dado por los pronósticos de calidad del aire a las fuentes fijas industriales con siete días de antelación a la posible ocurrencia de los episodios críticos de contaminación atmosférica, como método sin control agregado, para reducir la emisión de los contaminantes a la atmósfera y mitigar los episodios críticos de contaminación atmosférica, con la aplicación de medidas regulatorias y de control de operaciones y operatividad del proceso productivo, con un nivel mínimo de afectación de la producción industrial.

El tercer aporte es el novedoso método del pronóstico de calidad del aire a las fuentes fijas industriales, con resultados de elevada calidad, el cual está basado en los inventarios de emisiones, en los escenarios de dirección del viento y en los modelos de dispersión de los contaminantes, sin necesidad de utilizar una red de monitoreo de calidad del aire de forma continua, muy costosa en los países en desarrollo.

Objetivo general: Elaborar una metodología de diagnóstico técnico ambiental en fuentes fijas industriales, que incorpore los pronósticos de calidad del aire para prevenir y mitigar los episodios críticos de contaminación atmosférica y disminuir el impacto a la salud de la

población afectada.

Para dar cumplimiento al objetivo general se desglosan siete objetivos específicos, los cuales se enumeran a continuación.

1. Revisar el estado del arte.
2. Cuantificar la emisión del PM_{10} y realizar la modelación de la dispersión para cada escenario de dirección del viento.
3. Elaborar un método de clasificación de las fuentes fijas industriales de acuerdo a los escenarios de dirección del viento.
4. Elaborar un método de pronóstico de calidad del aire, que considera medidas de regulación y control de operaciones y operatividad del proceso productivo, para fuentes fijas industriales, teniendo en cuenta los escenarios de la dirección del viento.
5. Elaborar la metodología de diagnóstico técnico ambiental en fuentes fijas industriales usando los pronósticos de calidad del aire para prevenir y mitigar los episodios críticos de contaminación atmosférica asociados a las emisiones.
6. Aplicar la metodología del diagnóstico técnico ambiental a un caso de estudio.
7. Evaluar los resultados económicos de la aplicación de la metodología del diagnóstico técnico ambiental en el caso de estudio.

En el **Capítulo 1**, se revisa el estado del arte sobre el origen y evolución de la contaminación atmosférica, clasificación de las fuentes fijas industriales y los contaminantes atmosféricos, detallando en el PM_{10} , en el diagnóstico técnico ambiental a fuentes fijas industriales, los inventarios de fuentes de emisión y escenarios de máxima emisión, los métodos para determinar las emisiones de contaminantes. Después se analiza, la modelación de la dispersión de los contaminantes, los modelos de dispersión, tipos de modelos, los pronósticos de calidad

del aire y la validación de los resultados, monitoreo atmosférico, análisis de las muestras, el control y aseguramiento de la calidad del análisis gravimétrico, la evaluación del Índice de Calidad del Aire y el control de la emisión de contaminantes provenientes de fuentes fijas industriales. Finalmente se expone un panorama de los efectos adversos del PM₁₀ a la salud humana y criterios económicos.

El **Capítulo 2**, contiene la elaboración de una metodología de diagnóstico técnico ambiental a fuentes fijas industriales para prevenir y mitigar los episodios críticos de contaminación atmosférica sobre el asentamiento poblacional rural y/o urbano, para lo cual se confecciona un nuevo método de clasificación de las fuentes fijas industriales, teniendo en cuenta los escenarios de la dirección del viento, “predominante y variable”, inducido por “fenómenos meteorológicos” y la evaluación del Índice de Calidad del Aire para cada caso, además se muestran las implicaciones sanitarias para cada clasificación de las fuentes fijas y los planes de medidas a ejecutar para darle solución a los problemas ambientales. Se elabora un método para pronósticos de calidad del aire a fuentes fijas industriales que tiene en cuenta las formas de emisión de los contaminantes, el sistema de monitoreo de calidad del aire, los escenarios de dirección del viento y la distribución de los asentamientos poblacionales en su entorno, propone la aplicación de medidas regulatorias y organizativas del proceso productivo a la fuente responsable de la emisión para prevenir y mitigar los episodios críticos de contaminación atmosférica. Se validan los pronósticos a través del monitoreo atmosférico, teniendo en cuenta el control y aseguramiento de la calidad del mismo y las técnicas de análisis y por último se evalúa la calidad y efectividad del mismo. Se proponen equipos para destruir, capturar y recolectar los contaminantes antes de ser emitidos a la atmósfera como método con control agregado.

En el **Capítulo 3**, se aplica al caso de estudio la metodología de diagnóstico técnico ambiental a fuentes fijas industriales para prevenir y mitigar los episodios críticos de contaminación atmosférica sobre el asentamiento poblacional, se utiliza el método de clasificación de las fuentes fijas industriales, teniendo en cuenta los escenarios de la dirección del viento y la evaluación del Índice de Calidad del Aire para cada caso, se aplica el método de los pronósticos de calidad del aire a la fuente fija industrial “parcialmente bien ubicadas” con el propósito de evitar y mitigar los episodios críticos de contaminación atmosférica, se emplean regulaciones y control del proceso productivo que minimizan la emisión. Se efectúa el análisis estadístico de los pronósticos de calidad del aire y se obtiene, una ecuación de pronóstico del PM_{10} , se evalúan de los pronósticos de calidad del aire el porcentaje de confiabilidad, la discrepancia y la efectividad del nivel de aviso. Se proponen equipos (ciclones y filtros de mangas) para recolectar el PM_{10} antes de ser emitidos a la atmósfera como método con control agregado y se evalúa su efectividad. Por último se realiza un estudio epidemiológico de las crisis agudas de asma bronquial y su relación con la contaminación por PM_{10} , se hace el análisis estadístico y se obtiene un modelo de pronóstico.

El **Capítulo 4**, aborda la realización del análisis económico, para lo cual se tuvo en cuenta los costos de los equipos de control de la emisión, su inversión total, valores dinámicos de factibilidad y el periodo de recuperación de la inversión, se cuantificaron las posibles pérdidas económicas productivas en la planta de zeolita con la aplicación de los pronósticos de calidad del aire, se obtuvieron los costos ambientales y sociales del tratamiento de las crisis agudas de asma bronquial que se ahorraron con los pronósticos de calidad del aire y se determinó la factibilidad económica de los pronósticos de calidad del aire.

CAPÍTULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 Origen y evolución de la contaminación atmosférica

Por contaminación del aire se entiende la presencia en la atmósfera de sustancias en concentraciones y por períodos de tiempo suficiente para afectar la salud de las personas, los animales y las plantas, así como causar perjuicios económicos o deterioro del entorno (Martínez 2004; CCB 2005).

Según su origen, la contaminación del aire se puede clasificar de forma natural o antropogénica. Dentro de los fenómenos naturales se encuentra la erupción volcánica, los incendios forestales, tormentas de viento sobre la superficie de los desiertos, erosión del suelo, putrefacción de materia orgánica, el polen, las bacterias y aerosoles de los océanos. La contaminación antropogénica se ha estado produciendo desde hace miles de años a través de las cuantiosas actividades realizadas por los seres humanos, esta se ha elevado vertiginosamente a partir de la mitad del siglo XX, debido principalmente al crecimiento de la población mundial y al exceso de consumo de bienes materiales y de servicios en los países desarrollados, a la industrialización, generación de electricidad y calefacción con la quema de combustibles fósiles, así como el transporte (WHO 2000; Martínez 2004; Stanley 2007).

La contaminación atmosférica puede tener carácter local, cuando los efectos de esta se originan cerca de las fuentes de emisión, o regional y planetario cuando se ve afectado el equilibrio de las zonas alejadas de los focos emisores y del planeta (WHO 2000).

1.2 Clasificación de las fuentes fijas industriales y los contaminantes atmosféricos

Las fuentes fijas industriales tienen diferentes clasificaciones, las cuales en dependencia del tipo de contaminante y la cantidad que emiten se clasifican como principal o del área, de

acuerdo al tipo de industria y a su radio de mínimo admisible se dividen en cinco clases (Comité 1999; DAMA – INAMCO 2001; DICTUC 2007; Cuesta 2010b).

Los contaminantes se clasifican como primarios y secundarios, los primarios son aquellos que se emiten a la atmósfera directamente de la fuente y dañan la flora y la salud de las personas, como el dióxido de azufre (SO_2) y material particulado. Entre los contaminantes secundarios se destacan aquellos generados por reacciones en la atmósfera de los contaminantes primarios, ejemplo el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y el ozono O_3 . Los contaminantes se presentan en formas de gases y partículas. Los gases incluyen sustancias como el monóxido (CO), óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x) compuestos orgánicos volátiles (COV), O_3 y otros.

El material particulado (PM) corresponde a partículas sólidas y líquidas que se encuentran en suspensión en la atmósfera cuya, composición química depende de su origen, ejemplos silicatos, carbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos, óxidos, metales, carbón, alquitrán, resinas, polen, hongos, bacterias, etc., (EPA 1992; ASTM 2005).

Los contaminantes del aire también se clasifican como contaminantes “criterio” y “no criterio”, los “criterio” se han identificado como comunes y perjudiciales para la salud y el bienestar de los seres humanos (EPA 1992; ASTM 2005), para los cuales se han establecido guías y normas con la finalidad de reducir los riesgos. La United States Environmental Protection Agency (USEPA) ha creado los estándares de calidad del aire, además de las Guías de la Organización Mundial de la Salud por sus siglas en inglés (WHO). En Cuba se aplican las Normas Cubanas NC 39: 1999, NC 111: 2004 y las Guías de la WHO 2005.

1.3 Material particulado

El material particulado es muy peligroso al medio ambiente, incluye a las Partículas Totales Suspendidas (PTS), con un díámetro aerodinámico “da” 10 μm , el PM_{10} (partículas

torácicas) con “da” 10 μm , el $\text{PM}_{2.5}$ (partículas respirables) con “da” 2,5 μm , PM_1 con “da” 1 μm y el $\text{PM}_{0.1}$ (partículas ultrafinas) con “da” 0,1 μm (EPA 1992; ASTM 2005; Spiro 1996; Stanley 2007; EPA 2012c).

Entre las fuentes principales de emisión de PM_{10} está la industria, la construcción, el transporte, el comercio, el polvo resuspendido y la quema agrícola, estos se mantienen en la atmósfera durante períodos de tiempo largos debido a sus bajas velocidades de sedimentación, siendo transportados a largas distancias de sus orígenes (EPA 2012c),

El PM_{10} puede ser químicamente inerte, pero puede adsorber sustancias químicas activas presentes en la atmósfera, otros pueden ser altamente corrosivos o tóxicos debido a su propia naturaleza química, en ambos casos son partículas muy agresivas al medio ambiente (EPA 1992; Rodríguez 2003; WHO 2005; ASTM 2005; Díaz 2007; EPA 2012c).

1.4 Diagnóstico técnico ambiental a fuentes fijas industriales

El diagnóstico técnico ambiental a fuentes fijas industriales proporciona la identificación del impacto medioambiental que generan las actividades productivas y permite establecer los objetivos y metas medioambientales (Calvo 2002).

En el caso de la problemática de contaminación atmosférica el diagnóstico técnico ambiental a fuentes fijas industriales se aplica para identificar, medir y evaluar los parámetros físicos y químicos de los contaminantes del aire y su impacto al medio ambiente, priorizando dentro de estos la ocurrencia de episodios críticos de contaminación atmosférica. La aplicación de medidas de control y mitigación de las emisiones acorde al diagnóstico y cumpliendo con la normatividad vigente, conllevan a minimizar su efecto negativo, transmitiéndole a la industria su concientización de que el impacto ambiental es de su responsabilidad y esté incluido en los costes de producción (Epstein 2000; Baca 2003; Rodríguez 2005; Núñez 2009b).

1.5 Inventario de focos de emisión, escenarios de máxima emisión

En el desarrollo de los inventarios de emisiones se considera la aplicación de medidas de aseguramiento y control de calidad en cada uno de los pasos para su desarrollo, con vista a resultados comparables a los estándares internacionales. Las características del inventario están determinadas por sus propósitos: desde como calcular las emisiones de una fuente puntual con el objeto de evaluar un punto de máximo impacto, hasta la determinación de un área de influencia ambiental para una evaluación ambiental estratégica, incluso una aplicación a mayor escala como un inventario regional requerido para un plan de descontaminación (EPA 1997; EPA 1999; DAMA – INAMCO 2001; CECONT 2002; Comité 2005; DICTUC 2007; Núñez 2007e; Ccicone 2007; Núñez 2008b; Núñez 2009f; EPA 2013).

Un inventario de emisiones contempla la lista completa de todas las fuentes o categorías de fuentes, su descripción detallada incluyendo la caracterización del área geográfica circundante, identifica todos los contaminantes emitidos por cada instalación para diferentes intervalos de tiempo (media hora, una hora, anuales). Especifica el índice de emisión y la explicación de cómo se estimaron, describe el estado físico en el que son liberadas estas emisiones, además de parámetros para la descarga y en el caso de chimeneas, se incluyen, índice de flujo volumétrico de descarga, temperatura y velocidad. Los resultados son usados en la modelación de la dispersión y en la evaluación del límite máximo de emisión según las normas, los estándares de calidad de aire y los impactos potenciales al medio ambiente (EPA 1997; EPA 1999; DAMA – INAMCO 2001; Comité 2005; DIGESA 2005; CCB 2005; Núñez 2007e; CEAN 2007; Núñez 2008b; DICTUC 2007; López 2007; Cuesta 2007b; Rodríguez 2009c; Núñez 2010b; Rodríguez 2011; Núñez 2011b; Núñez 2012a; Rodríguez 2012b; EPA 2013).

Los inventarios de emisiones describen las emisiones en condiciones normales y extremas de

operación, representando los escenarios críticos, las emisiones en las condiciones más adversas pueden ser modeladas asumiendo periodo de actividad máxima, equipos operando continuamente, emisión fuera de control, receptores sensibles cercanos, atmósfera estable, velocidad baja del viento, periodos sin precipitaciones, déficit de bioindicadores que capturen las emisiones (EPA 1997; EPA 1999; DAMA – INAMCO 2001; DIGESA 2005; Cuesta 2007a; Ccicone 2007; EPA 2012a; EPA 2013).

1.6 Determinación de las emisiones

Para calcular las emisiones de una fuente, por lo general, se eligen los datos provenientes de muestreos de emisión de la fuente específica o monitoreos de emisión continua con una estación automática instalada permanentemente sobre la fuente, ya que estos datos proporcionan la mejor representación de las emisiones de fuentes evaluadas. Aunque no siempre se encuentran disponibles y aún cuando lo estén, los escasos datos de esta naturaleza no reflejan la variabilidad de las emisiones reales en el tiempo y son específicos de la operación del equipo en condiciones muy particulares. El cálculo de las emisiones utilizando factores de emisión, constituye un método factible y adecuado, sin embargo, teniendo en cuenta que se trata de valores medios obtenidos de amplias series de datos, las emisiones calculadas por este método, para un determinado equipo, pueden ser diferentes a las emisiones reales de dicho equipo y no deben contemplarse como valores límites, lo cual deben ser comprobados por balances de materiales y/o monitoreo (EPA 1992; EPA 1995a; EPA 1997; EPA 1999; DAMA – INAMCO 2001; CECONT 2002; López 2004; Comité 2005; López 2005; DIGESA 2005; DICTUC 2007; Ccicone 2007; EPA 2008; Núñez 2010b; Núñez 2011c).

En Cuba la norma NC 242:2005 establece los datos tecnológicos que se han de tener en cuenta para la realización de un inventario de emisiones de contaminantes a la atmósfera generado

por fuentes puntuales industriales, además habilita a los especialistas y técnicos de herramientas prácticas, para efectuar un cálculo adecuado de dichas emisiones a la atmósfera.

➤ *Factores de emisión.*

Un factor de emisión relaciona la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera y la unidad de actividad (producción, consumo de energía, combustible). Estos se clasifican en dos tipos, los basados en procesos y los basados en censos. Los primeros se usan para estimar las emisiones de fuentes puntuales y se combinan con los datos de actividad recopilados, con encuestas o con balances de materiales; mientras que los segundos se usan para estimar las emisiones de las fuentes de área. En general, son apropiados utilizar los dos tipos de factores de emisión cuando los materiales que se emplean se consumen o combinan químicamente en los procesos, o cuando se producen bajas pérdidas de material, por liberación a la atmósfera, en comparación con las cantidades que se tratan en proceso. (AIRS 1990; EPA 1995a; EPA, 1997; EPA 1999; López 2005; López 2007; DIGESA 2005; Núñez 2011a; Núñez 2011c). Una de las principales referencias sobre los factores de emisión para contaminantes criterio es AP-42 (EPA 1995a), además de otras bases de datos como Factor Information Retrieval System “FIRE” (EPA 2004). Los factores de emisión tienen categorizaciones que van desde la “A” hasta la “E”, las cuales definen la calidad de los mismos y están basadas en la estimación de la confiabilidad de las pruebas usadas para desarrollar el factor (AIRS 1990; EPA 1995a).

➤ *Medición directa.*

La información obtenida a través de la medición directa es la más apropiada para verificar el cumplimiento normativo y los requerimientos que establezca la autoridad ambiental. Esta se realiza a través de procedimientos manuales o mediante la utilización de analizadores instrumentales. Al realizar mediciones directas para obtener resultados representativos,

confiables y de alta calidad es necesario cumplir con los requisitos para cada actividad productiva y tipo de contaminante como son: métodos de referencia, tiempo de muestreo, volumen de la muestra, instalaciones de plataforma de muestreo y equipos de muestreo (EPA 1995a; EPA 1997; EPA 1999; DAMA – INAMCO 2001; DICTUC 2007).

➤ *Balance de masas.*

El balance de masas hace referencia a la cuantificación de emisiones por balance de materia y energía, es un método alternativo y en ocasiones por las características del proceso industrial es el único que se puede emplear para determinar las emisiones de los mismos, es muy utilizado en situaciones donde se presentan reacciones químicas, se realizan operaciones que involucran variables físicas y se pierde material por liberación a la atmósfera. Para algunas fuentes este procedimiento proporciona mejores estimaciones que las suministradas por medición directa. (EPA 1997; EPA 1999; DAMA – INAMCO 2001; DICTUC 2007).

➤ *Modelación de emisiones*

Para ciertas categorías de fuentes industriales la relación funcional entre emisión y datos de actividad es más compleja que la relación lineal que asume el método de factores de emisión. El estudio de las emisiones, procesos múltiples y variables ambientales para algunas de estas fuentes han sido desarrollados detalladamente, para poder elaborar modelos computacionales complejos. La precisión de la estimación, depende siempre de la calidad de los datos ingresados y los supuestos del modelo. Por ello, antes de decidir el uso de esta técnica para un tipo dado de fuente, es importante comparar los datos necesarios para los modelos de emisiones, con los datos disponibles.

➤ *Encuestas*

Las encuestas constituyen una técnica comúnmente utilizada para recopilar datos de fuentes

fijas, de área o desarrollar factores de emisión específicos de una región. Tiene la ventaja de ser utilizado cuando no se dispone de otros en categorías de fuentes muy específicas y permite una amplia cobertura en la determinación de emisiones. Sin embargo, la desventaja que presenta, es su efectividad, esta depende de la calidad de información obtenida en los cuestionarios, así como de los diseños de los mismos.

En Cuba y principalmente en Villa Clara, se determina la emisión de las fuentes fijas industriales principalmente a través de mediciones directas a las chimeneas utilizando analizadores de gases del tipo ECOM SG-PLUS y Testo 300 XL-1 y aplicando factores de emisión de la EPA, que han sido validados en el territorio, con resultados satisfactorios para la determinación de la calidad del aire y aplicación de pronósticos de calidad del aire, los cuales deben continuar con su generalización (Núñez 2005a; Núñez 2005b; Núñez 2006a; Núñez 2006d; Núñez 2006e; Núñez 2010a; Núñez 2011a; Núñez 2012a).

1.7 Modelación de la dispersión de los contaminantes

Los contaminantes emitidos a la atmósfera son transportados y dispersados por el aire, influenciados por complejos factores tales como la cantidad de turbulencia en la atmósfera, la cual puede ser creada por el movimiento horizontal y vertical de la misma, las inversiones térmicas y la topografía compleja. La modelación de la dispersión del contaminante permite calcular la concentración de este a nivel del suelo y a diferentes distancias de la fuente (EPA 1995b; de Nevers 1995; López 2001; Bluett 2004; UNECE 2004; Herrera 2006; Núñez 2006b; Cabrera 2007; Carrillo 2012). Antes de aplicar un modelo de calidad de aire, deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones, para lograr resultados precisos (EPA 1995b).

- No existe un modelo capaz de responder apropiadamente a todas las situaciones posibles, aún dentro de una categoría específica (fuentes puntuales). Los fenómenos meteorológicos

asociados con las excedencias de los estándares de calidad ambiental son raras veces susceptibles de tratamiento matemático simple, requiriéndose del análisis caso por caso.

- La aplicabilidad de un modelo específico de calidad de aire depende de varios factores, incluyendo la complejidad meteorológica y topográfica del área, el nivel de detalle y precisión requerido, la competencia del personal a cargo de la modelación, los recursos disponibles y el nivel de precisión de los datos.

Las escalas espacial y temporal para la modelación del pronóstico de la calidad de aire deben ser correctamente definidas, debido a que estas determinan el tipo de requerimientos meteorológicos y otros datos, estas escalas se resumen en la tabla 1.1. (EPA 1995b).

Tabla 1.1. Escalas para los estudios de modelamiento meteorológico y de calidad del aire.

Escala	Alcance espacial (km)	Alcance temporal
Global	4 000 - 20 000	1 - 2 semanas
Sinóptica	400 - 4 000	1 día - 1 semana
Mesoescala	10 - 400	1 h- 1 día
Urbana	5 - 50	1 - 4 h
De vecindario	500 m - 5	1 min - 1 h

1.8 Modelos de dispersión

Es una representación matemática de los procesos de transporte, transformación y remoción de los contaminantes con el objetivo de pronosticar la calidad del aire (EPA 2001; Sánchez 2007c; Núñez 2008a; Huertas 2010). Los modelos pueden simular situaciones simples como una única fuente industrial puntual, con un solo receptor y condiciones constantes, hasta situaciones complejas de varias fuentes industriales, con varios receptores y variaciones de las condiciones atmosféricas. Los modelos permiten lograr varios resultados, los cuales se describen a continuación (Montes 2008; Turtós 2009; Huertas 2010; Carrillo 2012).

- La modelación de los posibles impactos ambientales por emisiones al aire en una determinada área de influencia, implica simular con una metodología apropiada la manera en que el medio ambiente es afectado por una determinada emisión y evaluar los efectos de la acción propuesta y de sus alternativas. En las emisiones se pueden analizar los efectos de descargas o escapes accidentales de gases tóxicos (Pierra 2004; Vallejo 2007).
- Predecir concentraciones de contaminantes en el tiempo y en el espacio, a través de la aplicación de ecuaciones de conservación de masa, ofrece la ventaja de poder estimar futuros factores de emisión en obras no construidas 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, también se puede aplicar a zonas industriales y fábricas actuales o futuras, para predecir episodios críticos de contaminación atmosférica (EPA 2001).

1.8.1 Tipos de modelos

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

- Modelos estadísticos. Son utilizados, cuando no se dispone de una clara interpretación científica de los procesos físico-químicos o no se cuenta 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 (EPA 2001; EPA 2003; DICA 2004).
- Modelos refinados. Se usan principalmente con fines regulatorios, los datos debe ser específico e incluye meteorología detallada, preferentemente micro meteorología de la zona a modelar, características topográficas, ubicación de fuentes y receptores, factores de emisión y concentración de fondo (EPA 2001; EPA 2003; EPA 2012b; Turtós 2012).
- Modelos de caja. Asume que los contaminantes emitidos a la atmósfera se mezclan

uniformemente en un volumen o caja de aire de emisiones finitas. Se establecen las dimensiones con viento a favor, de costado y verticales de la caja, además del periodo de tiempo de emisión de contaminantes, consideran a los contaminantes químicamente estables permaneciendo en el aire. (EPA 2001; EPA 2003; DICA 2004).

- Modelos de concentración. Son protocolos matemáticos que proporcionan estimaciones de concentración de contaminantes en función de una serie de parámetros meteorológicos, químicos, topográficos, de cantidad y velocidad de movimiento, estos modelos incluyen los Gaussianos y los numéricos-químicos.
- Modelos numéricos-químicos. Estos son más apropiados que los modelos Gaussianos para análisis de una fuente de área urbana, pero requieren de bases de datos extensas y complejas, limitante principal (EPA 2001; EPA 2003; DICA 2004; EPA 2012b).
- Modelos Gaussianos de difusión para penachos de chimeneas fijas “continuas”. Es la técnica más usada para contaminantes no reactivos. Proporciona una excelente aproximación matemática a la dispersión de contaminantes y han sido usados satisfactoriamente para simular la distribución de concentraciones de contaminantes sobre áreas urbanas e industriales con una escala de uno a menos de 50 kilómetros (EPA 2001; EPA 2003). El tamaño del área de la aplicación está limitado desde abajo, ya que los coeficientes del modelo Gaussiano no son válidos cerca de la fuente (distancias < 100 metros, sección 3.2.4) y el límite superior está dado por las condiciones estacionarias, las cuales deben prevalecer por el tiempo que toma una porción de aire en avanzar a través del área (EPA 1995b; EPA 2001; EPA 2003; DICA 2004).

Uno de los modelos más usado internacionalmente es el Gaussiano, debido a la confiabilidad de sus resultados y a la disponibilidad de los datos para su ejecución, Villa Clara coincide con

esta aplicación, con experiencia de diez años y con resultados validados por monitoreo, los cuales se deben de extender al resto del país.

Los valores medios horarios son simulados ya que el viento puede ser más o menos constante durante tal periodo, con velocidades promedio de dos m/s a cinco m/s. Esta limitación del modelo Gaussiano debe tenerse en cuenta para simulaciones mayores a los 20 km (EPA 2003).

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 y asume que el material proveniente de una fuente, es transportado continuamente en dirección de la velocidad del viento, estando las concentraciones más altas en el centro del penacho y las más bajas en los extremos (EPA 2001; EPA 2003). El desarrollo de estos modelos permite incluir más fuentes de emisión, calculando la concentración de un contaminante específico en un lugar determinado con el aporte de cada fuente, la mayoría de estos han sido utilizados por la EPA (EPA 1995b; EPA 2001; EPA 2003; DICA 2004).

Entre los software que utilizan este tipo de modelo están el CTSCREEN, SCREEN3, VALLEY, COMPLEX-I, SDM, ISC3, ISCST3, CALPUFF, etc., (EPA 2001; EPA 2003; DICA 2004). En el anexo uno aparece la descripción de los mismos, además de parámetros comparativos entre el CALPUFF y el ISCST3 que permiten elegir el modelo más propicio a utilizar en esta investigación.

El software seleccionado es el ISCST3, por cumplir los resultados con los requisitos que se desean alcanzar de calidad del aire, teniendo en cuenta el tipo de fuente, el contaminante que

emite, los datos meteorológicos, el tipo de terreno, el periodo a modelar y los receptores. Además se han validados resultados de fuentes similares en Villa Clara con este software a partir del año 2005 (Núñez 2006b; Núñez 2006c; Núñez 2009a; Núñez 2009b; Núñez 2009g).

El balance de materia del modelo Gaussiano que rige al software ISCST3 es:

$$\text{Velocidad de acumulación} = \text{Flujos de entrada} - \text{Flujos de salida}$$

El flujo de materia viene dado por la Ley de Fick, expresión 1.1.

$$\text{Flujo} = -k \frac{\partial c}{\partial n} \dots\dots\dots (1.1)$$

Donde K es la constante de dispersión turbulenta, la cual se determina a través de los coeficientes K_x y K_y y para lo cual se cumple $K_{\text{turbulencia}} \gg K_{\text{molecular}}$, c , es la cantidad de materia n , es la dirección X, Y, Z.

La ecuación diferencial del balance de materia es la 1.2.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = K_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \dots\dots\dots (1.2)$$

A continuación se describe la ecuación Gaussiana (1.3).

$$C_{xyz} = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z\mu} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2} \left\{ e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2} + e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2} \right\} \dots\dots\dots (1.3)$$

Donde C_{xyz} : es la concentración del contaminante a nivel del suelo en el punto X, Y, Z ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), X , distancia en la dirección del viento desde el punto de emisión de los gases (m), Y , distancia horizontal perpendicular a la dirección de la pluma (m), Z , distancia en dirección vertical (m), Q , flujo másico de contaminantes emitidos (mg/s), H , Altura efectiva de elevación de la pluma (m), μ velocidad del viento a la altura efectiva de la pluma (m/s), σ_y , coeficiente de dispersión horizontal de la concentración del contaminante (m), σ_z coeficiente de dispersión vertical de la concentración del contaminante (m)

El modelo calcula la elevación efectiva de la pluma, H , ecuación 1.4, la cual depende de las condiciones meteorológicas, de la temperatura, la velocidad de salida de los gases y el diseño de la chimenea, se utilizan las ecuaciones de Briggs (1972), considerando efectos de flotación y momentum (EPA 2000; EPA 2003). Para efecto de flotación la ecuación es la 1.5.

$$H = h_s + \Delta h + h_e \dots\dots\dots(1.4)$$

$$h_e = h_s + 1.6 \left(\frac{Fb^{1/3} x^{2/3}}{u_s} \right) \dots\dots\dots(1.5)$$

El factor convectivo Fb (m^4/s^3) se determina por la ecuación 1.6.

$$F_b = gr^2 v_g \left(1 - \frac{T_A}{T_G} \right) \dots\dots\dots(1.6)$$

Para los efectos del momentum se utiliza la ecuación de Bowers, 1979, en condiciones atmosféricas inestable por la ecuación 1.7 y para condiciones estables la 1.8.

$$h_e = h_s \pm \left(\frac{3F_m x}{\beta_j^2 u_s^2} \right)^{1/3} \dots\dots\dots (1.7)$$

$$h_e = h_s + \left(3F_m \frac{\sin(x\sqrt{s}/u_s)}{\beta_j^2 u_s \sqrt{s}} \right)^{1/3} \dots\dots\dots (1.8)$$

Donde, h_s es la altura de emisión modificada por el efecto de lavado debido a la forma de la abertura de la chimenea a la salida de los gases (m), h_e es la altura efectiva de la emisión (m), g es la aceleración de gravedad ($9,8 \text{ m/s}^2$), r el radio interno de la chimenea (m), u_s velocidad de salida de los gases (m/s), T_A temperatura del aire (K) y T_G temperatura de salida de los gases (K), F_m flujo del momentum (m^4/s^2), β_j coeficiente jet de ingreso ($\beta_j = 1/3 + u_s/s$), u_s velocidad del viento a la altura efectiva de la pluma (m/s), s parámetro de estabilidad $(g/T_A)(d/dz)$ y (d/dz) es el gradiente térmico (K/m)

Los coeficientes c_z y y son calculados por las formulas de Pasquill, Giffrod, Turner (1970), ecuaciones 1.9 y 1.10, los valores de los parámetros c , d , e y f , están dados en función de la

clase de estabilidad atmosférica, para cada distancia x, expresado en km.

$$\sigma_y = 465,11628(x) \tan(0,017453293[c - d \ln(x)]) \dots\dots\dots (1.9)$$

$$\sigma_z = ex^f \dots\dots\dots (1.10)$$

Se utiliza una fórmula de potencia (1.11) en las ecuación Gaussiana 1.1 y en la fórmula de elevación de la pluma, 1.8, ajustando la velocidad del viento observada a una altura de referencia.

$$u_s = u_{ref} \left(\frac{h_s}{z_{ref}} \right)^p \dots\dots\dots (1.11)$$

Donde u_{ref} es la velocidad del viento medida a la altura de referencia (m/s), z_{ref} altura de referencia, p valores adimensionales del exponente.

1.8.2 Variables a considerar para la aplicación del modelo Gaussiano

Las variables que conforman la base de datos de entrada para aplicar un modelo Gaussiano de dispersión y hacerlo consistente se enuncian a continuación (EPA 2003; DICA 2004; Jiménez 2007; Herrera 2011b).

- Parámetros de las fuentes. Los datos necesarios de todos los puntos de emisión son; ubicación física, la altura de las mismas sobre el nivel del suelo, el diámetro de la chimenea, la velocidad y temperatura de los gases de salida y la tasa de emisión puntual de cada contaminante (EPA 1995b; EPA 2001; DIGESA 2005; Jiménez 2007).
- La meteorología. Es el factor principal que determina el efecto de dispersión de la sustancia emitida a la atmósfera y de cómo es transportada en la dirección del viento. Los principales factores que determinan estos procesos son: la dirección y velocidad del viento, la turbulencia en la atmósfera y la altura a la cual es emitida la mezcla heterogénea. La dirección del viento es decisiva para establecer hacia dónde se dirige un contaminante

emitido. La velocidad del viento es importante, ya que, la dispersión en la atmósfera generalmente es mayor con altas velocidades del viento. En las chimeneas de las fuentes, la altura de la pluma disminuye con el incremento de la velocidad del viento y así, cerca de la fuente, el aumento de la concentración por la disminución de la altura de la pluma puede tener más peso que los efectos de la mayor dispersión. Finalmente, la atmósfera generalmente es turbulenta, debido a los efectos del viento (el cual causa turbulencia mecánica) y los efectos del calor (el cual causa turbulencia térmica) afectando los procesos de dilución y de mezcla de los contaminantes en la atmósfera, la turbulencia es la causa fundamental de la dispersión de los contaminantes en la atmósfera, en lugar de la difusión molecular (Berlyand, 1975; Gifford 1961; Gifford 1976; Núñez 2002; EPA 2003; Jiménez 2007; Núñez 2010a; Mandurino 2009).

- La estabilidad atmosférica. Se define como el transporte vertical del aire en ascenso y descenso, este movimiento se caracteriza por cuatro condiciones básicas. Primero condiciones estables, el movimiento vertical se inhibe, elevándose la concentración de los contaminantes, segundo condiciones inestables la porción de aire tiende a moverse continuamente hacia arriba o hacia abajo, disminuye la concentración de los contaminantes, tercero condiciones neutrales no propician el movimiento del aire, no favorece el transporte de los contaminantes y condiciones extremadamente estables, mínima circulación vertical del aire, ocurre la máxima concentración de los contaminantes. La estabilidad atmosférica se relaciona con el perfil de temperaturas, la altura, la nubosidad, velocidad y dirección del viento e insolación. Para lo cual se han diseñado diferentes tablas de clasificación, tales como las cartas elaboradas por Pasquill, Gifford, Cramer y Turner que permiten definirla a partir de datos de la velocidad del viento en

superficie (a 10 metros), la insolación diaria y la nubosidad nocturna, anexo dos y tres (Gifford 1961; Pasquill 1961; Pasquill 1974; EPA 2000; EPA 2003; Jiménez 2007; Rodríguez 2008; Rodríguez 2009a; Mandurino 2009; Rodríguez 2012a).

- Rugosidad del terreno. Representa las irregularidades topográficas que afectan el comportamiento de los contaminantes, generando turbulencia y dispersión de los mismos. Se define como la altura para la cual se anula la velocidad del viento en las cercanías del suelo (EPA 1995b; EPA 2003; Jiménez 2007).
- Datos de monitoreo de calidad de aire en la zona. Permiten validar el modelo utilizado, contrastándolo con valores de concentraciones reales (EPA 1995b; EPA 2000; EPA 2001; DIGESA 2005; Jiménez 2007).

Al disponer de datos reales, se debe modelar para cada una de las condiciones estacionales que se suponga puedan influir de manera más drástica en la dispersión de contaminantes; por ejemplo, para invierno y verano, día o noche, estación seca o húmeda, etc.

1.9 Pronósticos de calidad del aire

Un sistema de gestión de calidad de aire considera medidas de largo y corto plazo. Las primeras buscan reestablecer la calidad ambiental y las segundas evitar la exposición de las personas a niveles críticos para su salud, para lo cual se aplican los **Pronósticos de Calidad del Aire** (PCA) posibilitando la toma de medidas para cada caso, las cuales incluyen, fuentes responsables de la contaminación, sistema de salud pública y la información a la zona poblacional afectada (Curiel 1990; Núñez 2005a; Núñez 2005B; Núñez 2006a; Núñez 2006d; Núñez 2006e; Núñez 2010a; Centro 2011).

Actualmente los sistemas de PCA son más utilizados en las grandes ciudades, dado por el deterioro de la calidad del aire, causado por el desarrollo industrial y el incremento del

transporte automotriz y la cantidad de habitantes expuestas a estas condiciones que en asentamientos poblacionales y pueblos, bajo la influencia de las emisiones de fuentes fijas industriales que deterioran la calidad del aire hasta general Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica (ECCA) (Núñez 2006a; Núñez 2007a; Núñez 2007c; Núñez 2008a; Núñez 2010a; Centro 2011)

Para la elaboración de los PCA, se utilizan diferentes modelos, que aplican algoritmos estadísticos matemático para obtener un valor predicho de los contaminantes, utilizando variables predictivas y a predecir, ejemplo, el modelo de regresión lineal múltiple, primero con variables meteorológicas y concentración de contaminantes medidas, segundo con variables meteorológicas, emisiones reales esperadas y otras variables, tercero con variables meteorológicas e índices de condiciones meteorológicas observadas y pronosticadas. Otro modelo es el Neuronal basado en la Teoría del Caos y sistemas no lineales (Katz 2000; Núñez 2006d; Núñez 2007c; CENMA 2007; Núñez 2009c; Núñez 2010a; Centro 2011; Baldasano 2011; Baldasano 2012). Algunos de estos modelos son el CONAMA, Cassmassi, CALIOPE, WRF-IOWA, Neuronal del grupo de Pronóstico USACH", utilizados en pronosticar la concentración del PM₁₀ en California, México y Santiago de Chile.

Los modelos de PCA deben al menos cumplir dos condiciones para su aplicación, la primera que la confiabilidad de pronóstico, durante su periodo de validación sea superior al 65% y entregar el valor máximo de concentración de 24 horas esperado para el día siguiente en cada una de las estaciones de monitoreo de calidad del aire con un día de antelación (CENMA 2007; Centro 2011).

Los PCA requieren de red de monitoreo automática de contaminación para su elaboración, encareciéndolo grandemente, el modelo Cassmassi, requiere de la información de la calidad

del aire medida y de la información meteorológica pronosticadas la cual se obtienen de diferentes modelos entre el que se encuentra el Modelo Mesoescalar de quinta generación (MM5) elaborado por Pennsylvania University and National Center for Atmospheric Research (PSU/NCAR), además es necesario modelos de dispersión del contaminante (EPA 2003; Cabrera 2007; CENMA 2007)

En Cuba hay poca experiencia de aplicación de los PCA, dado principalmente por la limitante de los recursos materiales necesarios para su implementación, (red de monitoreo de calidad del aire y software para modelar) y porque los inventarios de fuentes fijas y emisiones están poco desarrollados, sin embargo en Villa Clara se trabaja con inventarios de contaminantes criterios desde el año 2005 (Núñez 2006a; Núñez 2006c; Núñez 2007a; Núñez 2007c; Núñez 2007d).

1.9.1 Validación de los resultados de los pronósticos de calidad del aire, monitoreo atmosférico

Existen diferentes métodos para evaluar la exactitud de los modelos de PCA, entre los que se encuentran la evaluación del sesgo, el análisis del error, correlación espacial y temporal, análisis de sensibilidad y juicio subjetivo de especialistas (Baldasano 2012). En términos generales los dos primeros son medidas de qué tan distanciados están los datos de una serie con respecto a su media, pero se ajustan para ver qué tan separados están los valores reportados por el modelo en cada punto de rejilla equivalente a una estación con respecto al valor medido y reportado por dicha estación. Para medir la calidad del aire se requiere del monitoreo atmosférico, con el objetivo de formular los estándares de calidad de aire y llevar a cabo estudios epidemiológicos que relacionen los efectos de los contaminantes con los daños en la salud (Díaz 1998; WHO 2000; EPA 2001; CECONT 2002; Martínez 2004; Comité 2004; DIGESA 2005; WHO 2005; EPA 2005; WHO 2006, Jerves 2007; Cuesta 2010a; Alejo 2012;

Cuesta 2012). Los métodos de monitoreo incluyen a los muestreadores pasivos, activos, analizadores automáticos, sensores remotos y los bioindicadores.

En los muestreadores activos las muestras de contaminantes se recolectan por medios físicos o químicos para su posterior análisis en el laboratorio. Para el material particulado, se succiona un volumen conocido de aire a través de un colector (filtro) durante un determinado periodo y luego se retira para el análisis, el diámetro de los filtros y de los poros, depende del equipo a utilizar y la muestra a tomar (PST, PM₁₀ y PM_{2.5}), se construyen de microfibras de vidrio, cuarzo, poliéster hilado y otros. Los equipos que se utilizan son captadores de bajo, medio y alto volumen e impactores de cascadas. (Nevers 1995; WHO 1999; WHO 2000; EPA 2000; Comité 2004; EPA 2006a; WHO 2006; Jiménez 2007; Alejo 2010).

1.9.2 Análisis de las muestras

El análisis de los contaminantes se hace según las características químicas y físicas de los mismos, en la tabla 1.2 se muestran métodos de análisis para diferentes contaminantes (EPA 1995a; NC 111: 2004; Jiménez 2007).

Tabla 1.2 Métodos de análisis de las muestras de contaminantes.

Contaminantes	Métodos de análisis de la muestra
COV	Ionización de llama
CO	Cromatografía gaseosa
NO _x	Espectroscopia
SO ₂	Espectroscopia
PTS, PM ₁₀ , PM _{2.5}	Gravimétrico, microbalanza electrónica, vibración de un filtro, atenuación o absorción de rayos beta y absorción de luz
Pb	Espectrometría de absorción atómica
O ₃	Quimioluminiscencia y espectroscopia

1.9.3 Control y aseguramiento de la calidad del análisis gravimétrico

El control y aseguramiento de la calidad del análisis gravimétrico se ha establecido principalmente por la EPA 2001, donde es necesario tener un “cuarto limpio” con temperatura y humedad controlada y calibraciones periódicas a las balanzas de medición. Para el pesaje de los filtros antes y después del muestreo, deben ser acondicionados de 24 a 48 horas, controlando su temperatura y humedad, eliminando factores que influyan en el peso de estos, además el blanco de laboratorio se considera cada 10 filtros y se utiliza como referencia para el pesaje final (Comité 2004; DIGESA 2005; Jiménez 2007).

1.10 Evaluación del Índice de Calidad del Aire

El Índice de Calidad del Aire (ICA) es un indicador global de la calidad del aire en un momento determinado, en una zona representada por una estación de monitoreo en específico. Las fuentes contaminadoras tienen la responsabilidad de cumplir con las normativas prescritas. El control individual sobre cada uno de los responsables de emisiones y cumplimiento las normativas es importante, aunque no suficiente, la calidad del aire puede verse afectada aun cuando los responsables de las emisiones cumplan con lo establecido, dado por la ubicación cercana de un elevado número de estos y/o las condiciones meteorológicas desfavorables para el transporte y dispersión de los contaminantes (Herrera 2006; Cuesta 2007b; Pérez 2007; Montes 2008; Carrillo 2012; Núñez 2012a; EPA 2012d).

Están establecidos los valores límites de cada sustancia, que indica la cantidad máxima aceptable y el valor guía que indica, la cantidad máxima deseable (WHO 2005; WHO 2006; Jiménez 2007). En Cuba se evalúan las concentraciones máximas admisibles por NC 39: 1999.

1.11 Control de la emisión de contaminantes provenientes de fuentes fijas industriales

El método para controlar la emisión de los contaminantes del aire que se emanan de fuentes

fijas industriales se dividen en dos grupos, el primero que no requieren de control agregado y el segundo que sí necesita control agregado (equipos). El método a elegir para controlar la emisión de contaminantes en una determinada fuente fija industrial depende de varios factores, entre los que se encuentran su estado de agregación molecular, de su concentración, de las características de la corriente de aire y de los requerimientos de energía (Seoanez 1997; De Nevers 1998; Núñez 2009d; Núñez 2009e; Núñez 2009g; Núñez 2013b; Núñez 2014).

El método para limitar la emisión de contaminantes del aire sin el uso de control agregado son; tecnológicas y/o procesos, de eficiencia energética, buenas prácticas de operación, cierre de plantas y aprovechamiento de condiciones meteorológicas apropiadas para la dispersión de contaminantes a través de pronósticos de calidad del aire (De Nevers 1998; Núñez 2014).

En segundo lugar el control agregado (requiere de equipamiento) es el método que se utiliza para destruir, capturar y recolectar los contaminantes antes de ser emitidos a la atmósfera. Para los contaminantes gaseosos se realiza a través de la combustión o incineración, adsorción, absorción y lavado y para los contaminantes “particulados” se utiliza la separación por inercia y gravedad (sedimentación), o colectores mecánicos, filtración, precipitación electrostática, lavadores o colectores húmedos y sistemas combinados. En el anexo cuatro aparece una tabla comparativa de los principales métodos básicos para este contaminante (Brown 1965; Warren 1991; Ulrich 1992; De Nevers 1998; Gisella 2008; Núñez 2013b).

1.12 Efectos de la contaminación por PM₁₀ sobre la salud humana

Los efectos de la contaminación repercutieron a partir de una serie de episodios que tuvieron lugar en los países industrializados durante la primera mitad del siglo XX. Los casos ocurridos en el Valle de Mosa, Bélgica en 1930, en Donora, Pennsylvania, EEUU en 1948 y la catástrofe de Londres, en 1952, son muy representativos, estas situaciones ocasionaron un aumento de la

mortalidad y morbilidad, evidenciando que los niveles altos de contaminación atmosférica se asocian causalmente con un aumento de muertes tempranas (Folinsbee 1992; Dockery 1993).

El tamaño de las partículas es determinante para sus efectos en la salud humana, por su capacidad de penetración en el árbol respiratorio y su permanencia en suspensión en el aire, cuanto más pequeña es una partícula (menor o igual a PM_{10}), más tiempo permanecerá en suspensión en el aire y más profundamente penetrará en el pulmón, permaneciendo en los alvéolos pulmonares por años. Las evidencias actuales se basan principalmente en estudios que utilizan el MP_{10} como indicador de exposición. (Buringh 2000; HEI 2000; Wong 2002; Pope 2002; WHO 2003; WHO 2005; HEI 2004; Stranger 2005).

La evidencia epidemiológica demuestra efectos adversos de las partículas luego de exposiciones tanto de corto como de largo plazo, tales como afectación a los sistemas respiratorio y cardiovascular, disminución del rendimiento físico, agudización de las manifestaciones clínicas e incremento de la mortalidad en personas con neumopatías o cardiopatías crónicas, incidencia de cáncer pulmonar, abarcando a niños, a adultos y a varios grandes grupos susceptibles dentro de la población general. (Romieu 1996; WHO 2000; Wichmann 2000; Katsouyanni 2001; Fusco 2001; Gauderman 2002; Oyarzún 2004; Núñez 2005a; WHO 2005; Núñez 2006a; Núñez 2007a; Núñez 2007b; Ko 2007; De la Vega 2010; de la Vega 2011; Tramuto 2011; Herrera 2011a; Herrera 2012a).

Un número importante de estudios realizados en distintas ciudades del mundo ha encontrado que, el valor de la norma de calidad del aire no ofrece protección completa, pues no se han identificado los umbrales bajo los cuales no ocurren efectos perjudiciales, específicamente con el material particulado, existen evidencias que por cada $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de este contaminante en aire ambiente, la mortalidad total se incrementa en un 6% y puede aumentar el riesgo de

muerte por enfisema en un 32%, por bronquitis y asma en un 19% y por enfermedad cardiovascular en un 9%. Investigaciones realizadas en la Ciudad de La Habana, han reportado concentraciones elevadas de contaminantes atmosféricos en las zonas céntricas, asociadas a mayores frecuencias de enfermedades y síntomas respiratorios en grupos de riesgo residentes en zonas expuestas y de mayor densidad demográfica, entre estas el municipio Centro Habana (Pope 1993; Romieu 1995; Pope 1995; Illabaca 1999; WHO 1999; Harrison 2000; Molina 2001; Molina 2003; Romero 2004; Sánchez 2004; Alem 2005; Romero 2006; Ramírez 2006; Sánchez 2007a; Ramírez 2009; Lujan 2008; Ramos 2010; Huertas 2012; Herrera 2012b).

Los efectos de la contaminación aérea sobre la salud se dividen en cuatro grupos, primero los efectos respiratorios a corto plazo (horas o días) o efectos agudos que ocurren repentinamente, los efectos respiratorios a largo plazo o crónicos que se caracterizan por su persistencia en periodos de tiempo largos (años), el tercero, cáncer al pulmón y por último efectos no-respiratorios. Las reacciones que produce la contaminación atmosférica en la salud humana se fundamenta en estudios toxicológicos y epidemiológicos (Peters 1999; Hernández 2000; Pope 2002; Samet 2000; Molina 2001; Cohen 2004; Suárez 2010; Tramuto 2011).

1.13 Criterios económicos

Para un proceso existente donde ya se realizó una inversión o su monto no es considerable, el objetivo usual es el de maximizar la ganancia económica. Cuando en un problema se deben tomar en consideración la inversión y los beneficios económicos en un horizonte de tiempo apreciable, es imprescindible el cálculo de los flujos de efectivo. Los beneficios económicos anuales representan un criterio que puede brindar buenos resultados, pero es preferible relacionar la inversión y las ganancias mediante otros criterios como los beneficios globales en el espacio de tiempo considerado, el retorno sobre la inversión (relación ganancia/inversión),

el plazo de recuperación de la inversión (relación inversión/ganancia). Es conveniente lograr valores altos del retorno de la inversión o lo que es igual, menores tiempos de recuperación de la inversión (Perry 1984; Mayo 1997).

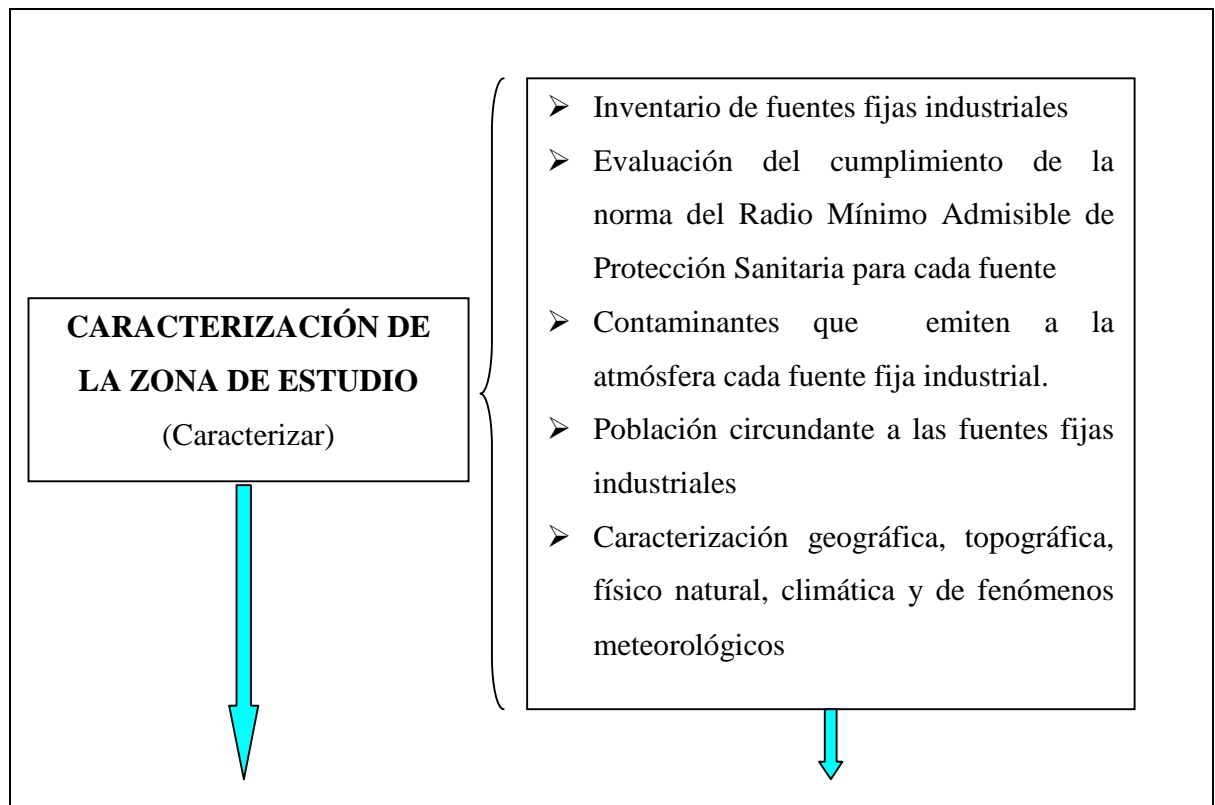
Las inversiones que dan lugar a tratamiento de los efectos medio ambientales negativos, originados por los procesos industriales tienen que ser una prioridad para los directivos de las fábricas. El medio ambiente que contamina la industria es responsabilidad de esta, por lo que dentro de sus costes tiene que estar planificadas las transformaciones que dan solución a estos problemas (Common 2005; Bartelmus 2007).

Conclusiones parciales

1. El diagnóstico técnico ambiental a fuentes fijas industriales permite identificar, medir y evaluar las emisiones de contaminantes del aire y su impacto al medio ambiente.
2. Los pronósticos de calidad del aire a fuentes fijas industriales basado en los inventarios de emisiones, propicia la aplicación de medidas preventivas para reducir el deterioro de la calidad del aire que da lugar a episodios críticos de contaminación atmosférica.
3. En países que no poseen infraestructura de redes de monitoreo de la calidad del aire, los inventarios de emisiones, brindan la información imprescindible para realizar estudios de calidad del aire.
4. Estudios epidemiológicos y toxicológicos evidencian los efectos adversos a la salud del material particulado debido el tamaño de las partículas y por su variada composición química, siendo las afecciones respiratorias las de mayor incidencia.

CAPÍTULO 2. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTO

La metodología seguida en esta investigación, para realizar diagnóstico técnico ambiental a fuentes fijas industriales y prevenir y mitigar los ECCA se muestra en la figura 2.1 y se explica en el capítulo. Para esta metodología se elabora un método de clasificación de las fuentes fijas industriales de acuerdo a los Escenarios de Dirección del Viento (EDV) inexistentes en la literatura nacional e internacional (aporte) y se integra un método de PCA para fuentes fijas industriales, modificado acorde a las condiciones reales de trabajo de estas, como método indirecto de control de la emisión de contaminantes a la atmósfera (aporte).



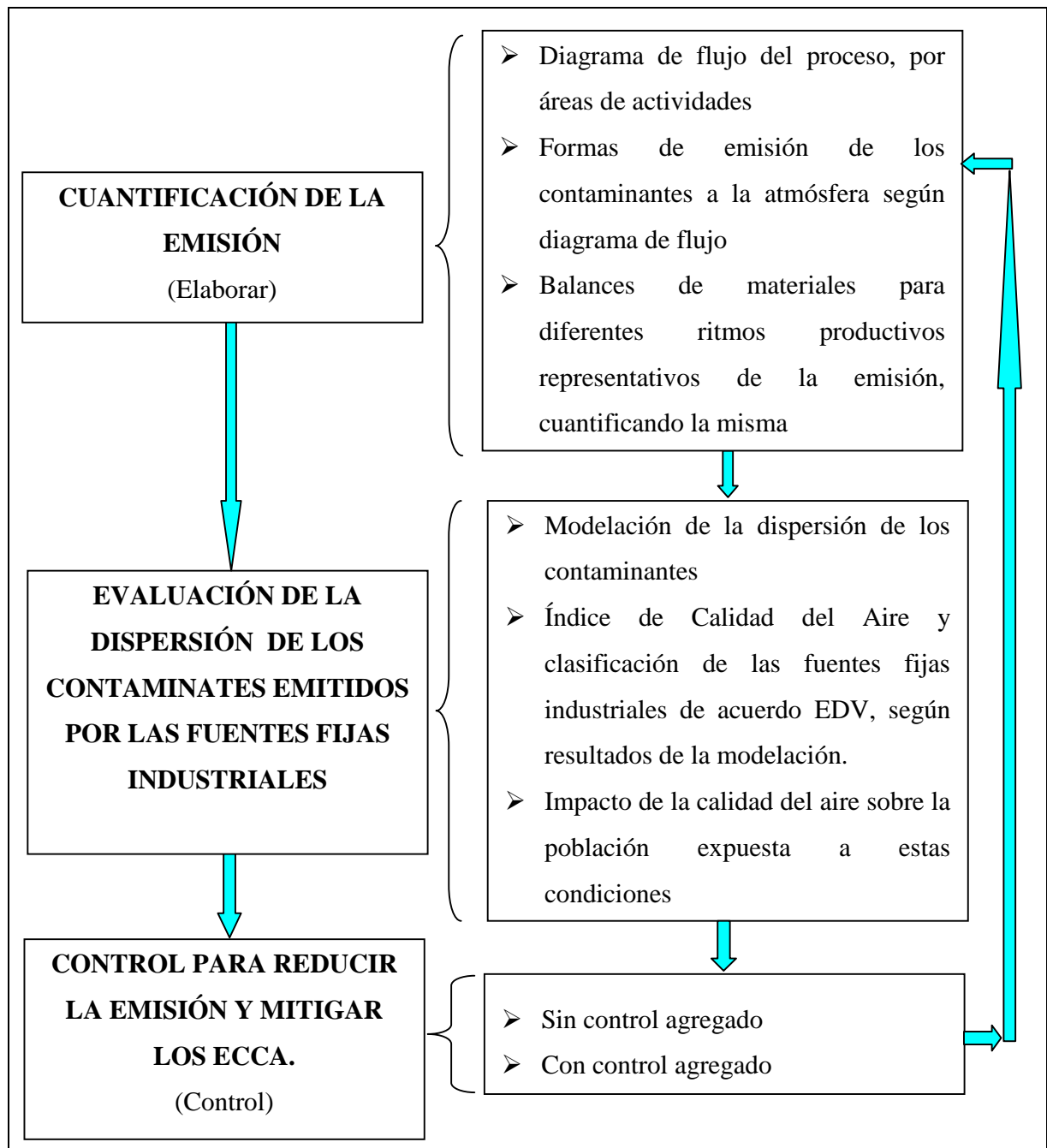


Figura 2.1. Esquema metodológico del diagnóstico técnico ambiental.

2.1 Método de clasificación de las fuentes fijas industriales para cada escenario de la dirección del viento

Las fuentes fijas industriales tienen diferentes clasificaciones, las cuales se enunciaron en el

Epígrafe 1.2, pero ninguna, teniendo en cuenta la interrelación entre su ubicación geográfica en la zona de estudio, con los contaminantes que emiten, las características de los asentamientos poblacionales en su entorno y los escenarios de dirección del viento que transportan los contaminantes, lo cual no facilita el trabajo efectivo y dinámico para la aplicación de los PCA a fuentes fijas industriales como método de reducción de la emisión sin control agregado, para prevenir y mitigar los ECCA provocadas por las emisiones, (Comité 1999; DAMA – INAMCO 2001; Núñez 2006a; Núñez 2007b; DICTUC 2007; Núñez 2008a).

Los “fenómenos meteorológicos” tienen características y valores muy específicos de alcance espacial y temporal, ocasionando cambios significativos de las variables meteorológicas.

El método para la clasificación de las fuentes fijas industriales considera dos escenarios de dirección del viento a escala “De Vecindario” y “Urbana,” y aplicando un método de “criterio de expertos”, a partir de los resultados de la modelación de la dispersión de los contaminantes emitidos por las fuentes fijas industriales, se evalúa el ICA, se clasifica estas, definiéndose sus implicaciones sanitarias. Los escenarios de dirección del viento son:

En el EDV uno, el rumbo predominante del viento se mantiene sin variación significativa, para el mayor % del tiempo del año y sí la emisión es constante, predomina la categoría del ICA y el riesgo en la población durante todo este tiempo, a sotavento de la fuente. En el EDV dos, el rumbo predominante del viento es diferente al primer escenario, originado por “fenómenos meteorológicos” con poco tiempo de duración, de uno a cinco días, para el menos % del tiempo del año y sí la emisión es constante, predomina la categoría del ICA y el riesgo en la población durante el tiempo de permanencia del “fenómeno meteorológico”, a sotavento de la fuente.

De acuerdo a este método la Clasificación de la Fuente (CF) se agrupa en tres categorías, las cuales se muestran en la tabla 2.1 además se enuncian las Implicaciones Sanitarias (IS) para cada caso, correspondiente a lo establecido en la NC 111: 2004. La clasificación de las fuentes en el EDV dos, se cumple, para aquellas fuentes “Bien Ubicadas” en el EDV uno.

Tabla 2.1 Clasificación de las fuentes fijas industriales de emisión.

Fuentes	Evaluación del ICA			EDV	CF	Implicaciones sanitarias
	Mala	Pésima	Crítica			
1	0	0	0	I	FFIBU	No se consideran*
1	x	0	0	I	FFIMU	Situación de Atención
1	0	x	0	I	FFIMU	Situación de Alerta
1	0	0	x	I	FFIMU	Situación de Emergencia Ambiental
1	x	x	0	I	FFIMU	Situación de Emergencia Ambiental
1	x	0	x	I	FFIMU	Situación de Emergencia Ambiental
1	0	x	x	I	FFIMU	Situación de Emergencia Ambiental
1	x	x	x	I	FFIMU	Situación de Emergencia Ambiental
1	0	0	0	II	FFIBU	No se consideran*
1	x	0	0	II	FFIPBU	Situación de Atención
1	0	x	0	II	FFIPBU	Situación de Alerta
1	0	0	x	II	FFIPBU	Situación de Emergencia Ambiental
1	x	x	0	II	FFIPBU	Situación de Emergencia Ambiental
1	x	0	x	II	FFIPBU	Situación de Emergencia Ambiental
1	0	x	x	II	FFIPBU	Situación de Emergencia Ambiental
1	x	x	x	II	FFIPBU	Situación de Emergencia Ambiental

*La fuente evaluada no deteriora el ICA, pero en caso de existir otras fuentes fijas industriales cercanas a esta, se debe evaluar el ICA de forma conjunta y seguir el procedimiento de la Tabla 2.2.

Fuentes Fijas Industriales Bien Ubicadas (FFIBU): son aquellas, en que sus emisiones al dispersarse no influyen sobre los asentamientos poblacionales, en ninguno de los EDV, no

deterioran la calidad del aire. Para estas fuentes industriales por sí solas, no es obligatoria la aplicación de medidas que contribuyan a elevar el ICA, el cual está entre “Buena” y “Deficiente”, siendo poco probable que ocurra un ECCA. En la categoría “Deficiente”, aparece un ligero incremento en la frecuencia y severidad de los efectos adversos agudos y crónicos en la población general, principalmente en personas con enfermedades cardiovasculares, respiratorias y alérgicas, y en otras de elevada susceptibilidad, según NC 111: 2004

Fuentes Fijas Industriales Parcialmente Bien Ubicadas (FFIPBU): son aquellas en que sus emisiones al dispersarse influyen sobre los asentamientos poblacionales bajo la influencia de “fenómenos meteorológicos” con un tiempo de duración de uno a cinco días, EDV II, deteriorando la calidad del aire que da lugar a ECCA, con sus implicaciones sanitarias de acuerdo a cada categoría según lo establece la NC 111: 2004. En la tabla 2.2, se enumeran medidas para reducir y controlar la emisión de contaminantes a la atmósfera, que conducen a minimizar y mitigar los ECCA.

Fuentes Fijas Industriales Mal Ubicadas (FFIMU): son aquellas en que sus emisiones al dispersarse influyen sobre los asentamientos poblacionales para el mayor % del tiempo del año, EDV I, deteriorando la calidad del aire que da lugar a ECCA, con sus implicaciones sanitarias de acuerdo a cada categoría según lo establece la NC 111: 2004.

En la figura 2.2 se muestran los resultados de la clasificación de las fuentes fijas industriales, según el inventario en la provincia de Villa Clara con cierre diciembre 2013, aplicándose el método de clasificación de las fuentes fijas industriales para cada EDV descrito en este Epígrafe, donde las FFIBU representan el 44% del total, con un promedio de 19.5 días trabajados/mes. Las FFIPBU es de un 37%, con un promedio de 18 días trabajados/mes y las FFIMU constituyen el 19%, con un promedio de 21.1 días trabajados/mes (Núñez 2013a).

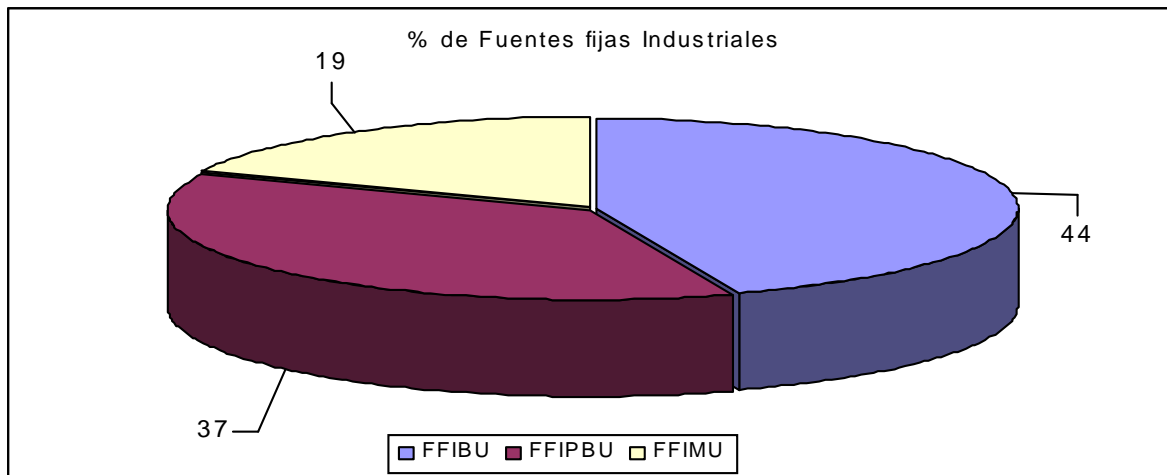


Figura 2.2 Porcentaje de fuentes fijas industriales según su clasificación.

En la figura 2.3 las fuentes fijas industriales de generación de electricidad representan el 43% con un promedio de 30 días trabajados/mes, las industrias de la metalurgia y construcción de maquinaria el 23%, con 9 días trabajados/mes, la producción de alimento el 18% con 15 días trabajados/mes, la generación de vapor el 12% con 18 días trabajados/mes y la industria química, textil y ligera, elaboración de productos animales y la construcción representan el 1% respectivamente, con una variación promedio de 24 a 17 días trabajados/mes (Núñez 2013a).

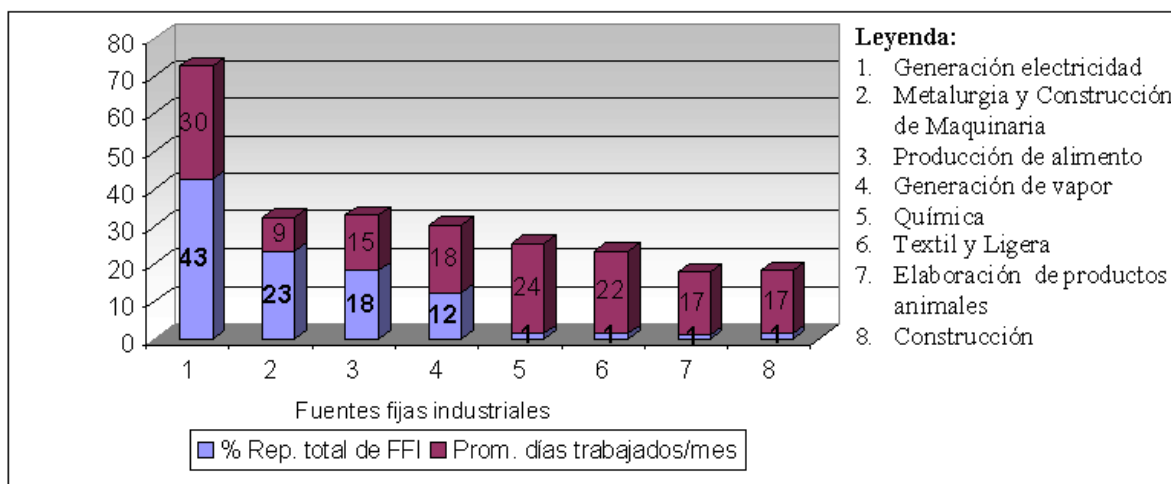


Figura 2.3 Fuentes fijas industriales y promedio de días trabajados/mes, Villa Clara.

En la tabla 2.2, se relacionan medidas a implementar por las fuentes fijas industriales para controlar la emisión de contaminantes a la atmósfera que conducen a mitigar los ECCA. Para los PCA se tiene en cuenta la incidencia de “fenómenos meteorológicos”, escenario de dirección del viento II, que ocasionan ECCA. La aplicación de PCA, para el mayor % del tiempo del año en el escenario de dirección del viento I, ocasiona pérdidas económicas para las fuentes industriales, debido a la improductividad, ocasionada por paradas continuas del proceso industrial. (Núñez 2007a; Núñez 2008a; Núñez 2009c; Núñez 2010a; Núñez 2012b).

Tabla 2.2 Plan de medidas según la clasificación de las fuentes fijas industriales.

Clasificación de las fuentes fijas industriales	Técnicas para controlar la emisión	Plan de medidas a implementar por las fuentes fijas industriales contaminadoras
FFIBU	Sin control agregado	Por sí sola no es necesario aplicar medidas De conjunto con otras fuentes si deteriora el ICA, se aplican medidas tecnológicas y/o procesos, de eficiencia energética y PCA
	Sin control agregado	Tecnológicas y/o procesos, de eficiencia energética y PCA
FFIPBU	Con control agregado	Equipos de control de la emisión Tecnológicas y/o procesos, eficiencia energética, reubicación geográfica de la fuente, cierre parcial y/o total de la misma
	Sin control agregado	Equipos de control de la emisión
FFIMU	Sin control agregado	Equipos de control de la emisión
	Con control agregado	Equipos de control de la emisión

2.2 Método de pronóstico de calidad del aire para fuentes fijas industriales, bajo la incidencia de “fenómenos meteorológicos” para prevenir y mitigar ECCA

El método modificado de los PCA para las fuentes fijas industriales se elaboró en Villa Clara, el cual se puede generalizar para el resto del país, en el se tiene en cuenta las formas y ritmos

de emisión de los contaminantes de las fuentes fijas industriales, el sistema de monitoreo de calidad del aire, los escenarios de dirección del viento y la distribución de los asentamientos poblacionales alrededor de la fuente industrial. Otros métodos existentes en la literatura especializada internacionalmente no se adaptan al comportamiento de los parámetros mencionados, Epígrafe 1.8 (Curiel 1990; Katz 2000; Núñez 2006a; Núñez 2007a; Núñez 2007b; Núñez 2008a; Núñez 2009c; Núñez 2010a; Centro 2011; Baldasano 2011).

La aplicación de los PCA a fuentes fijas industriales como método sin control agregado para reducir la emisión de contaminantes y prevenir y mitigar ECCA, aplicando medidas regulatorias y organizativas del proceso productivo, constituyen una alternativa eficaz y económica, este método se describe a continuación.

Los PCA que se proponen en este trabajo sigue la secuencia que aparece en la figura 2.2, las fuentes seleccionadas son aquellas que alcanzan las categorías de “FFIPBU” al cumplir con los requisitos que se enuncian en la tabla 2.1 del Epígrafe 2.1, bajo la influencia de “fenómenos meteorológicos”, estas fuentes industriales por sus emisiones son responsables de los ECCA. La metodología contempla tres actualizaciones de los PCA, que permiten corregir la variación del comportamiento de las variables meteorológicas y la emisión de la fuente industrial, las cuales influyen significativamente en el resultado del PCA, logrando valores aproximadamente reales con 24 horas de antelación a la posible ocurrencia del ECCA.

La secuencia de elaboración de los PCA, su comunicación a responsables e implicados y la evaluación de estos se representa en la figura 2.4.

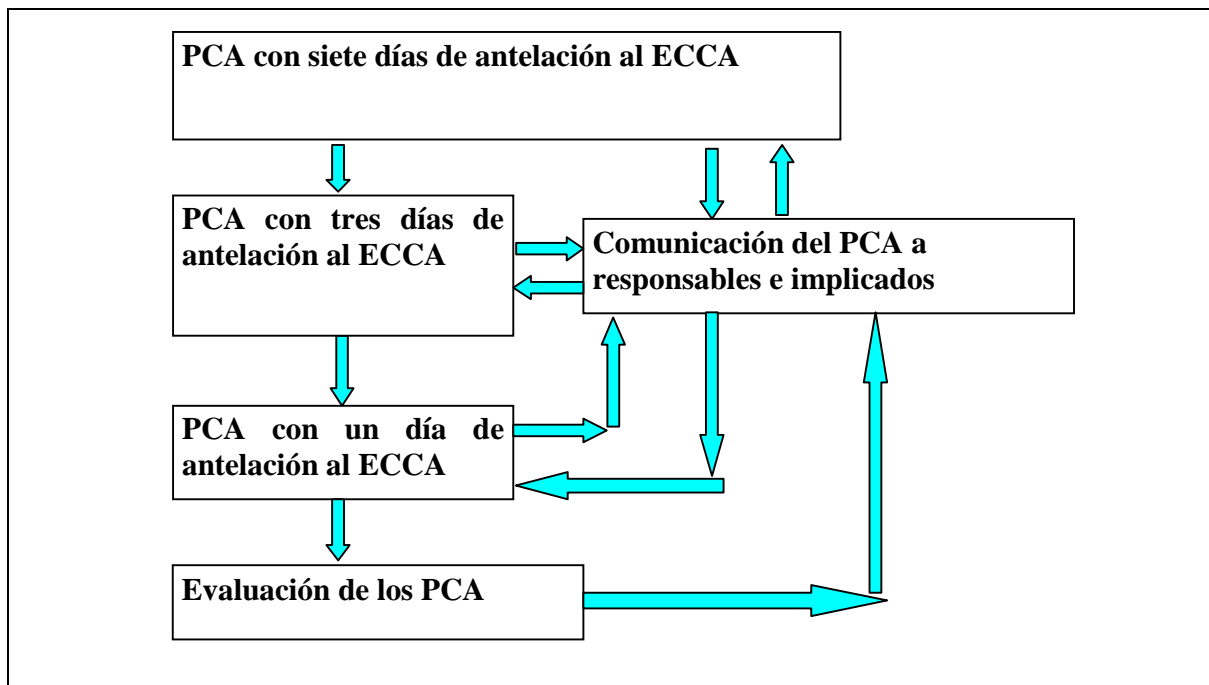


Figura 2.4 Secuencia para elaborar los PCA.

2.2.1 Términos controlados en la actualización del PCA

Los PCA se elaboran con siete, tres y un día de antelación a la posible ocurrencia del ECCA respectivamente, en cada uno de ellos existen términos que permanecen constantes y otros variables, estos se detallan a continuación:

Términos que permanecen constantes: parámetros topográficos, de la fuente fija industrial la elevación de la base sobre el nivel del mar, altura de la chimenea sobre la base, diámetro interior de la chimenea a la salida de los gases y temperatura de los gases.

Términos que varían: el régimen emisión, horas de producción, horario de producción, consumo de combustible, flujo de gases, velocidad de salida de los gases, consumo de materia prima, flujos del proceso y producción terminada y las variables meteorológicas.

Para la determinación de la emisión de los contaminantes se intercambia información con la fuente de emisión, para conocer la producción a realizar el día de la posible ocurrencia del

ECCA, actualizándose el régimen de emisión por el método seleccionado, Epígrafe 1.6, además se verifican los términos relacionados con horas de producción, horario de producción, consumo de combustible y consumo de materia prima.

La actualización de los datos meteorológicos horarios, se realiza a través del pronóstico extendido del tiempo del departamento de pronóstico del Centro Meteorológico.

2.2.2 Comunicación del PCA a responsables e implicados

Cada PCA se les hace llegar a las fuentes contaminadoras responsables del deterioro de la calidad del aire, (mapas, imágenes y evaluación del ICA en posibles zonas de afectación), manteniéndose la actualización y el intercambio de información hasta 24 horas de antelación a la posible ocurrencia del ECCA.

Cada entidad tiene el catálogo donde aparece representado el ICA con una escala de valores y colores, además del nivel de aviso, anexo cinco, que permite la rápida toma de decisiones auxiliándose por la tabla 2.2 para reducir la emisión de contaminantes y minimizar el ECCA.

Las instituciones de salud que prestan servicios a las zonas afectadas por ECCA, reciben los Pronósticos de Calidad del Aire, auxiliándose del catálogo de Pronósticos de Calidad del Aire para realizar y ejecutar un plan de medidas a fin de garantizar los recursos materiales y humanos que se necesitan en cada episodio. (Núñez 2010a). Los organismos a los cuales pertenecen las fuentes contaminadoras, la Delegación Provincial del CITMA, UMA y gobiernos municipales reciben los PCA para que controlen y hagan cumplir las medidas correspondientes en cada caso por las entidades responsables, elevando la efectividad del proceso.

2.2.3 Plan de medidas de las fuentes contaminadoras para evitar ECCA

Las fuentes fijas industriales contaminadoras ajustan un plan de acciones para cada "Aviso" de

los PCA para reducir las emisiones de contaminantes que dan lugar a los ECCA, tabla 2.3.

Las producciones no realizadas por las medidas expuestas anteriormente se transfieren para los días en que las condiciones meteorológicas son favorables (dirección del viento predominante para el mayor % del tiempo del año, escenario I), mitigando la ocurrencia de ECCA. Si en una zona existen varias fuentes fijas industriales que deterioran la calidad del aire hasta dar lugar a ECCA, se pueden aplicar los PCA con medidas que contribuyen a reducir la emisión ya que el método es flexible, fiable, preventivo y los resultados se obtienen inmediatamente (Núñez 2006a; Núñez 2007b; Núñez 2008a).

Tabla 2.3 Plan de medidas para PCA a fuentes fijas industriales.

Nivel de aviso	Código de colores	Posibles medidas productivas y organizativas a aplicar en la fuente fija industrial contaminadora para reducir emisión y mitigar los ECCA
SITUACIÓN DE ATENCIÓN	ROJO	<ul style="list-style-type: none"> • Ajuste de los horarios productivos (de una a dos horas) sin incremento productivo el DAD • Ajuste de los horarios productivos (de una a dos horas) con incremento productivo hasta el 20% el DAD. • Cambios en los ritmos de producción (se reducen del 10% al 20%) y se transfieren para otro día • Paradas parciales (de una a dos horas) se produce otro día • Ajuste de los horarios productivos (hasta tres horas) sin incremento productivo el DAD
SITUACIÓN DE ALERTA	PÚRPURA	<ul style="list-style-type: none"> • Cambios en los ritmos de producción (se reducen del 20% al 40%) y se transfieren para otro día • Paradas parciales (hasta 3,5 horas), se produce otro día • Cambio de actividades
SITUACIÓN DE EMERGENCIA AMBIENTAL	MARRÓN	<ul style="list-style-type: none"> • Paradas parciales (hasta 4,5 horas) se produce otro día • Parada total, se produce otro día

2.2.4 Validación del PCA

Para la validación de los PCA es necesario realizar monitoreo atmosférico de los contaminantes pronosticados en la zona de estudio, aplicando el siguiente procedimiento:

2.2.4.1 Selección de los sitios de monitoreo

Para la selección de los sitios de monitoreo, se tiene en cuenta las consideraciones que aparecen en la NC 111: 2004 y en los códigos de referencia de la EPA 2001, además del criterio de expertos. Las más importantes son: clasificación de las fuentes contaminantes, su localización respecto a las zonas habitables y ubicación de grupos de población de elevada susceptibilidad. Con los resultados de la modelación de la dispersión de los contaminantes se evalúa el ICA para ubicar las estaciones de monitoreo en las zonas más afectadas.

2.2.4.2 Monitoreo atmosférico

Para medir la contaminación del aire se requiere del monitoreo atmosférico, el cual tiene que cumplir con lo establecido en la NC 111: 2004, el mismo está comprendido dentro de los planes de monitoreo especiales, al tener como objetivo, dar respuesta y seguimiento a situaciones de emergencias ambientales.

2.2.4.3 Control y aseguramiento de la calidad de monitoreo

Para lograr el aseguramiento de la calidad de los datos, el muestreo y análisis debe tener técnicas operacionales que contribuyen a la precisión y exactitud avaladas por análisis estadístico. Para el monitoreo atmosférico se aplican los protocolos de operación, mantenimiento y calibración del equipo, visitas, revisiones y blancos de campo.

2.2.4.4 Selección de las técnicas de análisis

La elección del método específico de análisis depende de varios factores, como son las

características químicas del contaminante y su estado físico, el tipo de muestreo. Los métodos de referencia están diseñados para determinar la concentración de un contaminante en una muestra. La concentración se expresa usualmente en microgramos por metro cúbico.

2.2.5 Evaluación del PCA

Para evaluar la calidad y efectividad del PCA se sigue el siguiente procedimiento:

2.2.5.1 Evaluación de la confiabilidad

Para la determinación del porcentaje de confiabilidad se aplica la ecuación 2.1, calculándose la concentración del contaminante a través del PCA y la concentración promedio del contaminante medido por las estaciones de monitoreo.

$$\% \text{ Confiabilidad} = \left(\frac{CCP}{C_{prom. CM}} \right) * 100 \dots\dots\dots(2.1)$$

Donde:

CCP: Concentración del Contaminante Pronosticado con un día de antelación ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Cprom. CM: Concentración Promedio del Contaminante Monitoreado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

2.2.5.2 Evaluación de la discrepancia

Para la evaluación de la discrepancia entre la concentración real del PM_{10} y la pronosticada, se aplica el método del análisis de la Raíz del Error Cuadrático Medio (RECM), ecuación 2.2.

Esta es una medida que de bondad de ajuste (de tipo estadístico) de un modelo propuesto. Su unidad de medida es la misma de la variable respuesta que se analiza ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

$$RECM = \sqrt{\left(\frac{\sum (C_{prom. Cm} - CCP)^2}{N} \right)} \dots\dots\dots(2.2)$$

Donde:

Cprom. CM: Concentración Promedio del Contaminante Monitoreado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

CCP: Concentración del Contaminante Pronosticado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

N: número de estaciones de monitoreo activo con las cuales se van a comparar los resultados.

2.2.5.3 Evaluación del porcentaje de efectividad del aviso

La evaluación del % de efectividad del aviso se realiza a través de la expresión 2.3, la cual relaciona el nivel de aviso del ECCA a ocurrir y el nivel del ECCA ocurrido o que pudo haber ocurrido de no aplicarse las medidas de minimización de la emisión en la fuente de emisión.

$$\% \text{ Efect. aviso} = \left(\frac{NA}{NECCA_{\text{real}}} \right) * 100 \dots\dots\dots (2.3)$$

Donde:

NA: Nivel de Aviso, está en función del resultado del PCA .

El NA, toma valor de la unidad, cuando coincide el aviso del ECCA con el NECCA real. El valor es 0,5 cuando tiene diferencia el aviso con lo ocurrido en "una" categoría de calidad del aire, ejemplo se pronostica un ECCA de CA con categoría de Mala y ocurre o pudo haber ocurrido el ECCA con CA con categoría de Deficiente o Pésima.

Por último el NA toma valor 0,3 cuando tiene diferencia el aviso con lo ocurrido en "dos" categoría de calidad del aire. En caso de ser mayor la diferencia entre el aviso y lo ocurrido o lo que pudo haber ocurrido, se toma por defecto un % de efectividad del aviso de cero.

NECCA_{real}: Nivel del ECCA real o que pudo haber ocurrido, se obtiene por modelación con los datos reales de variables meteorológicas y producción de la planta. Su valor es la unidad.

De las FFIPBU figura 2.5, se les aplica PCA al 60%, de ellas, el 92% a la industria de la metalurgia y construcción de maquinaria, el 66% en la industria de la construcción, el 11% en la generación de electricidad y 9% en la producción de alimento, lo cual permite la vigilancia, prevención y mitigación de los ECCA sobre los asentamientos poblacionales, contribuyendo a elevar la calidad de vida de la población expuestas a estas condiciones (Núñez 2013a).

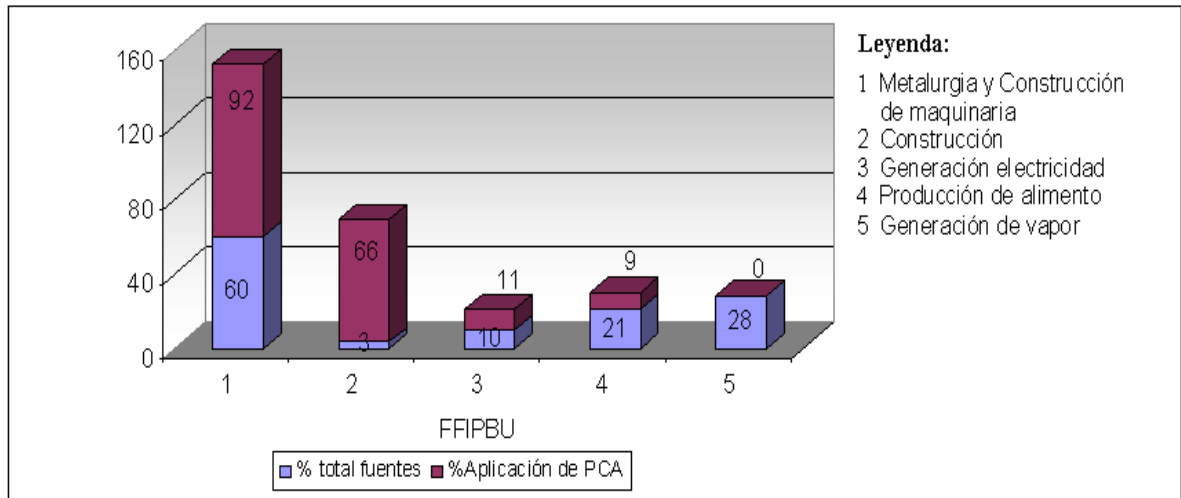


Figura 2.5 Porcentaje de FFIPBU del inventario de Villa Clara que se les aplican PCA.

Con el método obtenido de clasificación de las fuentes fijas industriales de acuerdo a los escenarios de dirección del viento y del método de los PCA, se integran ambos a la metodología del diagnóstico técnico ambiental de fuentes fijas industriales, la cual se desarrolla a continuación, esta aparece en la figura 2.1.

2.3 Caracterización de la zona de estudio

Para realizar la caracterización de la zona de estudio se tiene en cuenta el análisis del inventario de fuentes fijas industriales y de ellas la evaluación del cumplimiento de la norma del Radio Mínimo Admisible de Protección Sanitaria, los contaminantes que emiten a la atmósfera, la población circundante y la caracterización geográfica, topográfica, físico natural, climática y de fenómenos meteorológicos.

2.3.1 Inventario de fuentes fijas industriales

El análisis del inventario de fuentes fijas comienza por la cuantificación de todas las fuentes fijas industriales, su ubicación en la zona de estudio, especificado estado técnico, años de explotación, niveles productivos y tipos de producciones.

2.3.2 Evaluación del cumplimiento de la norma del Radio Mínimo Admisible de

Protección Sanitaria para cada fuente

De acuerdo a los tipos de fuentes, determinar el cumplimiento del Radio Mínimo Admisible de Protección Sanitaria, según la Norma Cubana 39: 1999, para cada clase de fuente fija, en caso de incumplimiento valorar su repercusión en el deterioro de la calidad del aire sobre el asentamiento poblacional provocado por las emisiones de estas.

2.3.3 Contaminantes que emiten a la atmósfera cada fuente fija industrial

Enumerar de los contaminantes principales (SO₂, NO_x, CO, PM₁₀, PM_{2.5} y COV) que emiten a la atmósfera cada fuente fija industrial en las etapas de proceso productivo.

2.3.4 Población circundante a las fuentes fijas industriales

Se determina la densidad de habitantes y se considera la ubicación de la población más vulnerable a la contaminación entre los que se encuentran hogares de ancianos y maternos, hospitales, policlínicos, escuelas, círculos infantiles y áreas recreativas.

2.3.5 Caracterización geográfica, topográfica, físico natural, climática y de fenómenos meteorológicos

Para ubicar y describir geográficamente la zona de estudio, se utilizan mapas topográficos que contengan la altitud del terreno, los medios físicos naturales y construidos. La caracterización climática del territorio se realiza a través de los datos climatológicos históricos de las estaciones meteorológicas de cada lugar, determinándose el comportamiento espacio temporal de las principales variables tales como precipitaciones, temperatura, dirección y fuerza del viento, presión atmosférica, radiación solar, humedad relativa, nubosidad. Para cada "fenómeno meteorológico" con intervalos de tiempo de uno a cinco días, hacer análisis de los cambios en la dirección predominante de los vientos, su frecuencia diaria, semanal, mensual, por periodo e intensidad de los mismos, creándose las bases de datos para cada caso, las cuales

se utilizarán para modelar la dispersión de los contaminantes emitidos por las fuentes fijas industriales, evaluando la posible ocurrencia de ECCA.

2.4 Cuantificación de la emisión

La cuantificación de las emisiones se realiza apoyándose en los inventarios de emisiones y en el diagrama de flujo del proceso, por áreas de actividades en cada fuente fija industrial, definiéndose las formas de emisión en cada caso y aplicando balances de materiales para diferentes ritmos productivos representativos de la emisión.

2.4.1 Diagrama de flujo del proceso, por áreas de actividades

El diagrama de flujo del proceso debe incluir desde los insumos hasta el producto final, expresando fielmente el proceso por áreas de actividades y representando todas las corrientes asociadas. Se recomienda su uso como herramienta de trabajo dentro de las actividades habituales de gestión, que describen que operación y en que secuencia se requiere solucionar un problema, en este caso de emisión de contaminantes a la atmósfera.

2.4.2 Formas de emisión de los contaminantes a la atmósfera según diagrama de flujo

En cada una de las etapas del proceso siguiendo el diagrama de flujo, se determinan las formas en que los contaminantes se emiten a la atmósfera ya sean por fugas y/o por el proceso, especificando la altura de la emisión sobre el nivel del suelo, aplicando factores de emisión, mediciones directas y balance de masas descritos en el Epígrafe 1.6.

2.4.3 Balances de materiales para diferentes ritmos productivos representativos de la emisión, cuantificando la misma

Los balances de materiales se realizan para los ritmos de producción más representativos del proceso de cada fuente fija industrial entre los que se encuentran los valores medios, el 40% y 80% por encima de estos valores medios y para la capacidad máxima de la fuente.

2.5 Evaluación de la dispersión de los contaminantes emitidos por las fuentes fijas industriales

La evaluación de la dispersión de los contaminantes emitidos por las fuentes fijas industriales, se inicia con la modelación de la dispersión de estos, de los resultados, se evalúa el ICA y se clasifican las fuentes fijas industriales de acuerdo EDV y por último se estima el impacto de la calidad del aire sobre la población expuesta a estas condiciones.

2.5.1 Modelación de la dispersión de los contaminantes

Para realizar la modelación de la dispersión de los contaminantes primero se elige el modelo, para lo cual se recomiendan aquellos de pluma Gaussiana, detallados en el Subepígrafe 1.8.1 por obtenerse resultados de alta efectividad y confiabilidad en el mayor % de las fuentes existentes en Villa Clara, en correspondencia con resultados internacionales, respondiendo adecuadamente a los casos de estudio (EPA 2000; EPA 2003; DICA 2004; Núñez 2006a; Jiménez 2007; Núñez 2007a; Núñez 2007c; Núñez 2007d).

A continuación se describen los datos para realizar la modelación.

2.5.1.1 Datos de las fuentes de emisión

Los parámetros de las fuentes fijas industriales de emisión se pueden obtener del inventario de fuentes de emisiones en las Unidades de Medio Ambiente, en los Centros Meteorológicos Provinciales y de forma directa en cada entidad, los principales datos son: altura de la fuente sobre el nivel del suelo (m), altura de la chimenea (m), diámetro de la chimenea (m), velocidad de los gases de salida (m/s), temperatura de los gases de salida (K), tasa de emisión puntual (g/s), altura promedio de las elevaciones circundantes (m), radio promedio de las elevaciones circundantes (m), distancia entre las fuentes y coordenadas (m).

2.5.1.2 Datos de superficie

Utilizar los datos geográficos con mapas de nivel, ya que la rugosidad del terreno es una variable que afecta el comportamiento de la dispersión de los contaminantes.

2.5.1.3 Datos meteorológicos

Se utilizan las bases de datos meteorológicas elaboradas para cada EDV, incluyendo los escenarios producidos por “fenómenos meteorológicos” que afectan la zona de estudio, para su preparación se utilizan los datos históricos de las estaciones meteorológicas. Las variables utilizadas son: dirección del viento (grados), velocidad del viento (m/s), temperatura (K), estabilidad atmosférica y altura de la capa de mezcla rural y urbana (m).

2.5.2 Índice de Calidad del Aire y clasificación de las fuentes fijas industriales de acuerdo EDV, según resultados de la modelación

Se evalúa el ICA con los resultados de la modelación de la dispersión de los contaminantes en cada EDV, tratados en esta investigación, aplicándose las normas correspondiente a cada contaminante (NC 39: 1999; NC 111: 2004 y Guías de la WHO 2005), con estos resultados se clasifican las fuentes fijas según el método obtenido en este trabajo, en el Epígrafe 2.1 en FFIBU, FFIPBU y FFIMU, facilitando la aplicación de medidas de reducción de la emisión.

2.5.3 Impacto de la calidad del aire sobre la población expuesta a estas condiciones

La estimación del impacto de la calidad del aire sobre la población se realiza según el resultado del ICA que origina un ECCA, dando lugar a una “Situación de Atención, de Alerta o de Emergencia Ambiental”, para lo cual la NC 111 del 2004, en el anexo cinco, especifica el impacto sobre la salud humana.

2.6 Control para reducir la emisión y mitigar los ECCA

El control para reducir la emisión de los contaminantes para prevenir y mitigar los ECCA se

divide en dos grupos, el primero sin control agregado y el segundo con control agregado, estos se describen en el Epígrafe 1.11 y se enuncia a continuación.

2.6.1 Sin control agregado

Estas técnicas para reducir la emisión de contaminantes del aire se basan en medidas tecnológicas y/o procesos, de eficiencia energética, buenas prácticas de operación, cierre de plantas y aprovechamiento de condiciones meteorológicas apropiadas para la dispersión de contaminantes a través de pronósticos de calidad del aire.

2.6.2 Con control agregado

La reducción de la emisión con control agregado se basa en recolectar los contaminantes antes de ser emitidos a la atmósfera. Los contaminantes gaseosos se realizan a través de la combustión o incineración, adsorción, absorción y lavado y para los contaminantes “particulados” se utiliza la separación por inercia y gravedad (sedimentación), o colectores mecánicos, filtración, precipitación electrostática, lavadores o colectores húmedos y sistemas combinados. En el anexo cuatro aparece una tabla descriptiva de los principales métodos básicos para este contaminante (Brown 1965; Warren 1991; Ulrich 1992; Gisella 2008).

2.7 Evaluación de la emisión con la aplicación de sistemas de control

La aplicación de medidas sin control agregado y con este a fuentes fijas industriales, reducen la emisión de contaminantes a la atmósfera, minimizando y mitigando los ECCA, lo cual es necesario evaluar a través de la metodología descrita, esta se desglosa desde el Epígrafe 2.4 hasta el 2.5.3.

Conclusiones parciales

1. La metodología del diagnóstico técnico ambiental a fuentes fijas industriales para prevenir y mitigar los episodios críticos de contaminación atmosférica provocados por

estas, constituye la base fundamental para el control de impactos ambientales negativos que afectan la calidad de vida de las personas.

2. El método de clasificación de las fuentes fijas industriales de acuerdo a los escenarios de dirección del viento, es una herramienta precisa y efectiva en más de un 90%, para el diagnóstico y aplicación de los pronósticos de calidad del aire como método sin control agregado de reducción de la emisión de contaminantes a la atmósfera.
3. El monitoreo atmosférico permite en la metodología propuesta la validación del pronóstico de calidad del aire obtenido sobre la base de los inventarios de emisión y la modelación de la dispersión, con adecuada confiabilidad (superior al 65%) y una discrepancia del pronóstico menor a $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, como se establece internacionalmente.
4. Para fuentes fijas industriales “parcialmente bien ubicadas”, el pronóstico de calidad del aire con siete días de antelación, establece el intercambio de información oportuna para aplicar medidas de reducción de la emisión y prevenir los episodios críticos de contaminación atmosférica.
5. El pronóstico de calidad del aire es una herramienta de trabajo que favorece y apoya la labor de controlar y hacer cumplir las medidas de mitigación de los episodios críticos de contaminación atmosférica a los organismos, directivos, funcionarios y gobiernos de cada territorio.
6. El método de utilizar equipos de control agregado para reducir emisiones a la atmósfera en fuentes fijas industriales, es efectivo, evita que ocurran los episodios críticos de contaminación atmosférica.

CAPÍTULO 3. CASO DE ESTUDIO

Para el desarrollo de la investigación, se aplicó la metodología elaborada en el capítulo dos, de diagnóstico técnico ambiental a fuentes fijas industriales, para prevenir y mitigar los ECCA.

3.1 Caracterización de la zona de estudio

El estudio se realizó en la planta de zeolita "La Tasajera" ubicada al norte del poblado de San Juan de los Yeras del municipio de Ranchuelo, provincia de Villa Clara, figura 3.1. El estado técnico de la planta es aceptable, con un período de explotación de 25 años, aunque no tiene dispositivo de control de la emisión de polvo en el secador rotatorio y la materia prima tiene más de un 50% de óxido de silicio la cual se almacena a cielo abierto. (Núñez 2005a; Núñez 2006a; Núñez 2007a; Núñez 2012a).

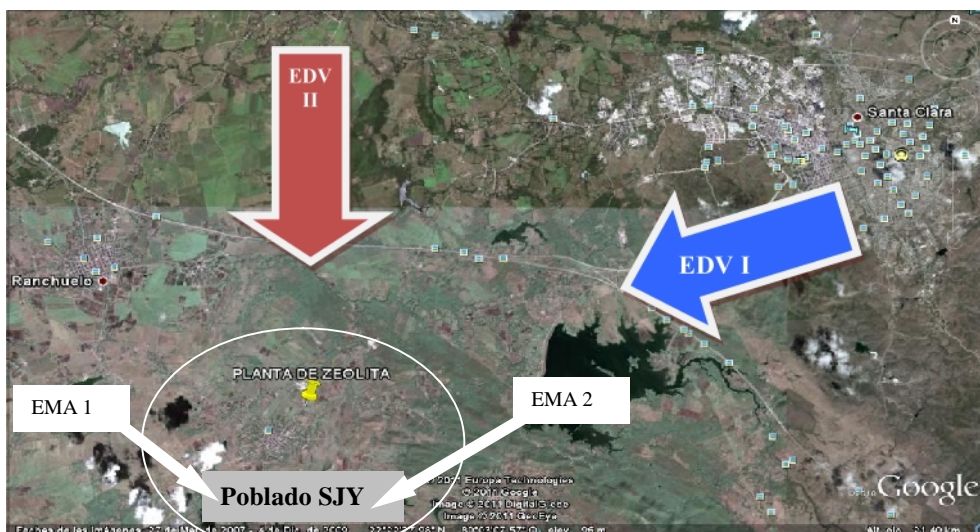


Figura 3.1 Zona de estudio, poblado de San Juan de los Yeras.

Donde:

EMA: Estación de Monitoreo Activo para la toma de muestras de PM_{10} .

En el EDV I, el rumbo predominante del viento es del noreste, este-noreste, este, clasificándose como **D**ías **A**ctivos **F**avorables (DAF) para el transporte y dispersión del PM₁₀, no ocurren los ECCA sobre el asentamiento poblacional, el contaminante se aleja del mismo.

En el EDV II, corresponde a la dirección del viento predominante con rumbo del norte, norte-noreste, noreste, denominándose **D**ías **A**ctivos **D**esfavorables (DAD) para el transporte y dispersión del PM₁₀, ocurren los ECCA.

3.1.1 Inventario de fuentes fijas industriales

Según el inventario de fuentes fijas industriales de la provincia de Villa Clara, en la zona de estudio solamente se ubica la planta de zeolita, la cual por sus emisiones se clasifica como una fuente fija principal, por emitir más de 10 t/año de un contaminante (PM₁₀), tiene una capacidad de producción con tratamiento de secado de 35 000 t/año, siendo el Fertizol, el producto líder de la planta y en el cual se sustentan los proyectos de desarrollo para el futuro, por las demandas de estas producciones a nivel nacional como aditivo en la producción de fertilizantes, priorizados en el desarrollo agrícola del país, además se emplea en los hidropónicos para el mejoramiento de las propiedades del suelo. Se obtienen otros productos sin tratamiento de secado, con una capacidad máxima de producción de 55 000 t/año, entre ellos el Zoad, aditivo mineral utilizado para los piensos de alimentación animal para el ganado, aves y peces, además de utilizarse en la producción de piezas de hormigón y el Zook utilizado generalmente en los lechos en las granjas de pollos (Núñez 2013a).

3.1.2 Evaluación del cumplimiento de la norma del Radio Mínimo Admisible de Protección Sanitaria

La planta de zeolita cumple con su Radio Mínimo Admisible de Protección Sanitaria de 300 m, según se establece en la NC 39: 1999.

3.1.3 Contaminantes que emite a la atmósfera la planta de zeolita

La planta de zeolita emite a la atmósfera los siguientes contaminantes principales, Óxidos orgánicos e inorgánicos (SO₂, NO_x, CO) y material particulado (PST, PM₁₀ y PM_{2.5}).

3.1.4 Población circundante a la planta de zeolita

La población en el asentamiento poblacional de San Juan de los Yeras es de 7 355 habitantes, en el mismo se ubica una escuela primaria, una secundaria básica, un policlínico y seis consultorios médicos de la familia.

3.1.5 Caracterización geografía, topografía, medios físicos naturales, climática y de fenómenos meteorológicos en la zona de estudio

Topografía del terreno: La región donde se encuentra ubicada la planta de zeolita, incluyendo los terrenos cercanos a la misma (zona de estudio), tiene un perfil de relieve con pequeñas ondulaciones, de poca altura, con una vegetación de arbusto y árboles de mayor tamaño espaciado, sin edificaciones de niveles alto que obstruya, interfiera o cambie la trayectoria de la dispersión del contaminante, por lo que se define como “terreno simple”. El área del asentamiento poblacional es de 170,23 ha, figura 3.1, las viviendas se caracterizan por una planta y portal público y edificios multifamiliares de cuatro plantas con solares yermos. Tiene calles asfaltadas y sin asfalto, con acumulación de polvo.

El clima predominante para la mayor parte de Cuba es del tipo cálido tropical, con estación lluviosa en el verano, con influencia marítima y rasgos de semicontinentalidad. La provincia de Villa Clara incluyendo la zona de estudio presentan estas características, la cual por su posición geográfica se encuentra ubicada al centro del país en una latitud muy próxima al Trópico de Cáncer, situado en los 21°25' 00.01"N, 85°76'64.11"W los datos climatológicos corresponden a la Estación Meteorológica del Yabú (EMY-78343) ubicada 22°46'17"N,

79°99'19"W, por ser esta representativa de la zona de estudio. Los valores de temperatura medios anuales están entre 20,85 °C y 26,4 °C, imperan los vientos de componente “este” con velocidades entre 1,68 m/s y 2,6 m/s, las precipitaciones son variables. En la temporada de noviembre abril, (periodo poco lluvioso) las variaciones del tiempo y el clima son significativas, con cambios bruscos diario asociados al paso de sistemas frontales (anexo seis), que con mayor frecuencia afectan la zona de estudio, en los meses de enero 20,7%, en diciembre 17,6% y en febrero 16,8%, para un promedio anual de 20 frentes fríos. De mayo a octubre (periodo lluvioso), se presentan pocas variaciones en el tiempo, (Socarrás 2012).

Durante las 35 temporadas analizadas, la provincia fue afectada por 593 “frentes fríos”, de ellos atendiendo a la intensidad del frente, el 94,7% fueron frentes débiles y el 5.3% frentes moderados. Los “frentes fríos” se clasifican por la génesis del proceso en clásico 71,9%, revesino 24,6% y secundario 3,5%, anexo seis (Lecha 1994; Socarrás 2012).

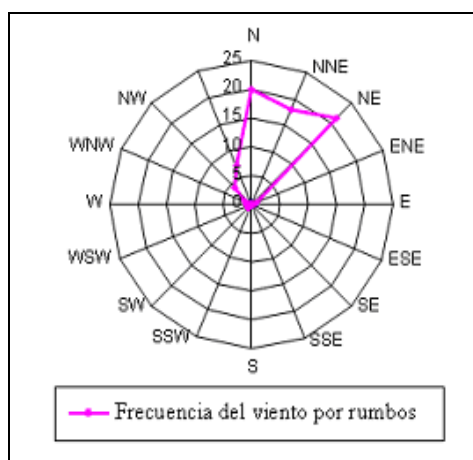


Figura 3.2 Rosa de los vientos, DAD.

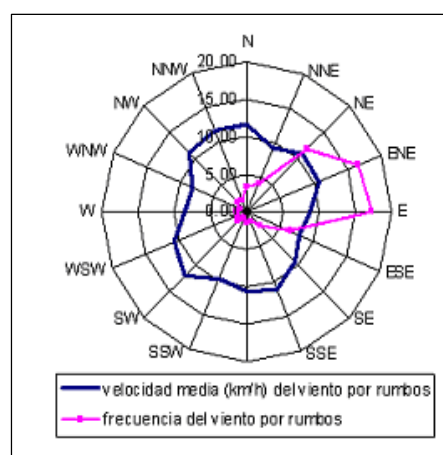


Figura 3.3 Rosa de los vientos, DAF.

El “fenómeno meteorológico” que cambia la dirección del viento predominante para el mayor porcentaje del tiempo del periodo poco lluvioso, provocando que la dispersión del contaminante ocurra sobre el asentamiento poblacional son los “frentes fríos”, sucedidos de

las altas presiones migratorias, bajo estas condiciones el rumbo predominante del viento es del norte, norte-noreste, noreste, figura 3.2, con periodicidad 19,96%, 17,93% y 21,08%, DAD. El resto del tiempo corresponde a los DAF con dirección predominante del viento del noreste, este-noreste, este, con frecuencia 11,73%, 16,66% y 17,34%, figura 3.3.

3.2 Cuantificación de la emisión de la planta de zeolita

Para la identificación y cuantificación de la emisión del contaminante se elaboró el diagrama de flujo del proceso, donde se describe cada una de las etapas del mismo.

3.2.1 Diagrama de flujo del proceso, por áreas de actividades

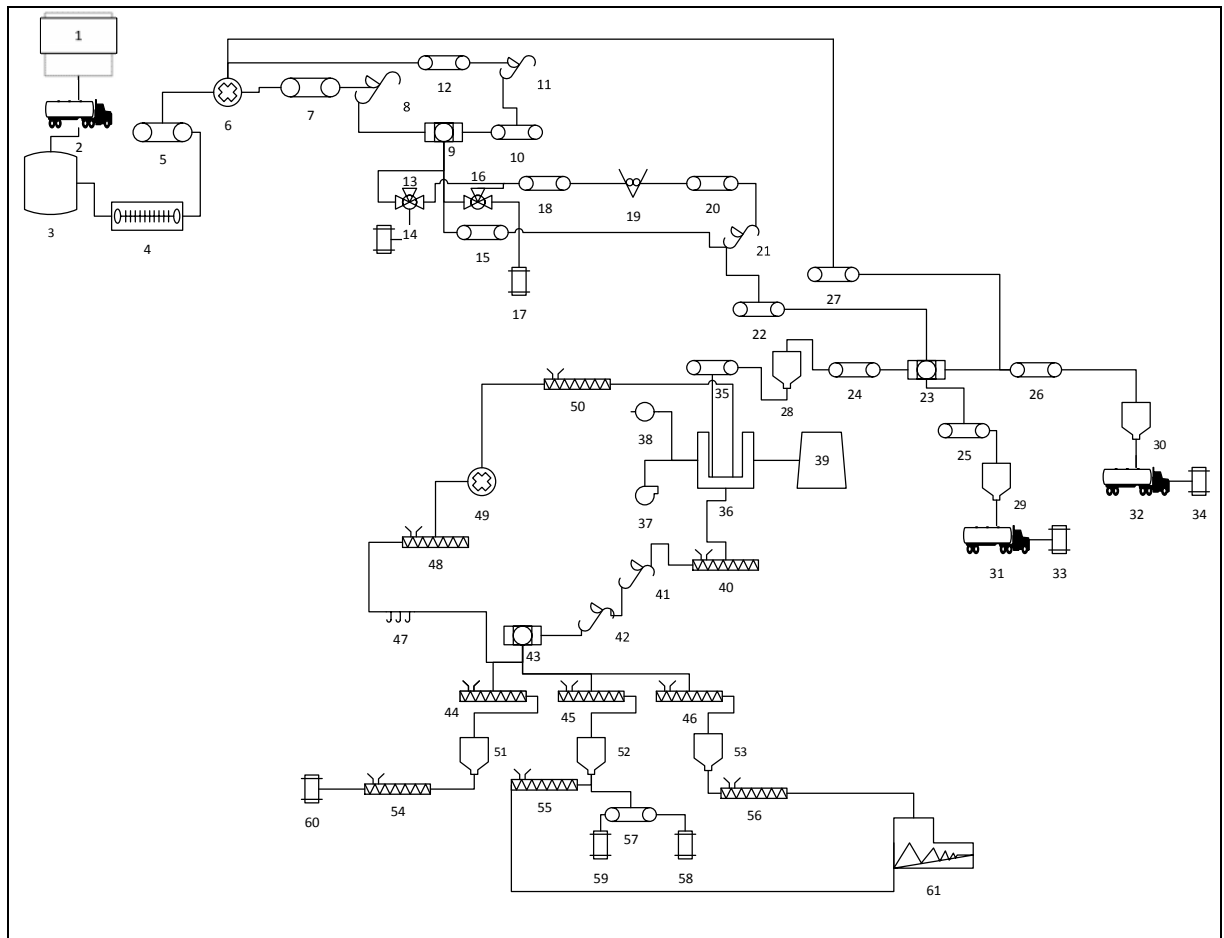


Figura 3.4 Diagrama de flujo del proceso de zeolita.

Simbología

1. *Cantera.*
2. *Transporte automotriz de materia prima.*
3. *Tolva alimentador.*
4. *Alimentador de placa.*
5. *7, 10, 12, 15, 18, 20, 22, 24, 25, 26, 27, 35, 57, Transportador de banda.*
6. *Molino triturador de martillo.*
8. *11, 21, 41, 42 Transportador de canchales.*
9. *Criba vibratoria.*
13. *16, Válvula desviadora de flujo*
14. *Almacenaje a granel de producción terminada, clase 3-12 mm.*
17. *Almacenaje a granel de producción terminada, clase 12-14 mm.*
19. *Molino triturador de Impacto.*
23. *43, Criba vibratoria electromagnética*
28. *Silo de 80 m³ clase de 0 – 12 mm.*
29. *Silo de 80 m³ clase de 0,4 – 4,76 mm*
30. *Silo de 55 m³ clase de 3 – 12 mm*
31. *32, Transporte automotriz de producción terminada.*
32. *34, Almacenaje a granel de producción terminada.*
36. *Horno secador rotatorio.*
37. *Alimentación de combustible.*
38. *Alimentación de aire.*
39. *Chimenea.*
40. *44, 45, 46, 48, 50, 54, 55, 56, Transportador de tornillo sinfín.*
47. *Transportador de cubos (aéreo).*
49. *Molino triturador de martillo (Remolador).*
51. *Silo de 18 m³, clase 3 – 12 mm.*
52. *Silo de 18 , clase de 0,4 – 3 mm y 0,4 – 2,5 mm.*
53. *Silo de 18 m³, clase de 0 – 0,8 mm.*
58. *Almacenaje a granel de producción terminada, clase 0,4 – 2,5 mm.*
59. *Almacenaje a granel de producción terminada, clase 0,4 – 3 mm.*
60. *Almacenaje a granel de producción terminada.*
61. *Máquina de envasado de producción terminada.*

3.2.2 Formas de emisión de los contaminantes a la atmósfera según diagrama de flujo

La emisión de material particulado en proporciones bajas (incluye PM₁₀) como resultado de la circulación natural del aire, se ubica en el almacenaje a cielo abierto de materia prima y producción terminada a granel, correspondiente a los puntos 14, 17, 34, 35, 58, 59, 60 en todas las etapas de transportación por conductores de bandas de materia prima y productos semielaborados de los sitios 5, 7, 10, 12, 15, 18, 19, 20, 22, 24, 25, 26, 27, 35 y 57. Estas emisiones son propias de este proceso productivo, así como, otras fugas por falta de

hermeticidad en los molinos trituradores número 6, 19 y 49 y las cribas vibratorias 9, 23 y 43 y en todos los casos la dispersión de este contaminante depende de la velocidad del viento que circula dentro de la planta, los cuales en su mayor proporción precipitan dentro del Radio Mínimo Admisible de Protección Sanitaria, sin influir en la calidad del aire del asentamiento poblacional. La etapa del proceso que origina la emisión del PM₁₀ que deteriora la calidad del aire en el poblado es en el horno secador rotatorio continuo de flujos unidireccional y directo, punto 36, donde los gases secos arrastran las partículas de polvo y van directamente a la chimenea, lugar 39, no tiene instalado dispositivos de control de la emisión.

3.2.3 Balances de materiales para diferentes ritmos productivos representativos de la emisión, cuantificación la misma

Los balances de materiales se muestran a continuación para cada una de las etapas del proceso, los cálculos están realizados para la máxima capacidad de la planta y la producción promedio real, con una entrada total de materia prima de 45 y 27,00 t/h respectivamente al primer molino triturador, además, se realizan otros balances para diferentes ritmos productivos, del 60% y el 80% de la capacidad máxima de producción para el Fertilizol, producto con tratamiento de secado que da lugar a las emisiones que ocasionan los ECCA, los balances parciales y otros resultados se muestran en los anexos del 7 al 12.

Balance general para la máxima capacidad de la planta

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} - \text{Salida} \dots\dots\dots(3.1)$$

$$\text{Acumulación} = (FA + FB + FC + FAF) - (FI + FK + FO + FP + FAC + FAE + FZ + FR)$$

$$\text{Acumulación} = 22,57 \text{ t/h}$$

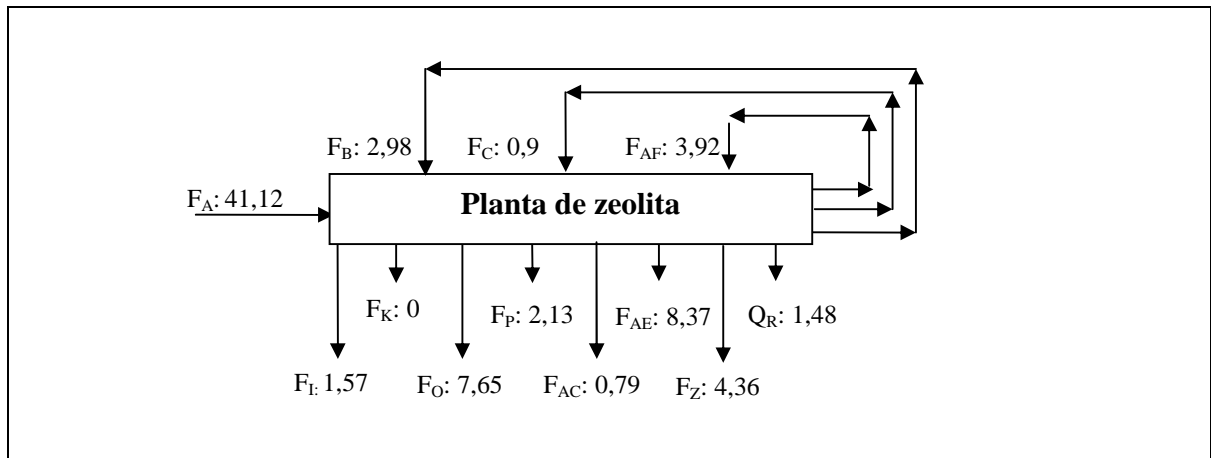


Figura 3.5 Balance de masa total.

Donde:

F_A : Flujo del mineral virgen de alimentación a la planta (t/h).

F_B , F_C , F_{AF} : Flujos de zeolita que recirculan para segundo tratamiento de molida (t/h).

F_I , F_K , F_O , F_P : Producción terminada de Zoad, Fertisol y Zook sin tratamiento de secado (t/h).

F_{AE} , F_{AC} , F_Z : Producciones terminadas de Fertisol con tratamiento de secado (t/h).

Q_R : Agua evaporada de la materia prima (t/h), ver anexo siete

3.3 Evaluación de la dispersión de los contaminantes emitidos por la planta de zeolita

A continuación se realiza la evaluación de la dispersión de los contaminantes.

3.3.1 Modelación de la dispersión de los contaminantes

El modelo ISCST3, elaborado y validado por la EPA, basado en la ecuación de penacho Gaussiano, es el utilizado para realizar la modelación de la dispersión del contaminante, por obtenerse resultados de elevada efectividad y confiabilidad, las características principales que lo hacen compatible con esta fuente y los resultados esperados es que acepta registros de datos meteorológicos horarios para definir las condiciones de ascenso del penacho, transporte, difusión y deposición, 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,

el flujo de deposición seco, húmedo o total y tiene la opción de seleccionar promedios para todo el periodo de entradas meteorológicas. (Núñez 2005a; Núñez 2006a; Núñez 2009a).

Al software es necesario adicionarle los datos de la fuente de emisión, de superficie y meteorológicos, los cuales se enumeran seguidamente.

3.3.1.1 Datos de la fuente de emisión

En el anexo 13, están los términos que permanecen constantes y los que varía en la planta de zeolita, utilizados en la modelación.

La estimación de la emisión de cada contaminante se realizó a través de la ecuación 3.2. Para el nivel de Actividad (A), se tuvo en cuenta la producción de zeolita horaria con tratamiento de secado, para diferentes ritmos productivos y el consumo de combustible de esta operación. Se utilizaron primeramente los datos del periodo poco lluvioso de los años 2004 al 2006, los cuales se actualizaron cada año hasta el 2012. Los balances de materiales para cada caso están descritos en los anexos del 7 al 12. Los factores de emisión aparecen en las tabla 3.1 y 3.2, según AP_42 de la EPA (AIRS 1990; EPA 1995a; EPA 1998; EPA 2004).

$$E = FE * A * \left(1 - \frac{ER}{100}\right) \dots\dots\dots(3.2)$$

Donde:

E: Emisión.

FE: Factor de Emisión

A: Nivel de intensidad de la actividad (consumo de combustibles, materia prima, producción terminada)

ER: Eficiencia global en la Redución de emisiones (%), según dispositivos de control.

- Resultados de la emisión para diferentes ritmos productivos aplicando ecuación 3.2.

Tabla 3.1 Emisión del PM₁₀ para diferentes ritmos productivos.

Capacidad de trabajo del secador rotatorio (%)	Producción de zeolita seca (kg/h)	FE para PM ₁₀ (g/kg de zeolita seca)	Emisión de PM ₁₀ (g/s)	Balance de materiales (Anexo)
98	13 520	6,8	25,54	7
80	10 810	6,8	20,43	8
60	8 110	6,8	15,32	9
52 (promedio)	7 160	6,8	13,53	10
40*	5 370	6,8	10,14	11
28**	3 780	6,8	7,14	12

*Produciendo Zook, sin tratamiento de secado, al 60% de la capacidad de la planta de zeolita.

**Produciendo Zoad, sin tratamiento de secado, al 60% de la capacidad de la planta de zeolita.

El método para determinar el consumo de combustible para cada balance de material en el secador rotatorio y sus resultados aparecen en el anexo siete.

Tabla 3.2 Emisión de contaminantes gaseosos para diferentes ritmos productivos.

Capacidad de trabajo del secador rotatorio (%)	Consumo de combustible (kg/h)	FE (g/kg combustible)			Emisión (g/s)			Balance de materiales (Anexo)
		SO ₂	NO _x	CO	SO ₂	NO _x	CO	
98	134,79	11	4,77	0,5	0,412	0,179	0,019	7
80	107,78	11	4,77	0,5	0,329	0,143	0,015	8
60	80,86	11	4,77	0,5	0,247	0,107	0,107	9
52 (promedio)	71,39	11	4,77	0,5	0,218	0,095	0,010	10
40	53,54	11	4,77	0,5	0,164	0,071	0,007	11
28	37,69	11	4,77	0,5	0,115	0,050	0,005	12

Para cada ritmo productivo se determinó también las horas de producción, horario de producción, flujo de gases, velocidad de salida de los gases. Los resultados de la emisión del

SO₂, NO_x y CO fueron muy bajos, por lo que la dispersión de estos contaminantes no da lugar a ECCA, excluyéndose del estudio.

3.3.1.2 Datos de superficie

Se utiliza los datos de rugosidad del terreno de la zona de estudio alrededor de la planta de zeolita (mapa con las curvas de nivel).

3.3.1.3 Datos meteorológicos

Para la elaboración de las bases de datos de los frentes fríos y las altas presiones migratorias escenarios descritos en el Sudepígrafe 3.1.5, se utilizaron los datos de los registros trihorarios diarios del periodo poco lluviosos de los años 2000-2006 de la estación meteorológica del Yabú, archivados en el Departamento de Clima del Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara, actualizándose cada año hasta el 2012: Se elaboraron tres bases de datos para los DAD según la clasificación de los frentes fríos por su origen y otra base de datos para los DAF.

Los valores de la lluvia corresponden al pluviómetro ubicado en el poblado de estudio, en las coordenadas geográficas 22°19'55"N, 80°06'17"W, perteneciente al Instituto de Recursos Hidráulicos (código 813). Las variables meteorológicas que integran las bases de datos es la dirección del viento (grados), velocidad del viento (m/s), temperatura (K), lluvia (mm), la estabilidad atmosférica y la altura de capa mezcla rural y urbana (m).

La estabilidad atmosférica se calculó por el método Turner, 1964, obteniéndose las Clases de Estabilidad de Pasquill-Gifford, el cual se expone en el anexo dos (Rodríguez 2012a). Los parámetros básicos necesarios para clasificar la estabilidad, son la velocidad del viento, medida a 10 m sobre el nivel del terreno y la estimación de la insolación diurna en base al ángulo de elevación solar y la nubosidad diurna y nocturna. Estas variables se registran en la estación meteorológica, excepto el ángulo de elevación solar, calculado mediante el software

“Sol” perteneciente al Instituto de Meteorología de Cuba (Rodríguez 2008; Rodríguez 2009a). Para determinar la altura de la capa de mezcla, se utilizó el método de Pasquill, 1961 anexo tres, el cual se combina con el método de Turner, ilustrado en el anexo dos obteniéndose las categorías de estabilidad atmosférica, determinándose las alturas de la capa de mezcla a partir de la velocidad del viento y el grado de insolación (Turner 1964; Turner 1970; Rodríguez 2008; Rodríguez, 2009a). La altura promedio horaria de la capa de mezcla para la estación Meteorológica del Yabú del periodo poco lluvioso está representada en el anexo 14.

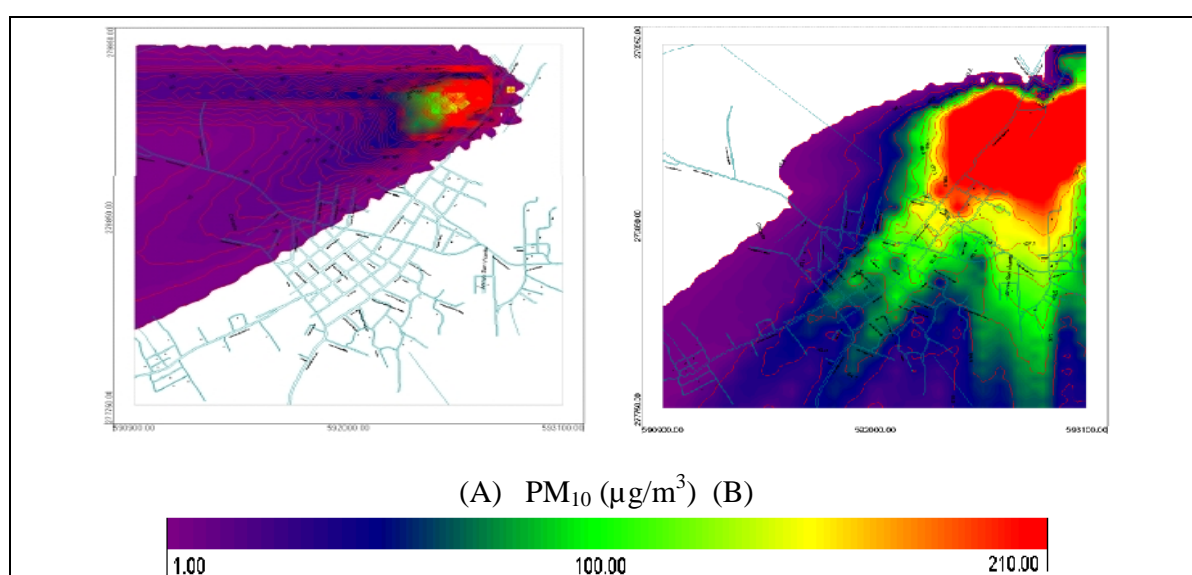


Figura 3.6 Modelación de la dispersión de las PM_{10} . Poblado de San Juan de los Yeras.

Los resultados de la modelación de la dispersión del PM_{10} emitido por la planta de zeolita se muestran en la figura 3.6 “A” y “B”, donde se evidencian los cambios significativos de la zona donde se concentra el contaminante, según la dirección predominante del viento, en el caso “A”, corresponde a los DAF y la trayectoria de la dispersión del contaminante se aleja del asentamiento poblacional, el deterioro de la calidad del aire no da lugar a ECCA. El caso “B” pertenece a los DAD y la dispersión del PM_{10} se realiza sobre el asentamiento poblacional, dando lugar a elevadas concentraciones del contaminante, afectando la calidad del aire hasta

provocar ECCA

3.3.2 Índice de Calidad del Aire y clasificación de la planta de zeolita de acuerdo EDV, según resultados de la modelación

Para los DAF, figura 3.6 “A”, el ICA es “Aceptable”, la concentración media del PM_{10} es de $40,00 \mu g/m^3$, en una parte (35%) del asentamiento poblacional, representando el 80% de la concentración máxima admisible, la máxima concentración del PM_{10} se ubica fuera del asentamiento poblacional ($170,00 \mu g/m^3$). En el caso “B” de esta figura, el ICA es “Mala”, la concentración media del PM_{10} es de $130,00 \mu g/m^3$, equivalente 2,6 veces la concentración máxima admisible, la máxima concentración se ubica dentro del asentamiento poblacional ($185,00 \mu g/m^3$), representando 3,7 veces la concentración máxima admisible, para una categoría de “Pésima”, las normas utilizadas en todos los casos para evaluar la concentración máxima admisible es la Guía de la WHO 2005 y para el ICA la NC 111: 2004.

Con los resultados obtenidos de la modelación de la dispersión del PM_{10} emitido por la planta de zeolita “La Tasajera” para cada uno de los escenarios de la dirección del viento, figuras 3.6 “A” y “B” y aplicándose lo establecido por este método en el Epígrafe 2.1, tabla 2.1, la misma se clasifica como una FFIPBU (Núñez 2006a; Núñez 2007c; Núñez 2008a; Núñez 2009c;).

3.3.3 Impacto de la calidad del aire en el poblado de San Juan de los Yeras

El impacto del PM_{10} en la calidad del aire del poblado de San Juan de los Yeras según los resultados del Subepígrafe 3.3.2 da lugar a una “Situación de Atención” de acuerdo a la NC 111: 2004 para el 85% de la población y dentro de esta, acontece una “Situación de Alerta” para el 30% de la población, los impactos según el ICA están en el anexo cinco.

3.4 Control para reducir la emisión de la planta de zeolita y mitigar los ECCA

Para reducir la emisión del PM_{10} de la planta de zeolita y prevenir y mitigar los ECCA, se

establecen acciones sin control agregado y se proponen otras acciones con control agregado (inversión de equipos tecnológicos), las cuales se describen a continuación.

3.4.1 Reducción de la emisión de la planta de zeolita con control agregado

Para recolectar y controlar el PM₁₀ que se emite a la atmósfera del proceso de secado se propone diferentes equipos de control, referidos en el Epígrafe 1.11 y anexo cuatro, donde se describen y se enuncian sus ventajas y desventajas, acompañado de imágenes, entre los que se encuentran el ciclón corto convencional y largo convencional y filtros de mangas.

Tabla 3.3 Reducción de la emisión del PM₁₀ con equipos de control.

Ritmos productivos del secador rotatorio respecto a su capacidad máxima (%)	Producción de zeolita seca (t/h)	% de reducción de la emisión por equipo					
		0	35	40	65	75	99
		Emisión con cada equipo de control (g/s)					
		A	B	C	D	E	F
98	13,52	25,54	16,60	15,32	8,93	6,38	0,25
80	10,81	20,43	13,27	12,25	7,15	5,10	0,20
60	8,11	15,32	9,95	9,19	5,36	3,83	0,15
52 (Promedio real)	7,16	13,53	8,79	8,11	4,73	3,38	0,13
40	5,37	10,14	6,59	6,08	3,54	2,53	0,10
28	3,78	7,14	4,64	4,28	2,49	1,78	0,07

Donde:

A: Sin equipo de control. **D:** Ciclón largo convencional (tres) instalado en paralelo.

B: Ciclón largo convencional. **E:** Ciclón corto convencional (dos) instalado en serie.

C: Ciclón corto convencional. **F:** Filtro de mangas.

En la tabla 3.3 se reportan los niveles de emisión con y sin la instalación de los equipos de control, comparándose bajo diferentes regímenes productivo del secador rotatorio, donde el filtro de mangas es el más eficiente, capaz de reducir la emisión hasta el 99%, llegando a ser

esta para la producción promedio actual de 0,13 g/s y para un ritmo productivo del 98% de la capacidad máxima de secado, la emisión es de 0,25 g/s, situación que no origina ECCA sobre el asentamiento poblacional, independientemente de que las condiciones meteorológicas sean las más favorables para esto (vientos de dirección norte).

3.4.1.1 Selección de los equipos de control de la emisión

Para la selección de los equipos de control de la emisión acorde a la capacidad máxima de trabajo del secador rotatorio, se tiene en cuenta el flujo volumétrico máximo por hora de gas a tratar, determinándole el 10% por encima de este, para evitar obstrucciones que afecten la eficiencia, el flujo de gas calculado es de 4 208,6 m³/h. Las expresiones utilizadas están en el anexo 15. Otras variables que se tienen en cuenta son la temperatura del gas, el tamaño de las partículas y el número de equipos a trabajar en serie o paralelo.

Teniendo en cuenta la eficiencia de remoción de los diferentes equipos de control, sus ventajas y desventajas y otras variantes de aplicación enumeradas en el anexo cuatro y la tabla 3.3 la combinación del ciclón corto convencional con el filtro de mangas, es la más factible, primero porque trabajan ambos equipos eficientemente, el primero removiendo las partículas de mayor tamaño y el segundo el resto del material particulado, sin que ocurran obstrucciones, ni acumulaciones en este último, segundo, porque logra reducir la emisión actual de PM₁₀ en un 99%, de 13,53 g/s a 0,13 g/s y para un ritmo productivo del secador rotatorio del 98% de su capacidad máxima, la declinación de la emisión es de 25,54 g/s a 0,25 g/s, evitando los episodios críticos de contaminación atmosférica y posibilitando elevar los ritmos productivos a la máxima capacidad instalada, con el menor deterioro de la calidad del aire.

3.4.1.2 Evaluación del ICA con la aplicación de reducción de la emisión con control

agregado

La variante seleccionada de instalación de equipos de control de la emisión en la planta de zeolita para la captación del PM_{10} , reduce la emisión a 0,25 g/s para un ritmo productivo del 98% de la capacidad máxima de trabajo del secador rotatorio, los resultados de la dispersión para esta emisión en el EDV II, condición meteorológica muy favorable para que ocurra un ECCA, están en el anexo 16. Al evaluar el ICA, este tiene categoría de "Buena", la concentración máxima del PM_{10} en la zona poblacional es de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el 30% de la concentración máxima admisible, situación ambiental con muy baja probabilidad para la ocurrencia de ECCA.

3.4.2 Reducción de la emisión sin control agregado

Para disminuir la emisión del PM_{10} en la planta de zeolita por este método, se procede a utilizar las condiciones meteorológicas más apropiadas para la dispersión del contaminante fuera del asentamiento poblacional de conjunto con la aplicación de medidas organizativas, operacionales y de operatividad que permiten niveles productivos de bajas emisiones, los cuales se desarrollan a continuación.

3.5 PCA a la planta de zeolita

Los PCA se elaboran con siete, tres y un día de antelación a la posible ocurrencia del ECCA respectivamente, los términos utilizado se puntualizan a continuación:

Los términos que permanecen constantes están en el anexo 13, determinados en el Subepígrafe 3.3.1.1, 3.3.1.2 y 3.3.1.3.

Los términos que varían, Subepígrafe 3.3.1.1 y 3.3.1.3, se actualizan para cada uno de los PCA, de estos los que pertenecen a la planta de zeolita se intercambia la información con la

misma, detallándose la posible intensidad del ECCA a ocurrir y los directivos de la planta con las herramientas de trabajo para estos casos, toman decisiones para variar los ritmos productivos, horas de producción, horario de producción y consumo de materia prima, estos datos son los utilizados en el pronóstico, logrando resultados con elevada calidad y exactitud. La actualización de los datos meteorológicos horarios, se realiza a través del pronóstico extendido del tiempo del departamento de pronóstico del Centro Meteorológico obtenido del modelo MM5. Para el cálculo de la estabilidad atmosférica y la altura de la capa de mezcla se aplica la metodología del Epígrafe 3.3.1.3, anexos dos y tres.

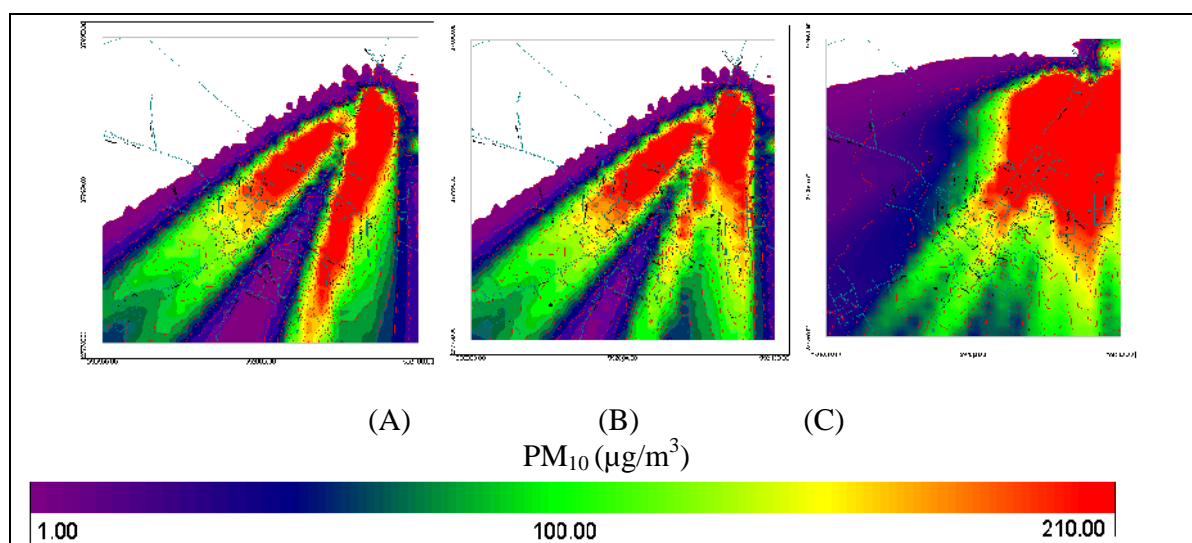


Figura 3.7 PCA con siete días (A), tres días (B) y un día (C) antes del ECCA.

Ejemplos del pronóstico con siete, tres y un días de antelación a la posible ocurrencia del ECCA, provocado por el fenómeno meteorológico “frentes fríos”, están en los anexos del 17 al 22, un ejemplo de ellos para siete días es la figura 3.7 “A” con fecha 14/11/2008, donde la concentración promedio del PM₁₀ en la zona poblacional es de 100,00 µg/m³, superando dos veces la concentración máxima admisible, para un ICA de “Mala”, dando lugar a una “Situación de Atención”, la concentración máxima dentro del asentamiento poblacional es de

150,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 160,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, para una categoría del ICA de “Pésima”.

La figura 3.7 “B”, con fecha 18/11/2008 con tres días de antelación al ECCA, la concentración promedio en la zona poblacional es de 120,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ del PM_{10} , 2.4 veces la concentración máxima admisible, para un ICA de “Mala”, para una “Situación de Atención”. Las concentraciones máximas dentro del asentamiento poblacional llegan a ser de 160,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 170,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dando lugar a una categoría del ICA de “Pésima”.

El PCA con un día de antelación al ECCA figura 3.7 “C”, fecha 20/11/2008, la concentración promedio del PM_{10} es similar al pronóstico anterior por lo que se mantiene el Aviso de “Situación de Atención”, en este caso el área afectada es mayor.

3.6 Comunicación del PCA a responsables e implicados

Los PCA se expiden hacia la planta de zeolita según lo señalado en el Subepígrafe 2.2.2, inmediatamente después de su confección, incluye mapas, (ejemplos figuras 3.5 A, B y C,) evaluación de los resultados, intercambio de información entre especialistas de ambas partes con el propósito de recurrir a las medidas más adecuadas. En la tabla 3.4 están las acciones organizativas, operacionales y de operatividad aplicadas a la planta de zeolita, para reducir las emisiones del PM_{10} y minimizar los ECCA en el poblado de San Juan de los Yeras.

Tabla 3.4 Acciones para reducir la emisión del PM_{10} en la planta de zeolita los DAD.

Acciones aplicadas por la planta de zeolita para reducir emisión de PM_{10} y mitigar los ECCA	Frecuencia (%)
Ajuste de los horarios productivos (de una a dos horas) sin incremento productivo el DAD	3
Ajuste de los horarios productivos (de una a dos horas) con incremento productivo hasta el 20% el DAD	18
Cambios en los ritmos de producción, se reducen del 10% al 20% el DAD y se	22

transfieren para otro día, anterior o posterior a este	
Cambios en los ritmos de producción, se reducen del 20% al 40% el DAD y se transfieren para otro día, anterior o posterior de este	12
Paradas parciales hasta 3,5 horas el DAD, se produce otro día	6
Paradas parciales hasta 4,5 horas el DAD, se produce otro día	4
Paradas totales, la producción se realiza otro día, anterior o posterior al DAD	20
Mayor producción de zeolita húmeda, Zook y Zoad sin tratamiento de secado y con tratamiento de secado hasta el 30% el DAD	5

3.7 Validación del PCA

La validación de los PCA se realizó a través del monitoreo atmosférico del PM₁₀, evaluando el ICA en el poblado de San Juan de los Yeras, de la siguiente forma:

3.7.1 Selección de los sitios de monitoreo

Para la selección de los puntos de monitoreo se tuvo en cuenta las zonas más susceptibles por la cantidad de habitantes, características naturales, físicas y de construcción, que se encontraban con deterioro del ICA de “Mala” y “Pésima” según la NC 111: 2004, evaluada previamente a través de la modelación de la dispersión del contaminante, además de otras consideraciones que aparecen en esta norma tales como, estar alejado de la interferencia de personas, flujo de vehículos y chimeneas, la toma de muestras se ubicó 1,5 metros de altura sobre el nivel del terreno. Se instalaron dos Estaciones de Monitoreo Activo (EMA), una a 19°66'67.21"N, 81°56'78.31"W y la segunda en 21°25'10.21"N, 85°76'64.51"W, figura 3.1.

3.7.2 Monitoreo atmosférico

Las muestras se tomaron en campañas intensivas de muestreos periódicos, en escenarios meteorológicos seleccionados con el fin de caracterizar la emisión del PM₁₀ emitido por la planta de zeolita en días representativos en cuanto a, condiciones meteorológicas, principalmente en dirección, fuerza del viento, con la planta trabajando (DAF, DAD) e

inactiva (DI, DID) en el periodo poco lluvioso (noviembre – abril) en las siguientes fechas, año 2006 en diciembre del 13 al 28, en el 2007 en enero del 8 al 15, febrero del 13 al 20, diciembre del 16 al 31, en el 2008 en enero del 15 al 29, febrero del 1 al 14, abril del 11 al 18, y noviembre del 17 al 24, los resultados se muestran en el anexo 23, las variables meteorológicas corresponden a la Estación Meteorológica del Yabú y los días muestreados fueron 93, los cuales se desglosan a continuación, según su clasificación:

- Días Inactivos (*DI*): La planta de zeolita no trabaja, no hay emisión del PM₁₀ (22 días).
- Días Inactivos Desfavorables (*DID*): La planta de zeolita no trabaja, no se emite PM₁₀, pero cambian las condiciones meteorológicas por la presencia de un “fenómeno meteorológico” (frente frío), seguido de altas presiones migratorias (11 días).
- Días Activos Favorables Negativos (*DAFN*): La planta de zeolita trabaja, hay emisión del PM₁₀ pero no se dispersa directamente sobre el poblado, dirección del viento del noreste, este-noreste, este, pero al final de la tarde, cuando la fuente de emisión está inactiva, cambian las condiciones meteorológicas, entrada del frente frío, seguido de altas presiones migratorias, estos casos no son representativos, solamente en el periodo estudio ocurrió en una ocasión.
- *DAF*, 33 días.
- *DAD*, 27 días.

3.7.3 Control y aseguramiento de la calidad de monitoreo

Para lograr la calidad adecuada de los datos, buena precisión y exactitud en las mediciones, se cumplió con el mantenimiento y calibración de los dos CPV-8D/A, figura 3.8, se realizaron las visitas programadas semanalmente y se utilizaron los blancos de campo.



Figura 3.8 Captador de pequeño volumen, CPV-8D/A

3.7.4 Procedimiento para determinar el PM₁₀

Para la recolección de las muestras, se utilizó filtro de fibra de vidrio de diámetro de los poros entre 20-25 μm , y del filtro de 55 mm., con tiempo de muestreo de 24 horas, caudal de succión de 2,2 l/min., las muestras se analizaron a través de un método gravimétrico determinándose las PST y aplicándose lo establecido en la NC 111: 2004, que indica, que el PM₁₀ corresponde alrededor del 50% del valor de las PST obtenidas por gravimetría.

3.7.5 Análisis gravimétrico

El análisis gravimétrico es utilizado para determinar la cantidad de material depositado en los filtros, pesando estos antes y después de la toma de muestra, aplicando la expresión 3.3 para determinar las PST, cumpliendo con los protocolos que son fundamentales para lograr la calidad y precisión en el resultado final, según la NC 111: 2004.

Instrumentación y materiales.

1. Balanza microanalítica marca SARTORIUS, con una precisión de hasta décima de miligramos, adaptada a la geometría del filtro.
2. Deshumidificador.

La expresión utilizada para el cálculo de la concentración de PST fue la siguiente:

$$CPST (\mu\text{g}/\text{m}^3) = ((P_2 - P_1)/V_1) \cdot [10]^6 \dots\dots\dots(3.3)$$

Donde:

CPST: Concentración de Partículas Suspendidas Totales ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

P_2 : valor de la segunda Pesada (g)

P_1 : valor de la primera Pesada (g)

V_0 : Volumen de aire corregido a TPN. Este se calcula por la fórmula siguiente:

$$V_0 = \frac{V_t * 298 * P}{(273 + T) * 1013} \dots\dots\dots(3.4)$$

Donde:

V_t : Volumen de aire aspirado.

P: Presión (en hPa)

T: Temperatura (en °C)

Los resultados de los análisis gravimétrico de las EMA están en los anexos 24 y 25.

3.8 Evaluación del PCA

Para la evaluación de los PCA, primeramente se determinó el porcentaje de confiabilidad a través de la ecuación 2.1 del Subepígrafe 2.2.5.1, y los resultados obtenidos se muestran en el anexo 26 y en las figuras 3.9 y 3.10, donde los PCA con siete días de antelación al ECCA, son los menos efectivos, debido a la incertidumbre de las variables meteorológicas pronosticadas y a la producción a realizar por la planta de zeolita el DAD con probabilidad de ocurrencia del ECCA. Los PCA con tres días de antelación al ECCA, en el 11% de los casos la confiabilidad estuvo por debajo del 80%, siendo el valor más bajo 77.88%, en el resto de los PCA (89%), la confiabilidad fue superior al 80% y de ellos el 44% superior al 90%, valores similares obtuvieron los PCA para un día de antelación al ECCA, siendo una confiabilidad elevada.

$$\% \text{ Confiabilidad} = \left(\frac{CCP}{C_{prom.CM}} \right) * 100$$

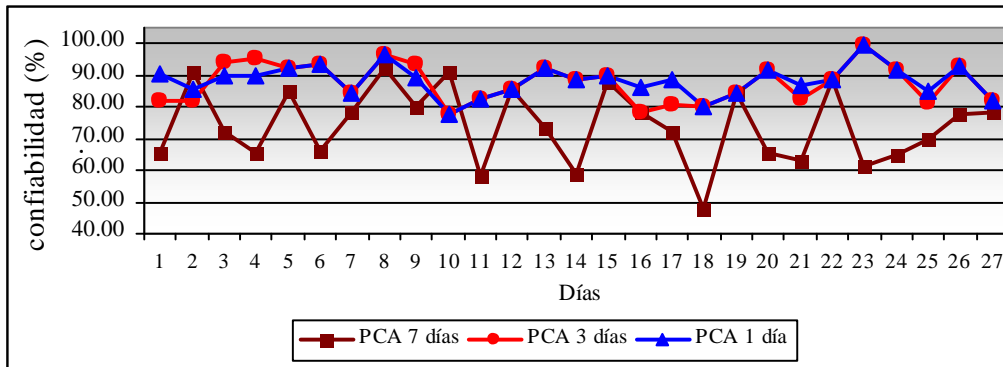


Figura 3.9 Comportamiento del porcentaje de confiabilidad del PCA.

Los valores medios de la confiabilidad están en la figura 3.9, estos se elevaron de 74,17% para los PCA con siete días antes del ECCA, a 87,52% para tres días y 88,325% para un día.

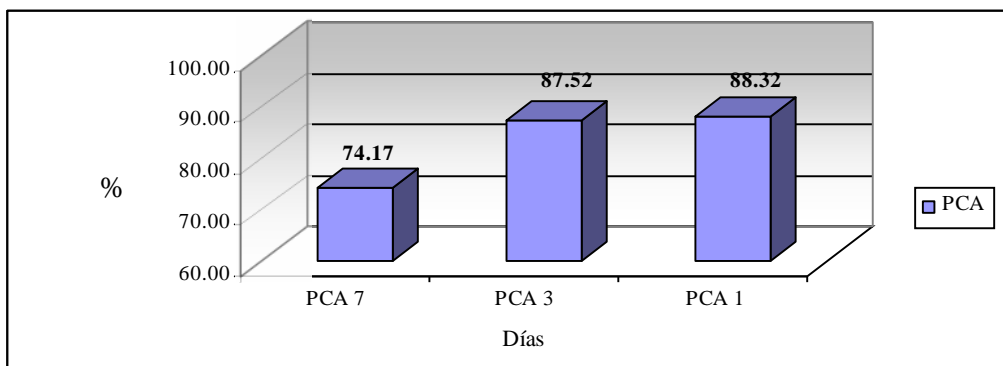


Figura 3.10 Valores promedios de la confiabilidad de los PCA.

En segundo lugar para evaluar la exactitud del PCA se utilizó la Raíz del Error Cuadrático Medio (RECM), expresión 2.2, Subepígrafe 2.2.5.2, esta se expone a continuación.

$$RECM = \sqrt{\left(\frac{\sum (C_{prom.Cm} - CCP)^2}{N}\right)}$$

Los resultados de la discrepancia están en la figura 3.11 y anexo 27, siendo los valores promedio de $30,76 \pm 13,07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los pronósticos con siete días de antelación al ECCA, para los PCA con tres días, el valor promedio fue de $17,71 \pm 7,80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y para un día de antelación fue de $16,76 \pm 6,02 \mu\text{g}/\text{m}^3$, estos resultados están por debajo de los $20,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en

el 74% de los casos, según lo establece la literatura internacional reafirmando su exactitud.

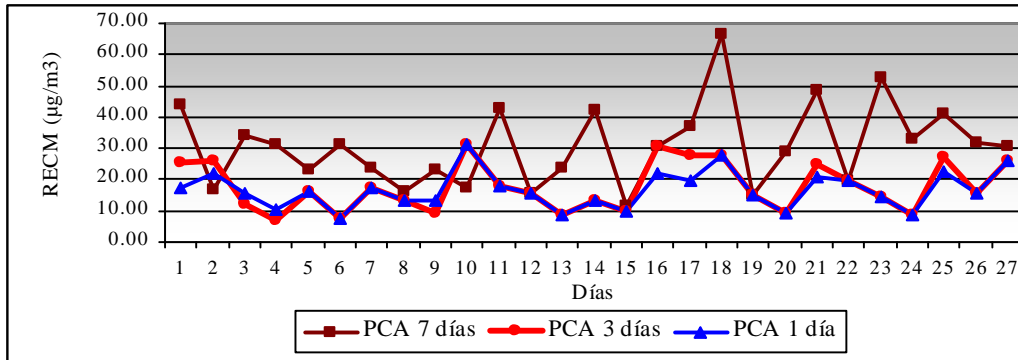


Figura 3.11 Comportamiento de la discrepancia de los PCA de PM₁₀.

Para evaluar la efectividad del aviso se aplicó la expresión 2.3, Subepígrafe 2.2.5.3.

$$\% \text{ Efect. aviso} = \left(\frac{NA}{NECCA_{real}} \right) * 100$$

Por último en la figura 3.12 y anexo 28 están los resultado del comportamiento del nivel de aviso de los ECCA y su porcentaje de efectividad, de los 83 PCA con un día de antelación al ECCA, el 86% coincidió con lo ocurrido para una elevada efectividad, el 14% de los pronósticos que no coincidieron estuvo dado por; el valor de la concentración del PM₁₀ pronosticado próximo al cambio de categoría de calidad del aire (10,00 µm/m³) respecto al real, aumento de la emisión y cambios en la dirección del viento.

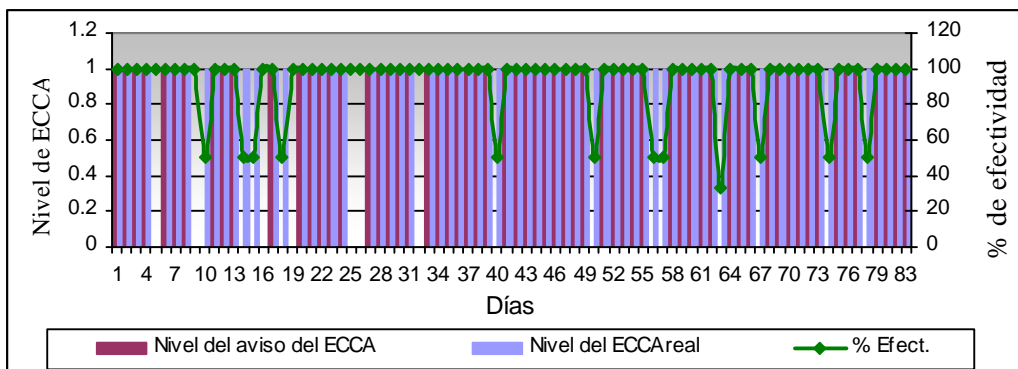


Figura 3.12 Comportamiento del nivel de aviso del ECCA y su % de efectividad.

3.9 Resultados del monitoreo del PM₁₀. Análisis estadístico

En los anexo 24 y 25 se muestra la concentración diaria de PM₁₀ obtenida en el periodo de monitoreo en las dos estaciones. El análisis estadístico se realizó utilizando el programa, STATGRAPHICS en su versión 5.1, las normas utilizadas son; para evaluar la concentración máxima admisible la guía de la WHO 2005 y para evaluar el ICA la NC 111: 2004.

Tabla 3.5 Análisis estadístico de la concentración promedio del PM₁₀.

Clasificación de los días	Cprom PM ₁₀ (μg/m ³) en 24 h			
	Mínimo	Máximo	Media aritmética	Desviación estándar
DI	22,46	28,55	26,92	1,58
DID	14,93	28,32	25,01	4,58
DAF	33,69	47,67	41,77	4,26
DAD	81,94	130,72	113,34	16,99

En la tabla 3.5 la concentración promedio del PM₁₀ fue de 113,34 ±16,99 μg/m³ en los días activos desfavorables, superando 2,26 veces la concentración máxima admisible, para un ICA de “Mala”, superando 2.7 veces los resultados de los días activos favorables, con un máximo de 130,72 μg/m³. En los días activos favorables la concentración promedio es de 41,77 ± 4,26 μg/m³ para un ICA de “Aceptable”, con un máximo de 47,67 μg/m³, los días inactivos e inactivos desfavorables el ICA es “Buena”, no hay emisión de PM₁₀.

En la figura 3.13, se representan los valores medios, mínimos y máximos de la concentración del PM₁₀ en los DAD, todos los resultados están por encima de la norma, el valor más bajo está al 55% por encima de esta. Las concentraciones del PM₁₀ están condicionadas por la dispersión del contaminante emitido por la planta de zeolita sobre el asentamiento poblacional.

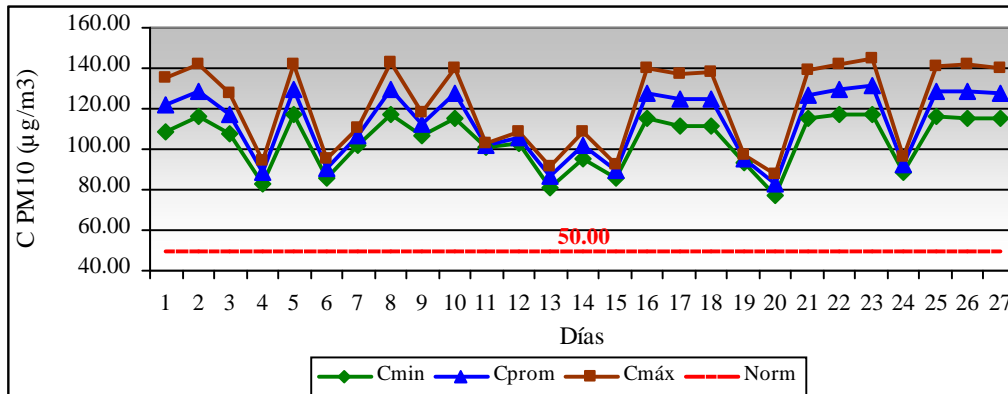


Figura 3.13 Comportamiento de la concentración de PM₁₀ en los DAD.

Los valores de la concentración promedio, mínimos y máximos del PM₁₀ en los DAF se relacionan en la figura 3.14, todos los resultados están por debajo de la norma, debido a que la dispersión del PM₁₀ emitido por la planta de zeolita no se realiza directamente sobre el asentamiento poblacional.

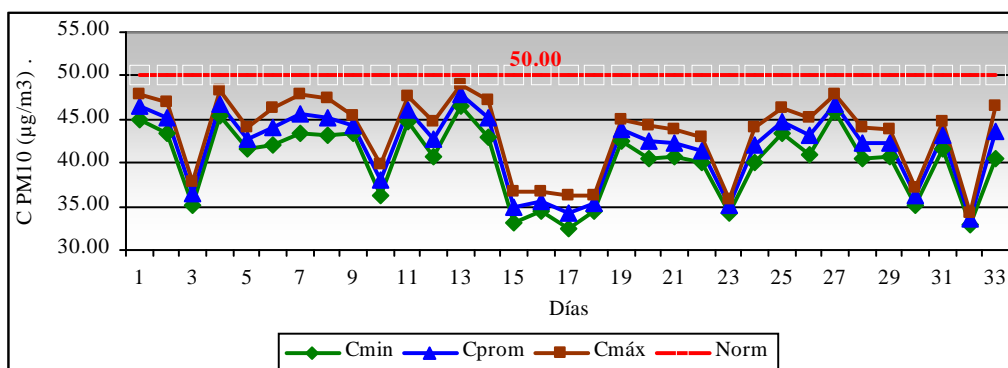


Figura 3.14 Comportamiento de la concentración de PM₁₀ en los DAF.

3.10 Relación entre la concentración del PM₁₀ y las variables meteorológicas

Los días inactivos e inactivos desfavorables anexo 29, la planta de zeolita no trabaja, la concentración del PM₁₀ corresponde a la contaminación de fondo, los valores de la lluvia aunque muy puntualmente, ocasionaron disminución de la concentración del contaminante.

En los días activos favorables, la planta de zeolita emite PM₁₀, pero la dispersión de este no da lugar a elevadas concentraciones sobre el asentamiento poblacional, la dirección del viento es

la variable determinante, cuando proviene del este-sureste, disminuye la concentración del PM₁₀ hasta valores mínimos y cuando la dirección tiene rumbo este, este-noreste se eleva la concentración del PM₁₀. Los días con lluvia la concentración del PM₁₀, se redujo, anexo 29.

En los días activos desfavorables, la planta de zeolita emite PM₁₀ que se dispersa directamente sobre el asentamiento poblacional. La concentración máxima del contaminante tiene lugar con la dirección del viento del norte y disminuye en la medida que se separa de este rumbo, la calidad del aire en el poblado depende para estos días de la emisión de la planta de zeolita y del comportamiento de la dirección del viento, anexo 29.

3.11 Análisis estadístico del PM₁₀. Determinación de un modelo de pronóstico

El tratamiento estadístico se realizó utilizando el programa, STATGRAPHICS en su versión 5.1, el cual permite extraer conocimiento predictivo de los procesos existentes. En la tabla 3.6, están los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple, que describe la relación entre la “Cprom. PM₁₀” y tres variables independientes, correspondientes al periodo de monitoreo de los años 2006 al 2008 en el poblado de San Juan de los Yeras.

Donde:

dd: Dirección del viento (grados), **E:** Emisión del PM₁₀ (g/s), **ff:** fuerza del viento (m/s).

Tabla 3.6 Estadísticos del modelo.

Parámetro	Error		Estadístico	
	Estimación	Estándar	T	P-Valor
CONSTANTE	137,266	8,96128	15,3177	0,0000
dd	-1,43731	0,0948955	-15,1463	0,0000
E	4,20833	0,856711	4,9122	0,0001
ff	0,203646	1,17286	0,173632	0,8637

La ecuación del modelo ajustado es la 3.5, donde las variables “dirección del viento” y la

“emisión” son altamente significativas, dado que el p-valor en el modelo estadístico es inferior a 0,01, para un nivel de confianza del 99%, no siendo así para la fuerza del viento, el cual tiene el p-valor más alto de las variables independientes (0,8637), simplificándose este término del modelo (tablas 3.6)

$$C_{prom} PM_{10} \left(\frac{\mu g}{m^3} \right) = 137.266 - (1.43731 * dd) + (4.20833 * E) \dots\dots\dots(3.5)$$

Existe una relación estadísticamente significativa entre las variables, para un nivel de confianza del 99%, dado que el p-valor en el análisis de varianza del modelo, ANOVA, es inferior a 0,01, anexo 30.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 95,3336% de la variabilidad de la C_{prom}.PM₁₀ y el estadístico R-cuadrado ajustado que es más conveniente para comparar modelos con diferentes números de variables independientes es de 94,7249%, evidenciando la alta calidad del modelo. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos en 22,5057. El error absoluto medio de los residuos (MAE) es de 2,63245 y el estadístico Durbin-Watson (DW) es de 1,71888 (P=0,0734), dado que el p-valor es superior a 0,05, no hay indicio de autocorrelación serial en los residuos. En el anexo 30 se muestra otros estadísticos del modelo.

El modelo se puso en práctica para determinar la concentración promedio del PM₁₀, utilizando los datos con un día de antelación a la ocurrencia del ECCA, a los resultados obtenidos se le determinó la confiabilidad promedio, esta fue del 87%, en el 74% de los casos la confiabilidad superó el 80%, de ellos el 48%, tiene una confiabilidad superior al 90%, anexo 31. Estos resultados demuestran la precisión del modelo de pronóstico como otra herramienta práctica.

3.12 Resultados de la aplicación del PCA en los días activos desfavorables

En el anexo 32, se muestra el periodo de estudio con los días desfavorables que no ocurrieron los ECCA en el asentamiento poblacional de San Juan de los Yeras, como resultado de la aplicación de los PCA y la implementación de medidas de control de la emisión en la planta de zeolita, fuente responsable de los mismos. En los 64 días sin ECCA, se dejó de emitir 12,416 t de PM₁₀ sobre el asentamiento poblacional.

3.13 Impacto del PM₁₀ emitido por la planta de zeolita en la salud de la población de San Juan de los Yeras

El estudio epidemiológico experimental se realizó con la población de San Juan de los Yeras, teniendo en cuenta las Crisis Agudas de Asma Bronquial (CAAB), con tratamiento estadístico a las bases de datos epidemiológico, variables meteorológicas y la contaminación por PM₁₀.

3.13.1 Comportamiento de las CAAB con el ICA en el periodo de monitoreo

En la zona de estudio la población está expuesta a cuatro categorías del Índice de Calidad del Aire para el PM₁₀, según la NC 111: 2004, originado por las emisiones de este contaminante por la planta de zeolita "La Tasajera", en diferentes escenarios meteorológicos tales como "Días Inactivos e Inactivos Desfavorables" ICA "Buena", "Días Activos Favorables" ICA "Deficiente" y "Días Activos Desfavorables" ICA "Mala" y "Pésima", según resultados mostrados en el Epígrafe 3.9, tabla 3.5, figuras de 3.13 y 3.14. Los casos diarios de CAAB (incluye los asmáticos) se obtuvieron de las hojas de cargo de los Consultorios Médicos de la Familia número 43, 46, 47, 48, 62, 67 y el policlínico de San Juan de los Yeras, del el periodo de estudio de esta investigación.

El comportamiento diario de las CAAB se exponen en la figura 3.15 y anexo 33, reflejando la superioridad continua de los casos de enfermos en los DAD respecto a los demás días,

influenciado por el deterioro del ICA por el PM_{10} , el cual es de “Mala” y “Pésima”, los valores mínimos para estos días superan en más de cinco casos a los máximos registrados en los DAF. En los DID, se exacerban las CAAB influenciado por el comportamiento del estado del tiempo diario, dado por la sensibilidad o reacción de cada individuo ante la variabilidad del tiempo, en dependencia de la capacidad de adaptación individual y no por el deterioro del ICA, ya que la planta de zeolita no emite PM_{10} , (Lecha, 1999; De la Vega, 2010; De la Vega, 2011).

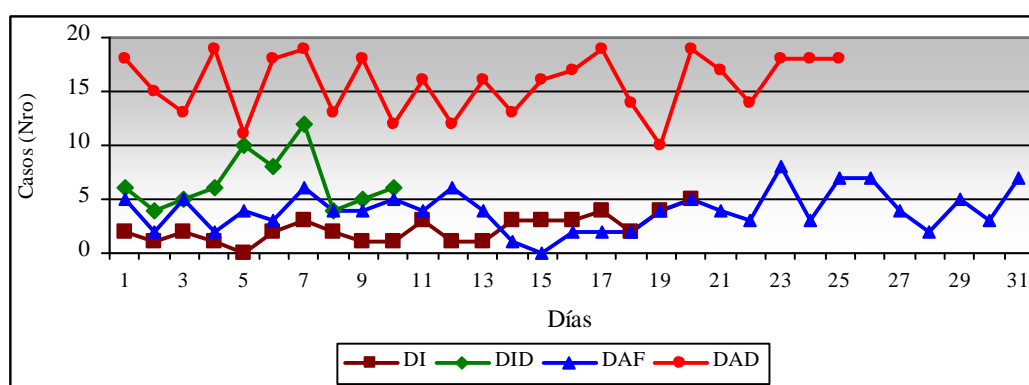


Figura 3.15 Comportamiento de las CAAB diarias.

El comportamiento de las CAAB en los DAF, anexo 33, evidencia una morbilidad moderada con la concentración promedio del PM_{10} , ocurren los valores máximos los días de mayor deterioro del ICA y viceversa, el mayor número de casos diarios no llega a ser de 10, en estos días el ICA es Aceptable. Las CAAB en los DAD, anexo 33, tienen una morbilidad muy acentuada con la concentración promedio del PM_{10} , ocurriendo los valores máximos, los días de mayor deterioro de la calidad del aire y viceversa, con casos máximos de CAAB por encima de 20. El deterioro del ICA en estos días alcanza categorías de “Mala” y “Pésima”.

3.14 Análisis estadístico

El tratamiento estadístico se realizó utilizando el programa, STATGRAPHICS en su versión 5.1, los resultados están en la tabla 3.7. En los DAD ocurren los valores más elevados de la

concentración media del PM₁₀ y de los casos medios de las CAAB con $16,44 \pm 3,77$, superando 4,21 veces los valores medios de los DAF ($3,91 \pm 1,87$), con un valor máximo de 27. En los días inactivos e inactivos desfavorables el comportamiento de la concentración promedio del PM₁₀ es similar, no hay emisión de contaminante de la planta de zeolita, sin embargo los valores medios de los casos de las CAAB varían en 2,77 casos, influenciado principalmente por el comportamiento del estado del tiempo diario explicado anteriormente.

Tabla 3.7 Análisis estadístico del comportamiento de las CAAB con la Cprom. PM₁₀.

Clasificación de los días	Media aritmética Cprom. PM ₁₀ (µg/m ³)	CAAB (Nro. casos)			
		Mínimo	Máximo	Media aritmética	Desviación estándar
DI	26,92	0	5	2,29	1,31
DID	25,01	4	12	6,36	2,61
DAF	41,77	0	8	3,91	1,87
DAFN	39,94	-	6	-	-
DAD	113,34	10	27	16,44	3,77

Tabla 3.8 Estadísticos del modelo.

Parámetro	Error		Estadístico	
	Estimación	Estándar	T	P-Valor
CONSTANTE	-1,39254	1,21493	-1,14619	0,2569
Cd	0,563047	0,66478	0,846967	0,4008
Cprom. PM ₁₀	0,145496	0,0173256	8,39773	0,0000
dd	-0,000666436	0,00250894	-0,265624	0,7916
E	-0,1901	0,0700742	-2,71283	0,0090
ff	0,029271	0,305276	0,0958837	0,9240

En la tabla 3.8, se muestran los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple,

para describir la relación entre las CAAB y cinco variables independientes.

La ecuación del modelo ajustado (3.6), según estadísticos del modelo, las variables Cprom. PM₁₀ y la emisión son altamente significativas, dado que el p-valor en el modelo estadístico es inferior a 0,01, para un nivel de confianza del 99%, no siendo así la fuerza, dirección del viento y la clasificación de los días, en el caso de la “ff” tiene el p-valor más alto de las variables independientes (0,9240), estos tres términos se extraen del modelo (tablas 3.9 y anexo 34).

$$CAAB = (-1,39254 + (0,145496 * C_{prom. PM_{10}}) - (0,1901 * E)) \dots\dots\dots(3.6)$$

Existe una relación estadísticamente significativa entre las variables, para un nivel de confianza del 99%, dado que el p-valor en el análisis de varianza del modelo, ANOVA, es inferior a 0,01, anexo 34.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 95,0523% de la variabilidad en la CAAB y el estadístico R-cuadrado ajustado es de 94,5856%, demostrando la alta calidad del modelo. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos en 4,30111. El error absoluto medio de los residuos (MAE) es de 1,10296 y el estadístico Durbin-Watson (DW) es de 2,26156 (P=0,0435), dado que el p-valor es inferior a 0,05, hay indicio de una posible correlación serial en los residuos. Otros estadísticos del modelo en el anexo 34.

3.15 Modelo de pronóstico de las CAAB. Análisis estadístico

Para comprobar el funcionamiento del modelo de pronóstico de las CAAB, (ecuación 3.6) se utilizaron los datos meteorológicos y de la planta de zeolita con un día de antelación a la ocurrencia del ECCA de los DAD, posterior al periodo de monitoreo, los resultados se exponen en el anexo 34, donde el pronóstico de las CAAB evidencia una relación común, sin desviaciones significativas con las CAAB Reales, las fluctuaciones de los casos diarios son

similares entre lo pronosticado y lo ocurrido, tanto para los valores máximos como mínimos, estos resultados indican la exactitud de los resultados del pronóstico de las CAAB.

Conclusiones parciales

1. El pronóstico de calidad del aire con siete días de antelación a la ocurrencia del ECCA, permite a la planta de zeolita planificar diferentes variantes productivas que minimizan el deterioro de la calidad del aire, sin pérdidas productivas.
2. Los indicadores de confiabilidad, discrepancia y efectividad del aviso de los pronósticos de calidad del aire están acorde a lo reportado internacionalmente.
3. La concentración promedio del PM_{10} es de $113,34 \pm 16,99 \mu g/m^3$ en los días activos desfavorables, superando 2,26 veces la concentración máxima admisible, para una categoría del Índice de Calidad del Aire de “Mala”, según la NC 111: 2004.
4. La validación del modelo de pronóstico de la concentración del PM_{10} alcanzó una confiabilidad promedio del 87%, lo cual demuestra la calidad de los resultados.
5. La reducción de la emisión del PM_{10} , a través de la combinación del ciclón corto convencional y el filtro de mangas llega a ser del 99%, aunque el secador rotatorio trabaje a la máxima capacidad, se minimizan los ECCA.
6. La dirección del viento es la variable meteorológica que define la calidad del aire sobre el asentamiento poblacional, cuando la planta de zeolita está emitiendo PM_{10} .
7. Las CAAB son multifactoriales, pero la contaminación por PM_{10} para el ICA de “Mala” a “Crítica” incide en la exacerbación de las mismas en el poblado de San Juan de los Yeras, los valores medios superan en 4,2 veces a su similar de los días DAF.
8. La validación del modelo de pronóstico de las CAAB tuvo una confiabilidad promedio de $91,58 \pm 7,43$.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS ECONÓMICO

Para el análisis económico se tiene en cuenta los costos de los equipos de control de la emisión, su inversión total, valores dinámicos de factibilidad y el periodo de recuperación de la inversión. Se cuantifican las posibles pérdidas económicas productivas en la planta de zeolita con la aplicación de PCA y se determinan los costos ambientales y sociales del tratamiento de las CAAB que se ahorran con la aplicación de los PCA en el periodo de estudio y por último se determina la factibilidad económica de los PCA.

4.1 Costos de los equipos de control de la emisión

La conversión de las diferentes monedas para CUC se realizó según el Banco Central de Cuba y el tipo de cambio del Banco Metropolitano, con la tasa de cambio correspondiente al 16/10/2014.

Peso cubano convertible, CUC 1,0000.

Dólar USA, USD 1,0000.

Euro, EUR 1,23364.

El costo del separador ciclónico se determinó a través del programa Est_Costo 2007, Matches provides dust collector cost - baghouse, cyclone, precipitator, scrubber, venturi.htm, se actualizó su costo a través del Índice de Costo anual (567,3) para el año 2013, según la revista Chemical Engineering, septiembre del año 2014, www.chemengonline.com

El costo del filtro de mangas con filtros de nomex teflonado resistentes a temperaturas de (200 °C), acorde a las condiciones de trabajo y al flujo de aire a filtrar, corresponde a la oferta del

proveedor "Emison", <http://www.emison.com/1183.htm>, visitado 16/10/2014, más detalles anexo cuatro.

El secador rotatorio tiene un costo por tonelada de producción de \$ 1417,00 USD, estos equipos son de elevada eficiencia, secado uniforme de la materia prima, bajos consumos energéticos y de emisiones, asociados a la recirculación de los gases y al control automático del proceso. La oferta es realidad por el proveedor, [Henan Xingyang Mining Machinery Manufactory](http://es.made-in-china.com/co_ballmill/image_Multifunctional-Industrial-Rotary-Dryer_hrogyoosy_Dryer_hrogyoosy_sekQYEKCbAzr.html), localizado en http://es.made-in-china.com/co_ballmill/image_Multifunctional-Industrial-Rotary-Dryer_hrogyoosy_Dryer_hrogyoosy_sekQYEKCbAzr.html, visitado 16/10/2014. Más información en el anexo cuatro.

El cálculo de la inversión para cada uno de estos equipos tecnológicos se realiza a través de la metodología del Cost & Evaluation Workbook, accompanying Plant Design and Economics for Chemical Engineers, 5th edition by Peters, Timmerhaus and West. 2002.

En la tabla 4.1 se muestra de cada equipo de control de la emisión y del secador rotatorio los datos económicos que incluyen la inversión total, valores dinámicos de factibilidad, periodo de recuperación y eficiencia de trabajo, además en el anexo 35, están los gráficos con el perfil del VAN y el cálculo del PRD, además del costo del impacto ambiental que se ahorra por cada equipo de control de la emisión.

Los cálculos se realizaron en CUP, CUC y Moneda Total (MT), de acuerdo a la metodología en cada caso y el resultado final se expresa en MT.

Tabla 4.1 Comparación económica entre los diferentes equipos de control de la emisión de PM₁₀, los resultados se expresan en MT.

Equipos	Flujo de gases (m ³ /h)	Costo \$ (USD)	Costo actual \$ (CUC)	Eficiencia de reducción de emisión del PM ₁₀ (%)	Material de construcción	Costos directo (\$)	Costos indirecto (\$)	Capital de trabajo (\$)	Inversión total (\$)	Valores dinámicos de la factibilidad		Periodo de recuperación (años)
										VAN (\$)	TIR (%)	
Ciclón corto convencional	4 208,26	5 500,00	5 940,00	40	Acero al carbono	8 613,00	1 188,00	1 188,00	10 989,00	990,79	14	2,8
Ciclón largo convencional	4 208,26	4 600,00	4 968,00	35	Acero al carbono	7 203,60	993,60	993,60	9 190,80	15,24	12	3,0
Ciclón largo convencionales instalados en paralelo (tres)	1 402,75	1 700,00 Total (5 100,00)	5 508,00	65	Acero al carbono	7 986,60	1 101,60	1 101,60	10 189,80	5254,52	24	1,7
Ciclón corto convencionales instalados en series (dos)	4 208,26	5 500,00 (11 000,00)	11 880,00	75	Acero al carbono	17 226,00	2 376,00	2 376,00	21 978,00	248,60	12	3,0
Ciclón corto convencional (dos en serie) y filtro de mangas	4 208,26	13 209,26**	13 209,26	Hasta 99	Acero al carbono	20 627,71	2 845,20	2 845,20	26 318,119	8 507,57	18	2,2
Secador rotatorio	15 t/h producto	46 761,00	46 761,00	Elevado	Acero al carbono	67 803,45	9 352,20	9 352,20	86 507,85	-----	-----	20,9

Donde: * EUR, ** CUC.

En tabla 4.1, la combinación del ciclón corto convencional y el filtro de mangas es la más efectiva desde el punto de vista tecnológico y económico, capaz de reducir la emisión del PM_{10} hasta el 99%, evitando la ocurrencia de ECCA aunque la planta trabaje a la máxima capacidad productiva, con un costo de inversión total de \$ 26 318,119 MT, con un Valor Actual Neto de \$ 8 507,57 MT y una Tasa Interna de Rendimiento del 18%, con un periodo de recuperación de 2,2 año, estos valores económicos no tienen diferencia significativa al compararlos con los del tres ciclones largos convencionales instalados en paralelo, los cuales tienen un periodo de recuperación menor (1,7 año), diferencia de cinco meses, además el Valor Actual Neto es inferior en \$ 3 253,05 MT, en los ciclones y estos tienen una Tasa Interna de Rendimiento superior en un 6%. Los equipos seleccionados dan lugar al mayor impacto ambiental positivo, ascendente a \$ 5 895,68 MT, al evitar la ocurrencia de 752 casos de CAAB por año, muy superior al resto de los demás equipos de control de la emisión, según tabla uno del anexo 35.

4.2 Cuantificación de las posibles pérdidas económicas productivas en la planta de zeolita con la aplicación de PCA

Para cuantificar el valor de la producción de zeolita seca sin elaborar en los días con PCA, se tuvo en cuenta, los precios de venta del producto en el periodo de estudio y las acciones para cumplir con la producción planificada y evitar pérdidas económicas. La tonelada de zeolita seca a granel y envasada para diferentes usos tiene un precio de venta promedio de \$ 16,77 CUP y \$ 24,14 CUC, que da lugar a \$ 40,91 MT .

En el periodo de estudio la planta de zeolita dejó de producir y/o disminuyó la producción de zeolita seca en 64 días activos desfavorables, para evitar que diera lugar a los ECCA, esta producción se transfirió para los días activos favorables anteriores o posteriores al ECCA,

también se elaboró el propio día teniendo en cuenta los ritmos productivos y los ajustes de los horarios de producción. Para una producción promedio de 42,98 t/día, se evitaron pérdidas económicas por producción no terminada por un valor de \$112 531,95 MT.

4.3 Costos de los PCA

En el costo de elaboración de los PCA se tuvo en cuenta el consumo de energía eléctrica de los medios de cómputo, teléfono, salario de un especialista principal y dos técnicos meteorólogos. Para cada DAD con probabilidad de ocurrencia del ECCA se implementan tres PCA con su control e intercambio de información con la fuente fija industrial responsable de la emisión.

El costo de los PCA realizados se divide en dos etapas, la primera, 2006 – 2008 más encarecida, por el monitoreo realizado para la validación del pronóstico, con gastos en equipamiento (dos estaciones de monitoreo activo, captador de pequeño volumen con un valor de \$ 2 500,00 USD cada una, software ISCST3 con un costo de \$ 2 100,00 USD), insumos (papel de filtros, 120 unidades de \$ 1,00 USD cada uno), transportación (combustible), energía eléctrica, personal calificado, además de los medios de cómputos (dos PC de \$ 700,00 CUC cada unidad).

En esta etapa para 27 DAD se confeccionaron 81 pronósticos, con un costo total de \$ 4 215,26 CUP, de ellos \$ 1 043,30 CUP de monitoreo, además de un gasto de \$ 6 504,00 CUC, para un valor total de \$ 10 719,26 MT.

En la segunda etapa, comprendida del 2009 al 2012 con 37 DAD se elaboraron 111 PCA, con un costo total de \$ 4 346,76 CUP.

El costo total de los PCA en la etapa estudio de los años 2006-2012 fue de \$ 15 066,02 MT.

4.4 Costos ambientales y sociales del tratamiento de las CAAB que se ahorraron con los PCA

Los costos del tratamiento de las CAAB se determinan a partir de la estimación de los costos directos e indirectos, obteniéndose el costo ambiental ahorrado para el periodo de estudio. Los cálculos se realizaron para los 64 DAD que la planta de zeolita disminuyó la emisión de PM₁₀ a la atmósfera por concepto de aplicación de acciones regulatorias de operación y operatividad del proceso productivo a través de los PCA que mitigaron los ECCA sobre el asentamiento poblacional de San Juan de los Yeras, en la etapa de los años 2006-2012. La reducción de casos de CAAB/días es de 12,53 valor que se toma como la población afectada, en los días de ECCA, de no haberse aplicado esta metodología de diagnóstico técnico ambiental a fuentes fijas industriales.

La metodología, expresiones matemáticas y datos de costos utilizados en esta investigación, corresponden a estudios precedentes realizados en Cuba por Meneses, 2005, Varona, 2005 y Marcelo, 2011. Se utilizó información de los anuarios de la Oficina Provincial de Estadística de Villa Clara (ONE) y del Ministerio de Salud Pública de la zona de estudio.

4.4.1 Costos directos

Los Costos de Atención Primaria (CAPr) se calcularon a través de la siguiente expresión.

$$CAPr(\$) = PA * CCMF \dots\dots\dots (4.1)$$

Donde:

PA: Población Afectada.

CCMF: Costo de Consulta del Médico de la Familia para las CAAB, se tomó como referencia, \$12,83 CUP, según Marcelo 2011.

Tabla 4.2 Costo Atención Primaria, en CUP.

Años	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	Total
CAPr \$	962,25	1 283,00	2 412,04	1 129,04	1 770,54	1 129,04	1 449,79	10 135,70
PA	75	100	188	88	138	88	113	790

El Costo del Medicamento Según el Grado de Severidad (CMSGS) se calculó como sigue a continuación.

$$CMSGS(\$) = PA * GMA \dots\dots\dots (4.2)$$

Donde:

GMA: Gasto Medio Anual de los pacientes en cada nivel de severidad de la enfermedad.

El cálculo se realizó para el nivel más bajo, debido a la incertidumbre de la información, la cual no permite definir con seguridad la intensidad de las CAAB ocurridas en el asentamiento poblacional, para este nivel el valor es de \$ 18,00 CUP. (Varona, 2005; Marcelo, 2011).

Tabla 4.3 Costo del Medicamento Según el Grado de Severidad de las CAAB, en CUP.

Años	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	Total
CMSGS \$	1 350,00	1 800,00	3 384,00	1 584,00	2 484,00	1 584,00	2 034,00	14 220,00
PA	75	100	188	88	138	88	113	790

Este valor, que es un gasto en CUP, está afectado por el subsidio que realiza el Estado Cubano a los medicamentos en general y no es por tanto el costo real realizado por la sociedad en importar o producir estos medicamentos. Para comparar con los costos internacionales se debe multiplicar este valor por un Coeficiente de Precio (CP) equivalente a 18, (Marcelo 2011) obteniéndose un Costo del Medicamento Comparable Internacionalmente (CMCI), los resultados generales se exponen a continuación.

$$CMCI(\$) = CMSGS * CP \dots\dots\dots (4.3)$$

Tabla 4.4 Costo del Medicamento Comparable Internacionalmente, en CUC.

Años	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	Total
CMCI \$	24 300,00	32 400,00	60 912,00	28 512,00	44 712,00	28 512,00	36 612,00	255 960,00

Los Costos Directos (CD) se calcularon a través de la expresión 4.4.

$$CD(\$) = CAP_r + CMSGS \dots\dots\dots (4.4)$$

Tabla 4.5 Costos Directos, en CUP.

Años	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	Total
CD \$	2 312,25	3 083,00	5 796,04	2 713,04	4 254,54	2 713,04	3 483,79	24 355,70
CAPr \$	962,25	1 283,00	2 412,04	1 129,04	1 770,54	1 129,04	1 449,79	10 135,70
CMSGs \$	1 350,00	1 800,00	3 384,00	1 584,00	2 484,00	1 584,00	2 034,00	14 220,00

Un análisis de los Costos Directos teniendo en cuenta CMCI se enumera en la tabla 4.6 para lo cual se llegó al criterio de que los CD = CMCI, en CUC por ser el único parámetro analizado en esta investigación en esta moneda.

Tabla 4.6 Costos Directos teniendo en cuenta CMCI, en CUC.

Años	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	Total
CD \$	24 300,00	32 400,00	60 912,00	28 512,00	44 712,00	28 512,00	36 612,00	255 960,00

4.4.2 Costos Indirectos

Las Pérdidas Salariales por Ausencia Laborales (PSAL) incluyen tanto las ausencias propias de los asmáticos como de sus familiares por el cuidado de ellos. Por tanto, el valor de PSAL que se obtendrá, será equivalente al valor promedio general, sea éste trabajador o no, según (Meneses 2005).

El Total de Días Estimados por Ausencias Laboral (TDEAL) según (Meneses 2005) se calcula a través de la sumatoria de cada uno de los contactos con los servicios de salud multiplicados por los índices de los días dejados de trabajar según la severidad de la

enfermedad, esta es de 10 días por **I**ngresos **H**ospitalarias (IH), 5 para **C**asos de **A**sma **B**ronquial **A**tendidos en salas de urgencias de **P**oliclínicos y **H**ospitales (CABAPH) y 2 para **C**asos de **A**sma **B**ronquial **A**tendidos en **C**onsultorios **M**édicos de la **F**amilia (CABACMF), siendo este último el que se aplica en esta investigación.

Con los datos del Anuario estadístico de la ONE (2006 - 2012), de la Oficina Provincial de Estadística de Villa Clara, los resultados de Varona, 2005 y los índices aportados por Meneses, 2005 aplicados a los datos disponibles de la zona de estudio, a través de las siguientes expresiones se obtuvieron los resultados que aparecen en la tabla 4.7.

$$TDEAL = (CABAPH * 5) + (IH * 10) + (CABACMF * 2) \dots\dots\dots (4.5)$$

$$PSAL = Prom (TDEAL * SMD) \dots\dots\dots (4.6)$$

Donde: **SMD**: **S**alario **M**edio **D**iarario para cada año (\$).

Tabla 4.7 Pérdidas salariales por ausencias laborales, en CUP.

Años	PSAL (\$)	TDEAL (\$)	SMD (\$)	PA
2006	2 355,00	2	15,70	75
2007	3 258,00	2	16,29	100
2008	6 392,00	2	17,00	188
2009	3 145,12	2	17,87	88
2010	5 346,12	2	19,37	138
2011	3 358,08	2	19,08	88
2012	4 386,66	2	19,41	113
Total	15 139,08	--	--	790

En este periodo se ha evitado una pérdida de salario de \$ 15 139,08 CUP, además de otras implicaciones económicas que da lugar la ausencia laboral por concepto de CAAB no ocurridas, en los DAD al no trabajar la fuente de emisión, evitando la ocurrencia de ECCA.

Para el cálculo de los **G**astos de **B**olsillo **A**nual (GBA) que es generado por los **G**astos de

Bolsillo de la **A**limentación **A**dicional (GBAL) y los medicamentos (GBM), se desarrolló a través de la multiplicación de un **C**oeficiente de **G**asto promedio (CG) sobre el salario promedio mensual, representativo del peso porcentual de los mismos sobre el gasto total mensual. De Varona, 2005 y Marcelo, 2011 se obtuvo que los gastos de bolsillo, para los asmáticos representan en promedio, el 7% del salario medio mensual, el procedimiento utilizado es el siguiente y los resultados se muestran en la tabla 4.8.

$$GBA = SMM * CG * PA * MAI \dots\dots\dots (4.7)$$

Donde: **MAI**: **M**eses de **A**plicación de la **I**nvestigación.

Tabla 4.8 Gasto de bolsillo anual en CUP.

Años	GBA (\$)	SMM (\$)	CG (%)	PA	MAI
2006	3 958,50	377,00	0,07	75	2
2007	8 211,00	391,00	0,07	100	3
2008	26 846,40	408,00	0,07	188	5
2009	5 285,28	429,00	0,07	88	2
2010	17 967,60	465,00	0,07	138	4
2011	11 285,12	458,00	0,07	88	4
2012	14 744,24	466,00	0,07	113	4
Total	88 298,14	--	--	790	24

Los **C**ostos **I**ndirectos (CI) se calcularon a través de la siguiente expresión.

$$CI = PSAL + GBA \dots\dots\dots (4.8)$$

Tabla 4.9 Costos Indirectos, en CUP.

Años	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	Total
PSAL (\$)	2 355,00	3 258,00	6 392,00	3 145,12	5 346,12	3 358,08	4 386,66	28 240,98
GBA (\$)	3 958,50	8 211,00	26 846,40	5 285,28	17 967,60	11 285,12	14 744,24	88 298,14
CI (\$)	6 313,50	11 469,00	33 238,40	8 430,40	23 313,72	14 643,20	19 130,90	116 539,12

4.4.3 Costo ambiental del tratamiento de CAAB

El Costo Ambiental (CA), expresión 4.9, ahorrado con la aplicación del PCA en 64 días de las etapas de estudio, evitando la ocurrencia de los ECCA y por consiguiente la disminución de las CAAB ascendió a \$ 140 894,82 CUP, tablas 4.10 y teniendo en cuenta los costos del medicamento comparable internacionalmente (CMCI) fue de \$ 255 960,00 CUC, correspondiente a \$ 396 854,82 MT.

$$CA = CD + CI \dots\dots\dots (4.9)$$

Tabla 4.10 Costo ambiental, en CUP.

Años	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	Total
CD (\$)	2 312,25	3 083,00	5 796,04	2 713,04	4 254,54	2 713,04	3 483,79	24 355,70
CI (\$)	6 313,50	11 469,00	33 238,40	8 430,40	23 313,72	14 643,20	19 130,90	116 539,12
CA (\$)	8 625,75	14 552,00	39 034,44	11 143,44	27 568,26	17 356,24	22 614,69	140 894,82

En resumen, los costos ambientales ahorrados por paciente, teniendo en cuenta la PA equivalente a 790 casos en el periodo de estudio, incurridos por el sistema de salud en el tratamiento de las CAAB estudiadas, que incluyen los factores analizados anteriormente, para el poblado de San Juan de los Yeras, es de \$ 178,34 CUP y de \$ 324,00 CUC teniendo en cuenta CMCI, equivalente a \$ 502,34 MT y por cada día de ECCA evitado, por paciente es de \$ 7,84 MT.

4.4.4 Factibilidad económica de los PCA

Para evaluar, la Factibilidad Económica (FE) de los PCA, expresión 4.10, se tuvo en cuenta tres indicadores, primero los 64 días que se evitó la ocurrencia de los ECCA sobre el poblado de San Juan de los Yeras, donde el costo ambiental ahorrado fueron de \$ 396 854,82 MT, ver Epígrafe anterior (4.4), segundo las Pérdida Económica Productiva (PEP) por concepto de paradas productivas los DAD (no ocurrió así, porque la planta cumplió con la producción

planificada en días precedentes y posteriores al ECCA, con la aplicación de acciones para cada PCA) y tercero, los Costos Totales de Elaboración de los Pronósticos de CA (CTEP), ascendente a \$ 15 066,02 MT.

$$FE = CA - PEP - CTEP \dots\dots\dots(4.10)$$

$$FE = \$ 381 788,80 \text{ MT/periodo}$$

$$FE = \$ 5 964,45 \text{ MT/PCA}$$

De acuerdo a los resultados anteriores, los PCA son factibles económicamente, sin ocasionar pérdidas económicas a la planta industrial responsable de los ECCA, teniendo en cuenta la protección al medio ambiente, la factibilidad económica total fue de \$ 381 788,80 MT y de \$ 5 964,45 MT por cada ECCA mitigado.

Conclusiones parciales

1. La inversión de los equipos de control de la emisión, ciclón corto convencional y filtros de mangas es económicamente factible, con un periodo de recuperación de 2,2 años, una inversión total de \$ 26 318,119 MT, un Valor Actual Neto de \$ 8 507,57 MT y una Tasa Interna de Rendimiento del 18,00%.
2. Los pronósticos de calidad del aire a la planta de zeolita, mitigaron los ECCA en el poblado de San Juan de los Yeras, con un ahorro por concepto de costo ambiental equivalente a \$ 396 854,82 MT en el periodo de estudio.
3. La factibilidad económica de los PCA es de \$ 381 788,80 MT.

CONCLUSIONES

1. La metodología de diagnóstico técnico ambiental a fuentes fijas industriales que incorpora los pronósticos de calidad del aire, permite prevenir y mitigar los episodios críticos de contaminación atmosférica sobre el asentamiento poblacional .
2. Se obtiene un método de clasificación de las fuentes fijas industriales de acuerdo a los escenarios de dirección del viento, que constituye una herramienta básica para aplicar los pronósticos de calidad del aire en la metodología de diagnóstico técnico ambiental a fuentes fijas industriales.
3. Se obtiene un método de pronósticos de calidad del aire a fuentes fijas industriales, teniendo en cuenta los escenarios de la dirección del viento, para prevenir y mitigar los episodios críticos de contaminación atmosférica.
4. La validación de los pronósticos de calidad del aire, a través del monitoreo activo en un periodo de tiempo representativo, es factible, seguro y económico.
5. La concentración del PM_{10} , que deteriora la calidad del aire en el poblado de San Juan de los Yeras, influye en la exacerbación de los casos de CAAB.
6. La propuesta de equipos de control de la emisión en la planta de zeolita, reduce la misma hasta un 99%, independientemente que trabaje a la máxima capacidad instalada, sin ocasionar episodios críticos de contaminación atmosférica.
7. Los pronósticos de calidad del aire reducen los costos ambientales, son factible económicamente elevando la calidad de vida y bienestar de la población, en el poblado de San Juan de los Yeras.

RECOMENDACIONES

1. Generalizar la aplicación de la metodología del diagnóstico técnico ambiental a fuentes fijas industriales del territorio y el país, para diferentes escenarios de dirección del viento provocados por “fenómenos meteorológicos”.
2. Continuar profundizando en la investigación científica y adaptación de los pronósticos de calidad del aire para múltiples fuentes fijas industriales con ubicaciones próximas una de otras.

REFERENCIAS

1. AIRS (1990) Facility Subsystem Source Classification Codes and Emission Factor Listing for Criteria Air Pollutants. EPA 450/4-90-003.
2. Alejo, D. et al. (2010) Diagnosis of the air quality in a zone affected by combustion gases sources. Volume 21, Chemical Engineering Transactions, ISBN 978-88-95608-05-1 ISSN 1974-9791 DOI: 10.3303/CET1021034.
3. Alejo, D. et al. (2012) Diagnosis of the air quality in the north zone of Santa Clara city, Cuba. 20th Congress of Chemical and Process Engineering CHISA, Prague, Czech Republic.
4. Alem, N. et al. (2005) **Impacto de la contaminación del aire en enfermedades respiratorias atendidas en el centro pediátrico Albina Patiño.** Vol. 3, no. 1, Acta Nova, pp.56-78.
5. ASTM (2005) American Society for Testing and Materials.
6. Baca, G. (2003) **Fundamentos de Ingeniería Económica.** 2da ed. México, McGraw-Hill.
7. Baldasano, J.M. et al. (2011). An annual assessment of air quality with the CALIOPE modeling system over Spain. Science of the Total Environment, 409, 2163–2178 doi:10.1016/j.scitotenv.2011.01.041.
8. Baldasano, J. et al. (2012) **CALIOPE, Sistema de pronóstico operacional de calidad del aire para Europa y España.** Barcelona Supercomputing Center–Centro Nacional de Supercomputación, Universidad Politécnica de Cataluña.

9. Bartelmus, P. (2007) **SEEA-2003: Accounting for sustainable development**. Vol. 61, nro.4, Ecological Economics, pp.600–626.
10. Berlyand, M. E. (1975) **Problemas actuales de la difusión atmosférica y la contaminación de la atmósfera**. Leningrado, Guidrometeoizat, pp. 435-448.
11. Bluett, J. et al. (2004) **Good practice guide for atmospheric dispersion modelling**. New Zealand, Ministry for the Environment Manatu Mo Te Taiiao.
12. Brown, G. (1965) **Operaciones Básicas de la Ingeniería Química**, España, pp.127- 30.
13. Buringh, E. et al. (2000) **Is SO₂ a causative factor for the PM-associated mortality risks in the Netherlands**. Vol.1. Inhalation Toxicology, pp. 55–60.
14. Cabrera, F. et al. (2007) **Evaluation of a dispersion model in Tula's industrial complex in Mexico by optical remote sensing methods**. The Smithsonian/NASA Astrophysics Data System. American Geophysical Union, Spring Meeting.
15. Calvo, L (2002) **Manual de Gestión Medioambiental de Empresas**. España.
16. Common, M., & Stagl, S. (2005). **Ecological economics, An introduction**. New York. Cambridge University Press.
17. Carrillo, E. et al. (2012) Evaluación de la calidad del aire, en la ciudad de Pinar del Río utilizando el modelo DISPER 4.0. **Convención Trópico 14-18 Mayo, 2012, La Habana Cuba**, ISBN: 978-959'282-079-1.
18. CCB (n.d.) **Guía de manejo ambiental para empresarios**. Bogotá, Colombia.
19. CEAN (2007) **Diagnóstico y vigilancia del impacto por vía atmosférica de un complejo refinero en Extremadura**. Versión 2. Informe final, Extremadura, España, Universidad de Huelva.
20. CECONT (2002) **Metodología para la captura de datos en el inventario para fuentes**

puntuales industriales. La Habana, Cuba, Instituto de Meteorología.

21. Ccicone, A. et al. (2007) **Guía para la evaluación de impactos en la calidad del aire por actividades minero metalúrgicas.** Vol. 21, Lima, Perú, Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros. Ministerio de Energía y Minas.
22. CENMA (2007) **Desarrollo y aplicación de un modelo de pronóstico de calidad de aire (MP₁₀) para Temuco y Padre Las Casas (Informe final).** Universidad de Chile, Laboratorio de Modelación y Análisis Atmosférico del Centro Nacional del Medio Ambiente de la universidad de Chile.
23. Centro Mario Molina (2011) **Implementación de Modelo de Pronóstico para Calidad del Aire para MP₁₀ y MP_{2.5} en la Región Metropolitana.** Chile, Informe Final.
24. Cohen, A. et al. (2004). **Mortality impacts of urban air pollution. Comparative quantification of health risks, global and regional burden of disease attributable to selected major risk factors.** Geneva, World Health Organization, pp.1353–1434.
25. Comité Técnico de Normalización NC/CTN 3, Gestión Ambiental. (1999) **Norma Cubana NC 39: 1999. Calidad del aire. Requisitos higiénico-sanitarios.** Cuba, Oficina Nacional de Normalización.
26. Comité Técnico de Normalización NC/CTN 3, Gestión Ambiental. (2004) **Norma Cubana NC 111:2004. Calidad del Aire-reglas para la Vigilancia de la calidad del Aire en Asentamientos Humanos.** Cuba, Oficina Nacional de Normalización.
27. Comité Técnico de Normalización NC/CTN 3, Gestión Ambiental (2005) **Norma Cubana NC 242: 2005. Guía de datos tecnológicos para inventario de emisiones de los contaminantes atmosféricos para fuentes puntuales industriales.** Cuba, Oficina Nacional de Normalización.

28. Cuesta, O. et al. (2007a) Situación de emergencia atmosférica por accidente tecnológico. Un caso de estudio. **8vo. Congreso Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS) Región 1. 6to. Congreso Nacional de la Asociación Cubana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (ACIS), 22-25 Mayo, 2007, La Habana, Cuba, ISBN: 978-959-7158-684.**
29. Cuesta, O. et al. (2007b) La gestión de la contaminación atmosférica en el ecosistema Sabana Camaguey, Cuba. **8vo. Congreso Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS) Región 1. 6to. Congreso Nacional de la Asociación Cubana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (ACIS), 22-25 Mayo, 2007, La Habana, Cuba, ISBN: 978-959-7158-684.**
30. Cuesta, O. et al. (2010a) Calidad del aire en zonas urbanas de Cuba. **CONAMA 11. Congreso de Medio Ambiente, España.**
31. Cuesta, O. (2010b) Fuentes de contaminación atmosférica y su relación con la calidad del aire. **Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, Ciudad de la Habana, Cuba, ISBN: 978-959-261-317-1.**
32. Cuesta, O. et al. (2012) Calidad del aire en la ciudad de Pinar del Río. Valores experimentales. **Convención Trópico, 14-18 Mayo, 2012, La Habana, Cuba, ISBN: 978-959282-079-1.**
33. Curiel, L. D. (1990) **Diagnóstico y pronóstico de la contaminación por SO₂ en la Ciudad de Matanzas.** Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas, I.S.P. de Matanzas, Cuba.
34. DAMA-INAMCO (2001) **Elaborar un Inventario de fuentes fijas de emisión de contaminantes a la atmósfera en la ciudad de Bogotá.** Santa Fe de Bogotá, Informe

final del contrato 079/2000.

35. De la Vega, T. et al. (2010) **El asma bronquial y su asociación con los cambios de Tiempo**. Vol. 26, no. 4, Cuba, Revista Cubana de Medicina General Integral, pp.665-672.
36. De la Vega, T. et al. (2011) **Estrategia de intervención para la monitorización y reducción de las crisis de asma bronquial aplicando un sistema de alerta temprana**. Vol. 27, no. 2, Cuba, Revista Cubana de Medicina General Integral.
37. De Nevers, N. (1998) **Ingeniería de control de la contaminación del aire**. México D.F, McGraw Hill, pp.169-183.
38. Díaz, R. y Díaz A. (1998) **Programa de mejoramiento de la calidad del aire en Cuba, 1998**. Vol. 12, no. 3, Resumed, pp.151-156.
39. Díaz, R. V. (2007) **Caracterización elemental de las partículas suspendidas menores a 2.5 micrómetros y su riesgo a la salud en la zona metropolitana de la Ciudad de México**. PhD., Instituto Tecnológico de Toluca.
40. DICA (2004) **Comparación de modelos de dispersión de emisiones provenientes de fuentes fijas**. Tuxpan, México, Instituto Nacional de Ecología, Informe final del proyecto.
41. DICTUC S.A. (2007) **Actualización del Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos en la Región Metropolitana 2005**. Santiago de Chile.
42. DIGESA (2005) **Protocolo de monitoreo de la calidad del aire y gestión de los datos**. Perú, Dirección General de Salud Ambiental.
43. Dockery, D.W. et al (1993). An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. **New England Journal of Medicine**, **329**, pp.1753–1759.
44. Epstein, M. (2000) **El desempeño ambiental en la empresa**. Colombia. Textos universitarios.

45. EPA (1992) Screening Procedures for Estimating the Air Quality Impact of Stationary Sources, Revised. EPA-450/R-92-019, United States, Environmental Protection Agency, United States.
46. EPA (1995a) Compilation of Air Pollutant Emission Factors. United States, Environmental Protection Agency, United States.
47. EPA (1995b) User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models. Vol. 1. EPA-454/B-95-003a, United States, Environmental Protection Agency, United States.
48. EPA (1997) The Values of QA/QC. Emission Inventory Improvement Program. Research Triangle Park, Eastern Research Group, North Carolina, Final Report. pp. 16.
49. EPA (1998) Compilation of air pollutant emission factors, stationary point and area sources. Research Triangle Park, Carolina del Norte. 5th ed. AP-42. Vol. 1. United States, Environmental Protection Agency, United States, Office of Air Quality Planning and Standards.
50. EPA (1999) Handbook for Criteria Pollutant Inventory Development. A Beginner's Guide for Point and Area Sources. Research Triangle Park, Office of air Quality Planning and Standards, pp.285.
51. EPA (2000) PCRAMMET, office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division. ResearchTriangle Park, NC 27711. EPA-454/B-96-001, Environmental Protection Agency, United States.
52. EPA (2001) Guideline on Air Quality Models. 40 CFR Chapter 1. 7-1-01 Ed. Appendix W to Part 51. Environmental Protection Agency, United States.
53. EPA (2003) Comparison of regulatory design concentrations, AERMOD vs ISCST3,

- CTDMPLUS, ISC-PRIME. [Internet], EPA-454/R-03-002. From
<<http://www.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/compar.pdf>>.
54. EPA (2004) **Factor Information Retrieval (FIRE) Software.** [Internet], Technology Transfer Network Clearinghouse for Inventories & Emissions Factors. from
<<http://www.epa.gov/ttn/chief/software/fire>>.
55. EPA (2008) **Test Methods and Performance Specifications.** [Internet], Technology Transfer Network, Environmental Protection Agency, United States, Emission Measurement Center from <<http://www.epa.gov/ttn/emc>>.
56. EPA (2012a) **Air Quality Management.** [Internet], Environmental Protection Agency, United States, Online Portal, from
<<http://www.epa.gov/airquality/particlepollution/health.html>>.
57. EPA (2012b) **Air Quality Modeling.** [Internet]Environmental Protection Agency, United States, Air Quality Management Online Portal. from
<<http://www.epa.gov/airquality/particlepollution/health.html>>.
58. EPA (2012c) **Particulate Matter (PM).** [Internet]Environmental Protection Agency, United States, Six Common Air Pollutants. from
<<http://www.epa.gov/airquality/particlepollution/health.html>>.
59. EPA (2012d) National Ambient Air Quality Standards (NAAQS).
60. EPA (2013) **Emissions Inventory.** [Internet]Environmental Protection Agency, United States, Air Quality Management Online Portal. from
<<http://www.epa.gov/air/aqportal/management>>
61. Folinsbee, L.J. (1992) **Human health effects of air pollution.** Vol. 100, Environmental health Perspectives, 100, pp.45-56.

62. Fusco, D. et al. (2001) Air pollution and hospital admissions for respiratory conditions in Rome, Italy. **European Respiratory Journal** 17, pp. 1143–1150.
63. Gauderman, W. J. et al. (2002) Association between air pollution and lung function growth in southern California children. **American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine** 166, pp.76-84.
64. Gifford, F. A. (1961) Use of routine meteorological observations for estimating atmospheric dispersion. Vol. 2, no. 4, Nucl. Safety, pp.47-51.
65. Gifford, F. A. (1976) Turbulent diffusion tyoing shemes-a review. Vol. 17, Nuclear Safety, pp68-86.
66. Gisella, S. (2008) **Diseño de un Sistema Móvil de Extracción de Polvo generado durante el Proceso de Arenado.** Tesis de grado ingeniera mecánica, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.
67. Harrison, R. (2000) Particulate matter in the atmosphere. Which particle properties are important for its effects on health?. Vol. 249, The Science of the Total Environment 249, pp.85-101.
68. HEI International Oversight Committee (2000) Reanalysis of the Harvard Six-Cities study and the American Cancer Society study of particulate air pollution and mortality. A special report of the Institute’s Particle Epidemiology reanalysis Project, Cambridge, MA, Health Effects Institute.
69. HEI (2004) Health effects of outdoor air pollution in developing countries of Asia: a literature review. Boston, MA, Health Effects Institute, Special Report No.15.
70. Hernández, L. et al. (2000) **Relación entre consultas a urgencias por enfermedad respiratoria y contaminación atmosférica en Ciudad Juárez, Chihuahua.** Vol. 42, no.

- 4, México, Salud Pública de México, pp.288-297.
71. Herrera, I. et al. (2006) Impacto sobre la calidad del aire en la península de Ancón de las fuentes fijas de emisión de gases contaminantes del Hotel Brisas Trinidad del Mar. **Taller Nacional de Contaminación Atmosférica, 5-8 Junio, 2006, Instituto de Meteorología, La Habana. Cuba.**
72. Herrera I. et al. (2011a). Impact assessment of the emissions related to fuel oil power generation plants based on set of internal combustions engines in Santa Clara city, Cuba. **6ta. Workshop Atmospheric Pollution vs. Sustainable Development, La Habana, Cuba,** Available at: <http://cub7007.cubaenergia.cu>.
73. Herrera, I. (2011b) **Energy scenario analysis integrating technology, air pollution and human health risk assessment.** PhD. (Tesis in development), Universidad Central "Marta Abreu de Las Villas".
74. Herrera, I. et al. (2012a) **Environmental impact of decentralized power generation in Santa Clara city, Cuba, an integrated assessment based on technological and human health risk indicators.** Applied Energy, APEN-D-12-03110.
75. Herrera, I. et al (2012b) **Environmental impact of the main heat generation facilities in Santa Clara City, Cuba, an integrated analysis based on technological and human health risk indicators.** Applied Energy, APEN-D-12-03831.
76. Huertas, J. et al (2010) **Modeling Dispersion of PM₁₀ and PST in the Cesar Department Mining Region, Colombia by Using ISC and AERMOD. ASME 2010 Power Conference (POWER2010), Paper no. 27356, pp.97-112. ISBN: 978-0-7918-4935-4.**

77. Huertas, J. et al. (2012). Air quality impact assessment of multiple open pit coal mines in northern Colombia. **Journal of Environmental Management**, Vol. 93, Issue 1, pp.121-129.
78. Illabaca, M. y Olaeta, I. (1999) Association between levels of fine particle and emergency visits for pneumonia and other respiratory illnesses among children in Santiago, Chile. J Air Waste Manage Assoc, 49, pp.154-163.
79. Jerves, R. F. (2007) **Análisis y revisión de la red de monitoreo de calidad del aire de la ciudad de Cuenca-Ecuador.** Ecuador, Proyecto, Análisis y revisión de la red de monitoreo de calidad del aire de Cuenca, Programa internacional de capacitación, manejo de la contaminación del aire 2007.
80. Jiménez, E. y Massagues, Ll. (2007). **Estudio, diseño y gestión de sistemas de medición de la contaminación atmosférica en Tarragona.** Cataluña, España, Departamento de ingeniería electrónica, eléctrica y automática, Escuela técnica superior de ingeniería.
81. Katsouyanni, K. et al. (2001) **Confounding and effect modification in the short-term effects of ambient particles on total mortality.** Results from 29 European cities within the APHEA2 project *Epidemiology*, 12. pp.521–531.
82. Katz, R. y Benítez M. I. (2000) **Uso de un sistema de pronósticos para el control de la calidad del aire en Santiago.** Chile, Estudios Públicos.
83. Ko, F. W. et al. (2007) **Temporal relationship between air pollutants and hospital admissions for chronic obstructive pulmonary disease in Hong Kong.** Vol. 62, *Thorax*, pp. 780-785.
84. Lecha, R. et al. (1994) **El clima de Cuba.** Editorial Académica. La Habana. ISBN: 959-02-006-0.

85. Lecha, L. (1999) **Effects of climate variability on the health of the cuban population.**
Vol. 48, nr. 1, Bulletin of the World Meteorological Organization 48(1), pp.18-22.
86. López, J. y Salcido A. (2001) **Air pollution modelling with turbulence data estimated from conventional meteorological parameters in an urban tropical region.** Vol. 10,
Advances in Air Pollution, pp. 45-56.
87. López, C. et al. (2004) **República de Cuba. Inventario Nacional de Emisiones y Adsorciones de Gases de Invernadero.** Reporte para el Año 2000 y Actualización para los Años 1990, 1994, 1996 y 1998. La Habana, CITMA/AMA/Instituto de Meteorología, pp.320.
88. López, C. et al. (2005) **República de Cuba. Inventario Nacional de Emisiones y Adsorciones de Gases de Invernadero.** Reporte para el Año 2002 y Actualización para los Años 1990, 1994, 1996, 1998 y 2000. La Habana, CITMA/AMA/Instituto de Meteorología, pp. 325.
89. López, C. M. (2007) **Introducción a la Gestión de la Calidad del Aire.** Vol. Cap. 4 y 5. Centro de Química y Contaminación Atmosférica, INSMET, La Habana, Cuba. [Eds. desoft SA: CD].
90. Lujan, M. (2008) **Evaluación preliminar del impacto de la contaminación atmosférica en la salud de la población de la ciudad de Cochabamba.** Vol. 4, no. 1, Acta Nova, pp.105-118.
91. Marcelo, G. C., Wallo, A. y Gómez, C. (2011) Influencia de la contaminación atmosférica sobre el asma bronquial en Regla. Costos ambientales asociados. **6to. Congreso Cubano de Meteorología, 29-2 Noviembre-Diciembre, 2011, La Habana, Cuba, ISBN: 978-959-7167-29-7.**

92. Mandurino, C. y Vestrucci, P. (2009) **Using meteorological data model pollutant dispersion in the atmosphere.** Environmental Modeling and Software 24, pp.270-278.
93. Martínez, E. y Díaz de Mera Y. (2004) **Contaminación atmosférica.** Colección Ciencia y Técnica 45, Universidad de Castilla-La Mancha, ISBN 84-8427-324-5, pp.13-30, 385-402.
94. Mayo O. y González G. (1997) **Conferencias de Ingeniería Económica.** La Habana, ISPJAE.
95. Meneses, E. et al. (2005) **Estimación de los costos en salud para la evaluación de externalidades.** Informe de investigación. Ciudad de La Habana.
96. Molina, E. et al. (2001) **Crisis de asma y enfermedades respiratorias agudas. Contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas en Centro Habana.** Vol. 17, no. 1, La Habana, Revista Cubana de Medicina General Integral, pp.10-20.
97. Molina, E. y E. Meneses (2003) **Evaluación epidemiológica del impacto de los contaminantes del aire. Propuesta metodológica.** Vol. 41, no. 2-3, La Habana, Revista Cubana de Higiene y Epidemiología.
98. Montes, L. et al. (2008). Planes de acción locales para mejorar la calidad del aire y estudios de impacto ambiental apoyados en modelos de dispersión atmosférica. **Memorias CONAMA 9, Congreso Nacional de Medio Ambiente, España.**
99. Nevers, N. (1995) **Air Pollution control Engineering.** Inc. United States of American, McGraw-Hill.
100. Núñez, S. (2002) **Altura de la capa de mezcla: caracterización experimental y aplicación de un modelo meteorológico para el estudio de su evolución diurna.** Memoria para Optar al Grado de Doctor, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España, ISBN: 84-669-1749-7.

101. Núñez, V. et al. (2005a). Elevación de la calidad de vida en asentamiento poblacional con deficiente calidad del aire a través de pronósticos de contaminación atmosféricas. **3er. Congreso Cubano de Meteorología, La Habana, Cuba.** ISBN: 978-959-7167-12-9.
102. Núñez, V. et al. (2005b) Minimización de la Emisión de Contaminante a Través de Pronósticos de Contaminación Atmosférica como Alternativa de elevar la Calidad de Vida. **12do. Forum de Ciencia Técnica, Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara, Cuba.**
103. Núñez, V. et al. (2006a) Minimización de impactos ambientales producida por una fuente fija aplicando métodos de control y reducción de la carga contaminante a la atmósfera en el poblado de San Juan de los Yeras. **4ta. Conferencia Científica Internacional de Ingeniería Mecánica, 7-9 Noviembre, 2006, UCLV, Villa Clara, Cuba,** ISBN: 959-250-295-1.
104. Núñez, V. et al. (2006b). Impacto de la generación de energía eléctrica sobre la contaminación atmosférica en la zona turística de la cayería norte de Villa Clara. **Taller Nacional de Contaminación Atmosférica, Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba.**
105. Núñez, V. et al. (2006c) La Gestión Energética, la Cuantificación y Modelación de la Dispersión de Contaminantes como Herramientas para Elevar la Eficiencia Industrial y la Calidad del Aire. **2do. Encuentro de Tecnologías y Gestión del Conocimiento, 17-22 Octubre, 2006, Villa Clara, Cuba.**
106. Núñez, V. et al. (2006d) Elevación de la calidad de vida en asentamiento poblacional con deficiente calidad del aire a través de pronósticos de contaminación atmosféricas. **15to.**

- Congreso Mexicano de Meteorología, 7-13 Mayo, 2006, Puerto Vallarta, Jalisco, México.**
107. Núñez, V. et al. (2006e) Minimización de la influencia de las emisiones de partícula totales suspendidas de fuentes fijas en Infecciones Respiratorias Agudas y Crisis Aguda de Asma Bronquial en el poblado de San Juan de los Yeras. **12do. Forum de Ciencia Técnica, 15 Junio, 2006, Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara, Cuba.**
108. Núñez, V. et al. (2007a) Minimización de impactos ambientales a través de pronósticos de calidad del aire como método de control de emisión de MP_{10} de fuentes fijas. **4to. Congreso Cubano de Meteorología, 4-8 Diciembre, 2007, La Habana, Cuba. ISBN: 978-959-7167-12-9.**
109. Núñez, V. et al. (2007b) Ascenso de efectos positivos en la salud humana como resultado de la disminución de la contaminación atmosférica con la aplicación de pronósticos de calidad del aire a fuentes fijas. **8vo. Congreso Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS) Región 1. 6to. Congreso Nacional de la Asociación Cubana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (ACIS), 22-25 Mayo, 2007, La Habana, Cuba, ISBN: 978-959-7158-684.**
110. Núñez, V. et al. (2007c) Evaluación de impactos ambientales producida por una fuente fija que emite MP_{10} aplicando métodos de control y reducción de la carga contaminante a la atmósfera. **Taller Nacional de Contaminación Atmosférica, 20-22 Junio, 2007, Instituto de Meteorología, La Habana. Cuba.**
111. Núñez, V. et al. (2007d) Estudio, evaluación y control de las emisiones de PM_{10} producida por fuente fija sobre asentamiento humano. **5ta. Conferencia Científica**

- Internacional Medio Ambiente Siglo XXI, 23-26 Octubre, 2007, UCLV, Villa Clara, Cuba, ISBN: 978-059-250-356-4.**
112. Núñez, V. et al. (2007e) **Inventario de fuentes fijas y emisiones, provincia de Villa Clara.** Informe de investigación, Villa Clara, Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara, Cuba.
113. Núñez, V. et al. (2008a) Predicción y Control de episodios críticos de contaminación atmosférica de PM₁₀ producida por fuentes fijas a través de la modelación como método de gestión de la calidad del aire en asentamientos poblacionales. **Convención Trópico, 16-20 Junio, 2008, La Habana, Cuba, ISBN: 978-959-282-079-1.**
114. Núñez, V. et al. (2008b) **Actualización del Inventario de fuentes fijas y emisiones, provincia de Villa Clara.** Informe de investigación, Villa Clara, Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara, Cuba.
115. Núñez, V. et al. (2009a) Propuestas, evaluación y aplicación del control de las emisiones de PM₁₀ en fundición de acero para prevenir episodios críticos de contaminación atmosférica. **5to. Congreso Cubano de Meteorología, 1-4 Diciembre, 2009, La Habana, Cuba, ISBN: 978-959-7167-20-4.**
116. Núñez, V. et al. (2009b). Diagnóstico, estimación, cálculo y propuestas de prevención y control de la contaminación atmosférica producida por fundición de metales. **5ta. Conferencia Científica Internacional Medio Ambiente Siglo XXI, 3-6 Noviembre, 2009, UCLV, Villa Clara, Cuba, ISBN: 978-959-250-456-1.**
117. Núñez, V. et al. (2009c) La gestión de la calidad del aire en asentamientos poblacionales a través de pronósticos de episodios críticos de contaminación atmosférica producida por

- PM₁₀. **18vo. Congreso Mexicano de Meteorología, 10-13 Noviembre, 2009, Cancún, Quintana Roo, México.**
118. Núñez, V. et al. (2009d) Disminución de la de emisión de PM₁₀ en fundición de hierro sobre zona residencial, aplicando medidas de control productivo y mejoras tecnológicas. **18vo. Congreso Mexicano de Meteorología, 10-13 Noviembre, 2009, Cancún, Quintana Roo, México.**
119. Núñez, V. et al. (2009e) Estudio, evaluación y propuesta de medidas para elevar la calidad del aire en diferentes escenarios de emisión de PM₁₀ en fundición de hierro. **Taller Nacional de Contaminación Atmosférica, Instituto de Meteorología, 3-5 Junio, 2009, La Habana, Cuba.**
120. Núñez, V. et al. (2009f) **Actualización del Inventario de fuentes fijas y emisiones, provincia de Villa Clara.** Informe de investigación, Villa Clara, Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara, Cuba.
121. Núñez, V. et al. (2009g) Propuesta de alternativa para disminuir la emisión de PM₁₀ de las fundiciones de aluminio en la ciudad de Placetas. **14ce. Forum de Ciencia Técnica, 17 Junio, 2009, Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara, Cuba.**
122. Núñez, V. et al. (2010a) Pronósticos de calidad del aire para diferentes escenarios de emisión de fuentes fijas como método de control y reducción de las emisiones de PM₁₀. **4to. Simposio internacional de Química, 1-4 Junio, 2010, UCLV, Villa Clara, Cuba.**
ISBN: 978-959-7167-12-9
123. Núñez, V. et al. (2010b) **Actualización del Inventario de fuentes fijas y emisiones, provincia de Villa Clara.** Informe de investigación, Villa Clara, Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara, Cuba.

124. Núñez, V. et al. (2010c) Propuesta de alternativa para disminuir la emisión de PM₁₀ de las fundiciones de aluminio en la ciudad de Placetas. **14ce. Forum de Ciencia Técnica, 23 Junio, 2010, Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara, Cuba.**
125. Núñez, V. et al. (2011a) Investigación y aplicación de factores de emisión para determinar la carga contaminante emitida por fuentes fijas en Villa Clara en el 2010. **Taller Nacional de Contaminación Atmosférica, 1-3 Junio, 2011, Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba.**
126. Núñez, V. et al. (2011b) **Actualización del Inventario de fuentes fijas y emisiones, provincia de Villa Clara.** Informe de investigación, Villa Clara, Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara, Cuba.
127. Núñez, V. et al. (2011c) Estudio, selección y aplicación de factores de emisión para determinar la carga contaminante de fuentes fijas en Villa Clara. **15to. Forum de Ciencia Técnica, 12 Julio, 2011, Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara, Cuba.**
128. Núñez, V. et al. (2012a) **Actualización del Inventario de fuentes fijas y emisiones, provincia de Villa Clara.** Informe de investigación, Villa Clara, Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara, Cuba.
129. Núñez, V. et al. (2012b) Resultados y retos del estudio de la contaminación atmosférica en la provincia de Villa Clara. Año 2011. **Taller Nacional de Contaminación Atmosférica, 5-7 Junio, 2012, Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba.**
130. Núñez, V. et al. (2013a) **Actualización del Inventario de fuentes fijas y emisiones, provincia de Villa Clara.** Informe de investigación, Villa Clara, Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara, Cuba.

131. Núñez, V. et al. (2013b) Propuestas de acciones, para reducir emisiones a la atmósfera por las fuentes fijas priorizadas en el territorio de Villa Clara en el año 2013. **16to. Forum de Ciencia Técnica, 17 Julio, 2013, Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara, Cuba.**
132. Núñez, V. et al. (2014) Metodología de vigilancia y control de la calidad del aire, aplicación en el I semestre en Villa Clara, año 2014. **Forum de Ciencia Técnica, 18 Julio, 2014, Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara, Cuba.**
133. Oyarzún, M. (2004) **Factores ambientales relacionados con la gravedad del asma.** Vol. 20, no. 1, Chile, Revista chilena de enfermedades respiratorias, pp.25-29.
134. Pasquill, F. (1961) **The estimation of the dispersion of windborne material.** Meteorol. Mag. 90, pp.33-49.
135. Pasquill, F. (1974) **Atmospheric Diffusion.** 2nd ed. John Wiley and Sons, New York, pp.429.
136. Pérez, R. (2007) Estado del medio ambiente cubano. Cuba, La Evaluación del medio ambiente cubano GEO.
137. Perry, R. H., Green D. W. y J. O. Maloney J. O. (1984) **Perry's Chemical Engineers Handbook.** New York, McGraw - Hill Inc.
138. Pierra, A. et al. (2004) **Modelación de emisiones de partículas debidas al transporte de mineral en minas a cielo abierto.** [Internet], Disponible en:
<www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar17/HTML/articulo05.htm>
139. Peters, J. M. et al. (1999) A study of twelve southern California communities with differing levels and types of air pollution. **American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 159, pp.760-767.**

140. Pope, C. y Kanner E. (1993) **Acute Effects of PM Pollution on Pulmonary Function of Smokers with Mild to Moderate Chronic Obstructive Pulmonary Disease.** Vol. 147, Am Rev Respir Dis, pp.1336-40.
141. Pope, C. et al. (1995) **Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of U.S. adults.** Am J Respir Crit Care Med, 151(3 Pt 1), pp.669-74.
142. Pope, C. A. et al. (2002) Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. **Journal of the American Medical Association, 287**, pp.1132–1141.
143. Ramírez, H. U. et al. (2006) **Contaminantes atmosféricos y su correlación con infecciones agudas de las vías respiratorias en niños de Guadalajara, Jalisco.** Vol. 48, no. 5, México, Salud Pública de México, pp. 385-394.
144. Ramírez, M. et al. (2009) **Influencia de los Contaminantes Atmosféricos en las Infecciones Respiratorias Agudas en Mexicali-Baja California, México.** Vol. 20, no. 3, México, Información Tecnológica, pp. 89-100.
145. Ramos, S. et al. (2010) **Estudio estadístico de la correlación entre contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas en la zona norte de Chiapas, México.** Universidad y Ciencia 26(1), pp. 65-80.
146. Rodríguez, R. (2005) **Manual de Evaluación de Impacto Ambiental.** Nicaragua, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua.
147. Rodríguez, D. et al. (2008) Resultados preliminares de cálculo de la altura de la capa de mezcla a través del uso del Global Forecast System. **Convención Trópico, 16-20 Junio, 2007, La Habana, Cuba, ISBN: 978-959-282-079-1.**

148. Rodríguez, D. et al. (2009a) Uso del método de Pasquill para calcular la altura de la capa de mezcla atmosférica aplicando ecuaciones que estiman el ángulo de elevación solar. **5to. Congreso Cubano de Meteorología, 1-4 Diciembre, 2009, La Habana, Cuba, ISBN: 978-959-7167-20-4.**
149. Rodríguez, D. et al. (2009c) Resultados preliminares de inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos producidos por las fuentes fijas en la ciudad de Pinar del Río y la comunidad de Santa Lucia. **5to. Congreso Cubano de Meteorología, 1-4 Diciembre, 2009, La Habana, Cuba, ISBN: 978-959-7167-20-4.**
150. Rodríguez, D. et al. (2011) Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos producidos por las fuentes fijas de la ciudad de Pinar del Río y la comunidad de Santa Lucia. **6to. Congreso Cubano de Meteorología, 29-2 Noviembre-Diciembre, 2011, La Habana, ISBN: 978-959-7167-29-7.**
151. Rodríguez, D. et al. (2012a) **Estudio de variables meteorológicas secundarias que intervienen en la difusión de contaminantes atmosféricos. Caso de estudio ciudad de Pinar del Río.** Vol. 18, no. 1, Cuba, Revista Cubana de Meteorología, pp.35-50 pp.
152. Rodríguez, D. et al. (2012b) **Métodos teóricos para calcular parámetros tecnológicos de emisión de contaminantes atmosféricos producidos por fuentes fijas. Caso de estudio ciudad de Pinar del Río.** No.4 Revista NEREIS, pp.19-30, ISSN-1888-8550.
153. Rodríguez, V. y Del Mar M. (2003) **Niveles, composición y origen del material particulado atmosférico en los sectores Norte y Este de la Península Ibérica y Canarias.** Informe de investigación, Cataluña, Politécnico de Cataluña.

154. Romero, M. et al. (2004) **Contaminación atmosférica, asma bronquial e infecciones respiratorias agudas en menores de edad, de La Habana.** Vol. 46, no. 3, México, Salud Pública de México, pp.222-233.
155. Romero, M. et al. (2006) **La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud.** Vol. 44, no. 2, Cuba, Revista Cubana de Higiene y Epidemiología, pp.1-14.
156. Romieu, I. et al. (1995) **Effects of urban air pollutants on emergency visits for childhood asthma in Mexico City.** Vol. 141, nr 6, Am J Epidemiol, pp.546-553.
157. Romieu, I. et al. (1996) **Effects of air pollution on the respiratory health of asthmatic children living in Mexico City.** Vol. 154, American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, pp.300-307.
158. Samet, J.M. et al. (2000) **The National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study. Part II: Morbidity and mortality from air pollution in the United States.** Vol. 94, Research Reports of the Health Effects Institute, pp.5-70.
159. Sánchez, P. et al. (2004) Condiciones meteorológicas y calidad del aire en el municipio Habana Vieja. **Convención Trópico, La Habana, Cuba,** ISBN: 959- 7167-02-6.
160. Sánchez, P. et al. (2007a) Calidad del aire y condiciones meteorológicas como factores de riesgo para la salud en una zona urbana de la Ciudad de la Habana. **4to. Congreso Cubano de Meteorología, 4-8 Diciembre, 2007, La Habana, Cuba.** ISBN: 978-959-7167-12-9.
161. Sánchez, M. et al. (2007c) Guía metodológica para la evaluación de la dispersión regional de contaminantes atmosféricos. **8vo. Congreso Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS) Región 1. 6to. Congreso Nacional de la**

- Asociación Cubana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (ACIS), 22-25 Mayo, 2007, La Habana, Cuba, ISBN: 978-959-7158-684.**
162. Seoanez, M. (1997) Ingeniería Medioambiental Aplicada. **Ediciones Mundi- Prensa**, Barcelona, España.
 163. Socarrás, J. et al (2012) **Guía Climática para la provincia de Villa Clara**. Informe de investigación, Cuba, Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara.
 164. Spiro, T. G. y Stigliani, W. M. (1996) **Química Medioambiental**. 2a ed. Madrid, Pearson Prentice Hall, pp.220-225.
 165. Stanley, E. (2007) **Introducción a la química ambiental**. Editor Reverte, ISBN 84-291-7907-0: 390-402.
 166. Stranger, M. (2005) **Characterization of health related particulate and gas phase compounds in multiple indoor and outdoor sites in Flanders**. PhD, University of Antwerp.
 167. Suárez, S. et al. (2010) **Contribución de la contaminación atmosférica a la ocurrencia de enfermedades respiratorias agudas en menores de 15 años. Ciudad de La Habana, 2001-2003**. Vol. 10, La Habana, Higiene y Sanidad Ambiental, pp.635-644.
 168. Turner, D. B. (1964) A Diffusion Model for an Urban Area. **Journal of Applied Meteorology**, **3**, pp.83-91.
 169. Turner, D. B. (1970) **Workbook of atmospheric dispersion estimates**. U. S. Public Health Service. Publicatin 999-AP-26, Ohio, Robert A. Taft. Sanitary Engineering Center, Cincinnati, Ohio.

170. Turtós L. et al. (2009) **Method for the estimation of the convective mixing height aimed to atmospheric local dispersion modeling.** Environmental Impact Assessments, Nova Science Publishers, Inc, ISBN: 978-1-60692-667-3.
171. Turtós, L. (2012) **Implementación de modelos refinados de dispersión local de contaminantes atmosféricos emitidos por fuentes estacionarias.** Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Meteorológicas. INSMET, La Habana.
172. Tramuto, F. et al. (2011) **Urban air pollution and emergency room admissions for respiratory symptoms: a casecrossover study in Palermo, Italy.** Vol. 10, Nr. 31, Environmental Health, pp,1-11.
173. Ulrich, Gl. (1992) **Diseño y Economía de los Procesos de Ingeniería Química.** 1ra ed. México, McGraw–Hill, pp.231 - 245.
174. UNECE (2004) **Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads & levels and air pollution effects, risks and trends. UNECE Convention on Long – range Transboundary air pollution.**
175. Vallejo, A. (2007) **Air Pollution Modeling and Prediction Fundamentals of Air Pollution.** 4h ed. Academic Press, pp.581-637.
176. Varona, P. et al. (2005) **Uso de servicios de salud y gasto de bolsillo por asma en niños de 5 a 14 años de edad. Ciudad de La Habana, 2002.** Vol. 43, no. 3, Cuba, Revista Cubana de Higiene y Epidemiología, ISSN 1561-3003
177. Warren, Mc. y J., Semith, (1991) **Operaciones Básicas de Ingeniería Química.** 4a ed. México, McGraw–Hill.

178. Wichmann, HE et al. (2000) **Daily mortality and fine and ultrafine particles in Erfurt, Germany. Part 1: Role of particle number and particle mass.** Research Report No.98, Cambridge, MA, Health Effects Institute
179. WHO (1999) **Monitoring ambient air quality for health impact assessment.** Copenhagen, Denmark, WHO Regional Publications.
180. WHO (2000) **Guidelines for Air Quality.** Geneva, Switzerland.
181. WHO (2003) **Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide.** Germany.
182. WHO (2005) **Air Quality guidelines global update.** Bonn, Germany.
183. WHO (2006) **Air Quality Guidelines. Global Update 2005.** Denmark.
184. Wong CM et al. (2002) **A tale of two cities: effects of air pollution on hospital admissions in Hong Kong and London compared. Vol. 110, Environmental Health Perspectives, pp.67–77.**

ANEXO 1

DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS MÁS USADOS PARA FUENTES FIJAS.

Modelos	Descripción
SCREEN3	Modelo de dispersión de pluma Gaussiana que modela una única fuente, suministra concentraciones máximas al nivel del suelo para fuentes puntuales, de área, incendios y de volumen, como también concentraciones en zonas de cavitación, y concentraciones debido a inversiones y fumigación. El modelo SCREEN3 es la versión screening del modelo ISC3.
CTSCREEN	Modelo de dispersión de pluma Gaussiana diseñado como una técnica screening de carácter regulatorio para determinar el impacto en terrenos complejos. CTSCREEN es la versión screening del modelo CTDMPLUS.
VALLEY	Modelo de dispersión de pluma Gaussiana que modela condiciones en estado estable y terreno complejo, diseñado para estimar las concentraciones en 24 horas o anuales resultantes de la emisión de hasta 50 fuentes puntuales y de área.
COMPLEX-I	Modelo de dispersión screening para múltiples fuentes, incorpora el ajuste de la altura del terreno y el algoritmo de impacto de pluma del modelo VALLEY.
SDM	El modelo Shoreline Dispersion Model (SDM) es un modelo de dispersión Gaussiana empleado para modelar la dispersión de múltiples fuentes, con el fin de determinar la concentración de contaminantes al nivel del suelo debido a fuentes estacionarias muy altas cerca a zonas costeras.
ISC3	Modelo de dispersión de pluma Gaussiana que se emplea para evaluar la concentración de contaminantes de una amplia

	<p>variedad de fuentes asociadas a actividades industriales complejas. Este modelo tiene en cuenta la sedimentación y deposición seca de partículas, caída de la pluma, fuentes puntuales de área y volumen, elevación de la pluma como una función de la distancia, separación de fuentes puntuales, y ajuste del terreno. ISC3 opera en modos de corto y largos periodos de tiempo.</p>
ISCST3	<p>Modelo de dispersión de pluma Gaussiana que se emplea para evaluar la concentración de contaminantes de una amplia variedad de fuentes asociadas a actividades industriales complejas. Este modelo tiene en cuenta sedimentación y deposición seca de partículas, caída de la pluma, fuentes puntuales de área y volumen, elevación de la pluma como una función de la distancia, separación de fuentes puntuales y ajuste del terreno. ISCST3 opera en modos de cortos periodos de tiempo.</p>
CALPUFF	<p>Modelo de dispersión de pluma Gaussiana que se emplea para evaluar la concentración de contaminantes de fuentes puntuales, de área, de volumen y lineal. Tiene en cuenta la deposición seca y húmeda en función de las propiedades de cada especie, la caída y elevación de la pluma y ajuste del terreno. Opera en modos de cortos y largos periodos de tiempo.</p>

Parámetros comparativos entre los modelos CALPUFF e ISCST3, por ser estos los más adecuados a tener en cuenta para el caso de estudio.

PARÁMETROS	CALPUFF	ISCST3
Opción para modelar	Según los lineamientos de transporte en grandes distancias	Según recomendaciones de la EPA
	Sin considerar los lineamientos	Seleccionando entre: Decaimiento por edificios

		Con información incompleta Elevación gradual de la pluma Sin dispersión por flotación Ajuste del termino vertical
Tipo de emisión	Puntual, de área, de volumen y lineal	Puntual con factores temporales de emisión (horarios, diarios, por estación y por estabilidad atmosférica)
Información Meteorológica	Proveniente del programa CALMET Vectores tridimensionales y/ó de estaciones meteorológicas	De estaciones meteorológicas
Periodo Simulado	Especificado por el usuario Horario, diario y del periodo	Especificado por el usuario para cada simulación va de días en adelante.
Proyección del terreno	UTM (Universal transverse Mercator) LCC (Lambert conic conformal) TTM (Tangetial transverse Mercator)	UTM
Terreno	Características y elevaciones del terreno	Archivo con la elevación del terreno.
Especies modeladas	Todas las definidas por el usuario	En cada simulación se define la especie a modelar.
Transformación	MESOPUFF II	No

química	RIVAD/ARM3 SOA (Secondary organic aerosol)	
Deposición seca y húmeda	Si en función de las propiedades de cada especie ingresada.	Genera una concentración conservadora
Perfil de viento	SC rural ISC Urbano uno ISC Urbano dos definido por el usuario	No
Elevación de la pluma	Transicional Decaimiento Corte vertical por viento Penetración de la pluma	Decaimiento Elevación gradual dispersión inducida sin flotamiento Ajustable por el usuario
Opción para modelar	Slug ó Puffs	Pluma
Método para el terreno	Sin ajuste por terreno Algoritmo ISC Algoritmo CALPUFF Parcial trayectoria de la pluma	Plano Algoritmo simple Algoritmo complejo Algoritmo simple y complejo
Receptores	Definibles por el usuario nodos de la malla meteorológica mallas cilíndricas	Definibles por el usuario Mallas cilíndricas o rectangulares
Resultado de una corrida	Horarias, Diarias y del periodo	Diarias y del periodo definido

ANEXO 2

MÉTODO DE TURNER PARA ESTIMAR LAS CLASES DE ESTABILIDAD ATMOSFÉRICA.

Velocidad del viento U (m/s)	Día: Insolación				Cielo cubierto:	Noche: Nubosidad	
	Fuente, $\alpha > 60^\circ$	Moderada, $35 < \alpha < 60^\circ$	Ligera, $\alpha < 35^\circ$	Débil, $\alpha < 15^\circ$	Nubosidad 10/10, Altura <2133,6 m	>4/10	\leq 4/10
0-0,77	A	A	B	C	D	F	F
0,77-1,80	A	B	B	C	D	F	F
1,80-2,83	A	B	C	D	D	E	F
2,83-3,34	B	B	C	D	D	E	F
3,34-3,86	B	B	C	D	D	D	E
3,86-4,89	B	C	C	D	D	D	E
4,89-5,40	C	C	D	D	D	D	E
5,40-5,92	C	C	D	D	D	D	D
$\geq 5,92$	C	D	D	D	D	D	D

ANEXO 3

ALTURAS DE LA CAPA DE MEZCLA.

	Velocidad del viento	Clase de Pasquill	Altura de la mezcla (m)
Día	0-2 m/s	A (muy inestable)	1 600
Alta	2-3 m/s	B (inestable)	1 200
insolación*	3-5 m/s	C (ligeramente inestable)	800
	>5 m/s	D (neutra)	560
Día	0-2 m/s	B	1 200
Baja	2-3 m/s	C	800
insolación	3-5 m/s	D	560
	>5 m/s	D	560
Noche	0-2 m/s	F (estable)	200
	2-3 m/s	F	200
	3-5 m/s	E (ligera estabilidad)	320
	>5 m/s	D (neutra)	560
	Nublado	D	560

ANEXO 4

CARACTERIZACIÓN DE LOS MÉTODOS DE DEPURACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO DE LOS EFLUENTES GASEOSOS. COSTOS Y PROVEEDORES.

Métodos básicos	Equipos	Principio	Descripción	Ventajas	Desventajas
Separación por inercia y gravedad (sedimentación), o colectores mecánicos.	Cámara de separación gravitatoria.	Sedimentación de las partículas que transporta una corriente de gas, por acción de la gravedad.	Constituidas por un simple ensanchamiento del conducto, de manera que provoca la reducción de la velocidad del efluente y de esta forma, el depósito de las partículas, figura 1.	Costo de instalación bajo. Costo de energía bajo. Excelente seguridad. Puede fabricarse de diversos tipos de materiales. Simplicidad de diseños, construcción e instalación.	Ocupa mucho espacio. Eficiencia de recolección muy baja para material particulado inferior a 50 μm .
	Separadores inerciales.	Se basan en el cambio repentino de la dirección del flujo de gas, conjugando el efecto de la inercia con el impacto del efluente.	Diseño similar a las cámaras de separación gravitatoria, pero se le introduce un obstáculo sobre el que choca el gas (baffles o placas deflectoras)	Costo de instalación bajo. Costo de energía bajo. Puede fabricarse de diversos tipos de materiales. Tienen mayor eficiencia que la cámara de separación gravitatoria.	Eficiencia de recolección muy baja para PM 50 μm . Ocupa mucho espacio.

Separación centrífuga.	Ciclones colectores centrífugos.	Utilizan la fuerza centrífuga para separar las partículas de la corriente gaseosa	Tienen diversos diseños y dimensiones pero todos constan de una entrada de aire que genera el torbellino, una salida axial para el aire limpio y una abertura para la descarga de las partículas, figura 2.	Bajo costo de construcción, funcionamiento y mantenimiento. Necesita poco espacio. Recogida de material seco. Operación sencilla. Permite la separación en condiciones drásticas de temperatura y presión. Presenta una caída de presión mayor que la cámara de sedimentación. Sus interiores lisos impiden la acumulación de polvos.	Son equipos de baja eficiencia para PM 10 µm. Son inadecuados para materiales abrasivos. Ocurre obstrucción por la presencia de altas concentraciones de polvo, de materiales higroscópicos y adhesivos. Para una eficiencia alta, se requiere de una caída de presión muy alta.
	A) <u>C</u> iclón <u>L</u> argo <u>C</u> onvencional CLC B) <u>C</u> iclón <u>C</u> orto <u>C</u> onvencional CCC		A) CLC B) CCC	A) CLC Eficiencia del 30- 40% B) CCC Eficiencia del 35- 45%	
	Multiciclones A) CLC (tres) instalado en paralelo B) CCC (dos) instalados en series		Constan de varios ciclones de diferentes diámetros, instalación en serie (el primero de mayor tamaño para las partículas más grandes y el segundo más pequeño) para buscar mayor separación de sólidos y también se	Remueven mayor cantidad de partículas que los ciclones colectores centrífugos, de 60 al 75% para PM 10 µm Más eficiente que los ciclones colectores centrífugos. A) CLC Eficiencia del 60-	Mayor costo inicial que los ciclones ordinarios.

			instalan en paralelo para enfrentar grandes caudales.	70% B) CCC Eficiencia del 70-80% Se utilizan para limpieza previa y control final.	
Separación por vía seca por retención.	Filtros de mangas.	Se basan en la filtración para separar las partículas de la corriente gaseosa.	Son elementos metálicos cerrados en cuyo interior se instalan los elementos filtrantes, que tienen formas circulares llamadas mangas o rectangulares llamadas bolsas o sacos, figura 3.	Elevada eficiencia de retención, hasta el 99% para PM 10 µm. Insensible a fluctuaciones de la corriente gaseosa. La corrosión no es un efecto importante. Fáciles de mantener y reparar. La operación es sencilla. Eliminación de peligros para la salud. Mejora la calidad del producto.	Para temperatura del gas > 290 °C requiere de telas de elevado costo. Peligro de fuego o explosión por acumulación y chispas según el tipo de partículas. La vida útil del filtro puede ser corta. Ocurren pérdidas de carga elevadas por oclusión.
Separación por vía húmeda.	Cámara de aspersion.	Se basa en la interceptación y colisión de partículas de polvo con gotas de líquido, debido a la diferencia entre sus velocidades.	Forma generalmente cilíndrica con configuraciones de flujo concurrente, en contracorriente y en corriente curvada, con rociadores de lavado, figura 4.	Recogida de material húmedo. Necesita poco espacio.	Son equipos de baja eficiencia para PM 10 µm. Requieren de flujo de agua continuo. Problemas con la eliminación del agua. Ocurren problemas de corrosión.
	Colector	Se basa en la fuerza	Forma cilíndrica en posición	La eficiencia de separación se	Requieren de flujo de

húmedo ciclónico.	centrífuga de una corriente gaseosa que gira, aumenta la diferencia de velocidad entre las gotas de líquido y el gas.	vertical, con conductos de entrada de agua y boquillas rociadoras, figura 5.	encuentra por encima del 90% para PM 2 µm. Recogida de material húmedo. Son más eficaces que las cámaras de aspersión. Necesita poco espacio.	agua continuo. Problemas con la eliminación del agua. Ocurren problemas de corrosión.
Lavadores Venturi.	Se basan en la gran diferencia de velocidades entre el gas y las gotas de agua que provocan choques entre las gotas y las partículas de polvo atrapando a estas.	El gas cargado con material particulado pasa por un tubo corto con extremos anchos y una sección estrecha, (venturi), figura 6.	Elevada capacidad y eficiencia (99%) para separar PM 1 µm. Instalación y mantenimiento simple. Recogida de material húmedo.	Elevados requerimientos energéticos. Ocurren grandes pérdidas de carga.

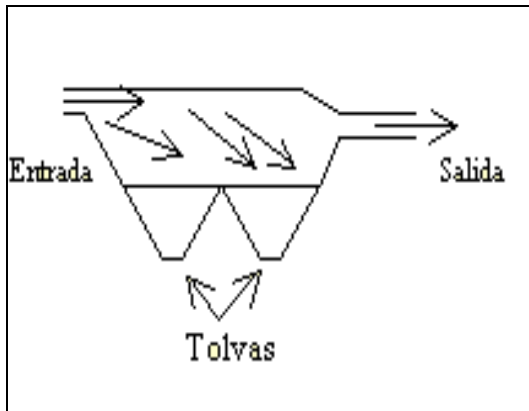


Figura 1. Cámara de separación gravitatoria.

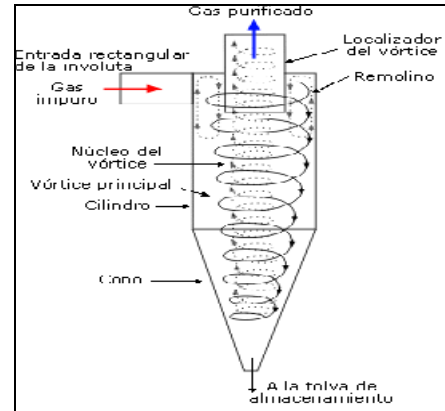


Figura 2. Ciclones colectores centrífugos

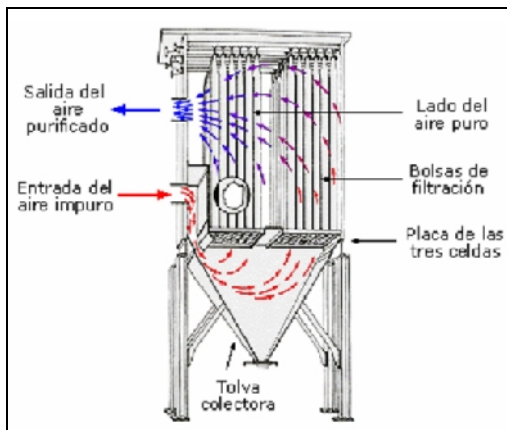


Figura 3. Filtro de Mangas

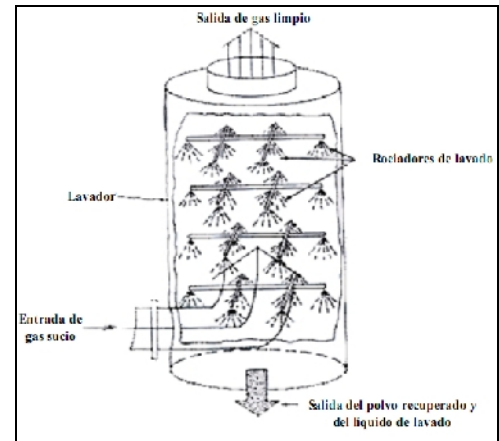


Figura 4. Cámara de aspersión

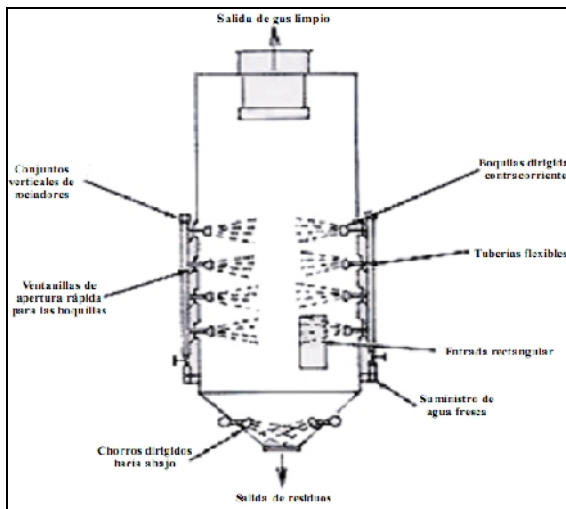


Figura 5. Colector húmedo ciclónico.

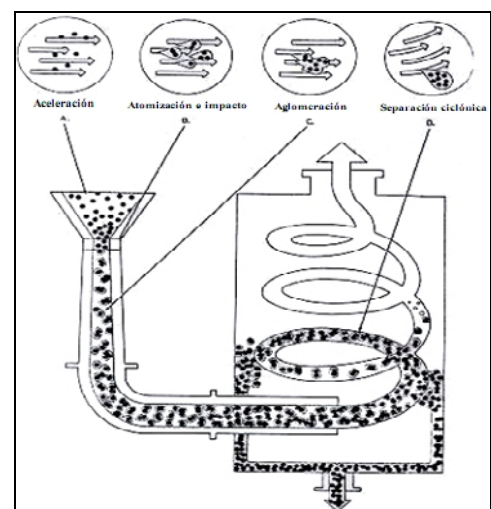


Figura 6. Colector húmedo tipo venturi.

Precio de los filtros de mangas pertenecientes al proveedor "Emison"

Principales características.

- Número de mangas de 127 mm ϕ x la altura.
- Caudales máximos y mínimos en función de las características del fluido a filtrar.
- Los precios incluyen ventilador, válvula manual de descarga, válvula automática de limpieza y cuadro eléctrico.

Tabla. Precio en EUR sin impuestos para las temperaturas máximas indicadas.

Mangas	Caudal (m ³ /h)	Dimensiones de la manga (cm)	Peso de la estructura (Kg)	Precio 100 °C	Precio 200 °C	Precio 300 °C	Precio 400 °C	Precio 500 °C
4 x 2	100 - 250	40 x 310 x 40	100	7,750	8,525	9,805	11,275	12,975
6 x 2	150 - 360	40 x 310 x 60	125	8,900	9,790	11,260	12,950	14,900
9 x 2	215 - 550	60 x 310 x 60	150	10,550	11,605	13,350	15,350	17,650
9 x 3	325 - 800	60 x 420 x 60	200	11,510	12,670	14,560	16,750	19,250
12 x 3	430- 1,000	60 x 420 x 75	225	12,600	13,860	15,950	18,330	21,080
16 x 2.5	500 - 1,200	75 x 380 x 75	250	14,500	15,950	18,350	21,100	24,230
16 x 3	575 - 1,500	75 x 430 x 75	260	16,750	18,450	21,188	24,370	28,025
20 x 3	700 - 1,800	75 x 440 x 100	280	18,050	19,860	23,840	26,260	30,200
25 x 3	1,000 - 2,200	100 x 440 x 100	300	20,780	22,860	26,290	30,230	34,770
30 x 3	1,100- 2,700	100 x 450 x 110	320	23,350	25,690	29,540	33,970	39,070
36 x 3	1,300- 3,300	110 x 450 x 110	350	26,400	29,040	33,400	38,410	44,170
42 x 3	1,500 - 3,800	110 x 450 x 130	380	29,550	32,505	37,380	42,990	49,450
49 x 3	1,800 - 4,400	110 x 450 x 130	400	33,220	36,550	42,025	48,330	55,575
56 x 3	2,000 - 5,000	130 x 460 x 150	460	36,910	40,601	46,700	53,700	61,750
64 x 3	2,300 - 5,750	150 x 465 x 150	500	41,130	45,250	52,030	59,850	68,810
72 x 3	2,600 - 6,500	150 x 465 x 160	510	45,090	49,600	57,040	65,600	75,440
81 x 3	2,900 - 7,400	160 x 465 x 160	540	49,370	54,310	62,460	71,825	82,600

Otros proveedores:

[Xinxiang Saya Filters Co., Ltd.](#)

[Hebei Ji Ao Machinery Manufacturing Co., Ltd.](#)

[Henan Province Ankelin Filter Industry Co., Ltd.](#)

Precio del secador rotatorio

Proveedor, [Henan Xingyang Mining Machinery Manufactory.](#)

Otros proveedores: www.emison.com/secaderos%20rotativos.htm,

www.hosokawamicron.es, www.lcec.com/, www.peeplo.com/Secado+Industrial

El costo del secador rotatorio es de \$ 1417,00 USD por tonelada de producción.

Modelo (mm)	Inclinación (%)	Velocidad de rotación (r/min)	Temperatura de la entrada de aire (°C)	Potencia (kilovatios)	Capacidad de producción (t/h)	Peso (t)
600x6000	3-5	3-8	700	3	0,5-1,5	2,9
800x8000	3-5	3-8	700	4	0,8-2,0	3,5
800x10000	3-5	3-8	700	4	0,8-2,5	4,5
1000x10000	3-5	3-8	700	5.5	1,0-3,5	5,6
1200x10000	3-5	3-8	700	7.5	1,8-5	14,5
1200x12000	3-5	3-8	700	11	2-6	14,8
1500x12000	3-5	2-6	800	15	3,5-9	17,8
1800x12000	3-5	2-6	800	18	5-12	25
2200x12000	3-5	1,5-6	800	18.5	6-15	33
2200x18000	3-5	1,5-6	800	22	10-18	53,8
2200x20000	3-5	1,5-6	800	30	12-20	56
2400x20000	3-5	1,5-5	800	37	18-30	60
3000x20000	3-5	1,5-5	800	55	25-35	78
3000x25000	3-5	1,5-5	800	75	32-40	104

ANEXO 5

CATÁLOGO DE PCA PARA FUENTES FIJAS INDUSTRIALES.

Índice	Categoría ICA	Nivel de aviso	Código de colores
200 - 299	Mala	SITUACIÓN DE ATENCIÓN: Da lugar a un aumento de la frecuencia y gravedad de los efectos adversos en grupos de alta susceptibilidad y en la población general, ya medibles mediante investigaciones específicas a escala individual y ecológica, basadas en registros de morbilidad.	ROJO
300 - 499	Pésima	SITUACIÓN DE ALERTA: Da lugar 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 en general.	PÚRPURA
> 500	Crítica	SITUACIÓN DE EMERGENCIA AMBIENTAL: Da lugar a que se incremente aún más el riesgo o probabilidad de ocurrencia de los efectos adversos sobre la salud de la población en general y en grupos de riesgo, que se traduce en un evidente incremento agudo de la morbilidad y mortalidad que sobrecarga los servicios asistenciales.	MARRÓN

ANEXO 6

DATOS DE LOS FRENTE FRÍOS EN LA PROVINCIA DE VILLA CLARA.

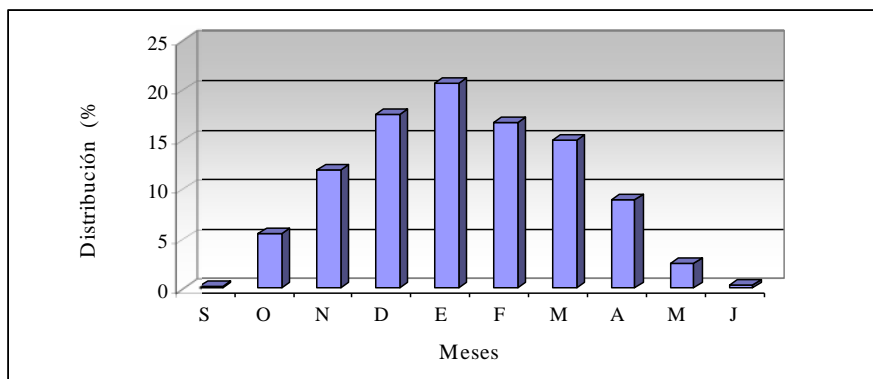


Figura 1 Distribución mensual de los frentes fríos.

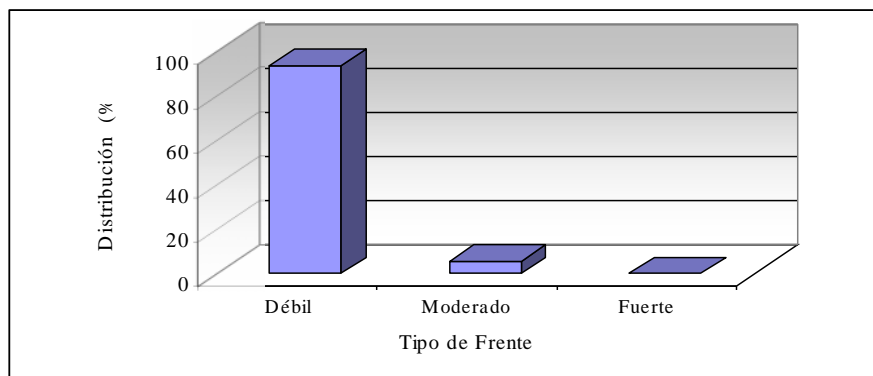


Figura 2 Porcentaje de afectación atendiendo a la intensidad de los frentes.

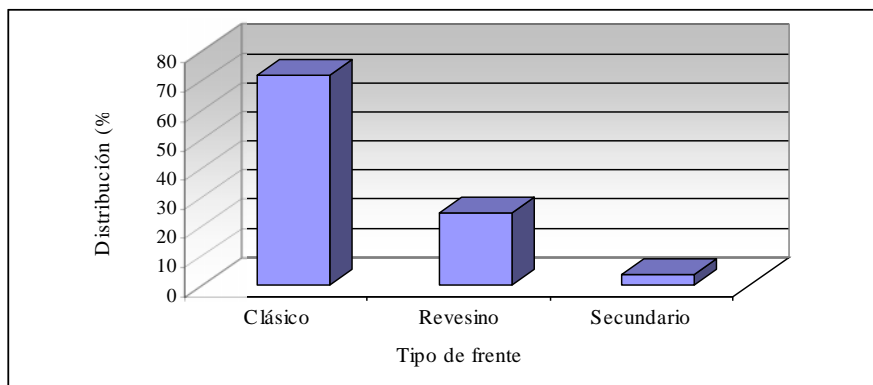
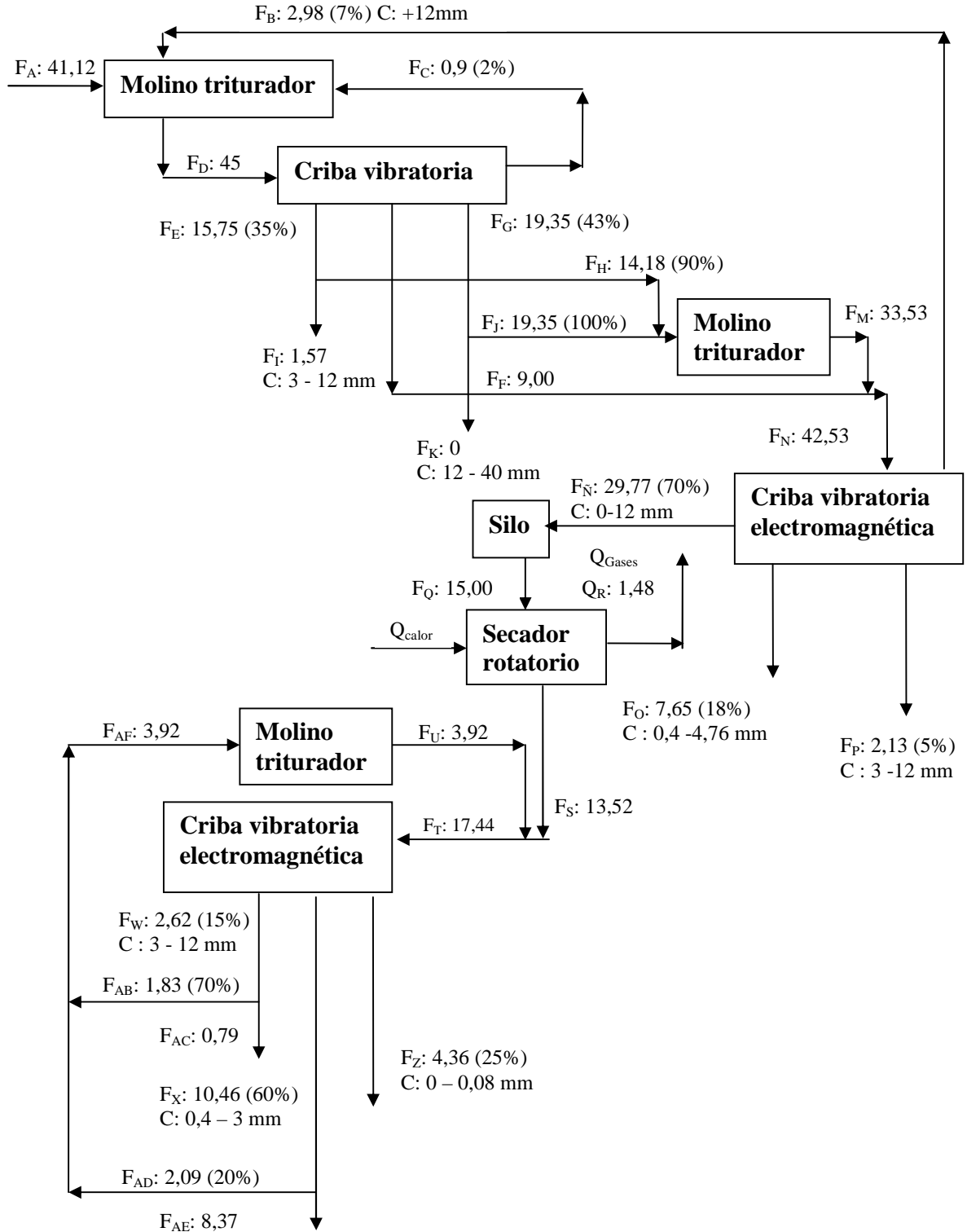


Figura 3 Clasificación de los frentes fríos atendiendo a su origen.

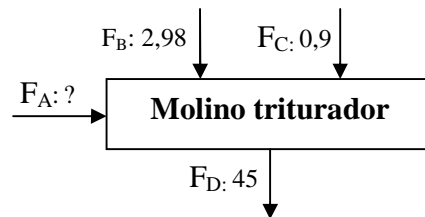
ANEXO 7
BALANCE DE MASA PARA MÁXIMA CAPACIDAD DE LA PLANTA.



Donde:

C: Clase granulométrica de cada producto de zeolita.

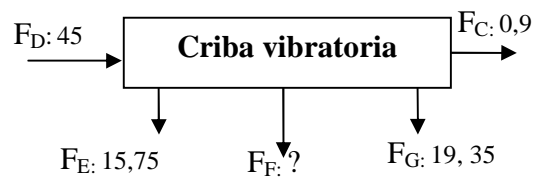
Balance parcial



Entrada = Salida

$$F_A + F_B + F_C = F_D$$

$$F_A = 41,12 \text{ t/h}$$



$$F_D = F_E + F_F + F_G + F_C$$

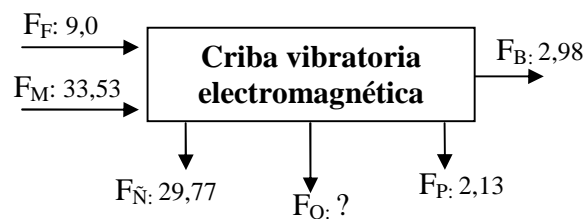
$$F_F = F_D - (F_E + F_G + F_C)$$

$$F_F = 9 \text{ t/h}$$



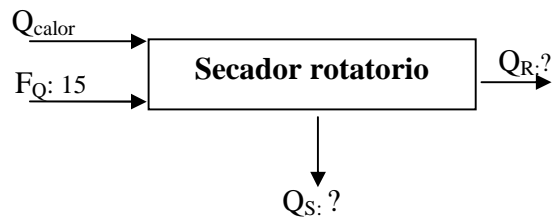
$$F_H + F_I = F_M$$

$$F_M = 33,53 \text{ t/h}$$



$$F_F + F_M = F_N + F_O + F_P + F_B$$

$$F_O = 7,65 \text{ t/h}$$



Donde:

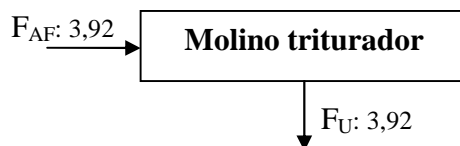
Q_R : agua evaporada; W_1 : Humedad de entrada (18%); W_2 : Humedad de salida (9%)

$$Q_R = F_Q - F_S$$

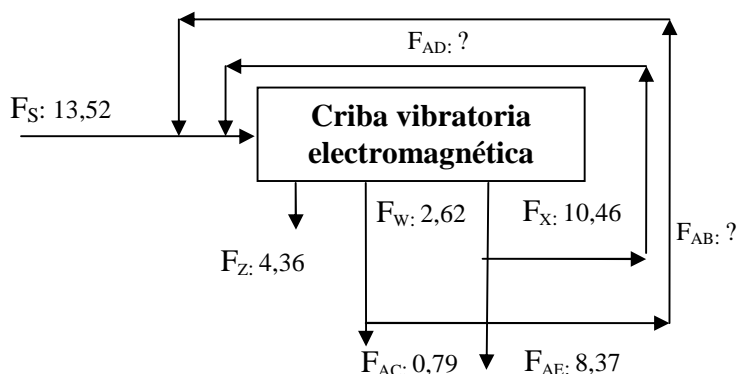
$$F_S = F_Q (100 - W_1) / (100 - W_2)$$

$$F_S = 13,52 \text{ t/h}$$

$$Q_R = 1,48 \text{ t/h}$$



$$F_{AF} = F_U$$



$$F_W = F_{AB} + F_{AC}$$

$$F_{AB} = F_W - F_{AC} = 1,83 \text{ t/h}$$

$$F_X = F_{AE} + F_{AD}$$

$$F_{AD} = F_X - F_{AE} = 2,09 \text{ t/h}$$

Este balance está hecho para la campaña de Rayonitro con el Fertilizol, como producto líder de la planta con tratamiento de secado (13,52 t/h) y en menor proporción se obtienen otros productos sin tratamiento de secado como el Zoad y el Zook. Las emisiones de PM_{10} en estas condiciones productivas son las más elevadas, porque el producto principal que se obtiene es con tratamiento de secado.

Consumo de combustible

La determinación del Consumo de Combustible (CC) se realizó a través de la siguiente expresión, para los ritmos productivos más representativos del secador rotatorio, según balances de materiales.

$$CC = ZP * IC$$

Donde:

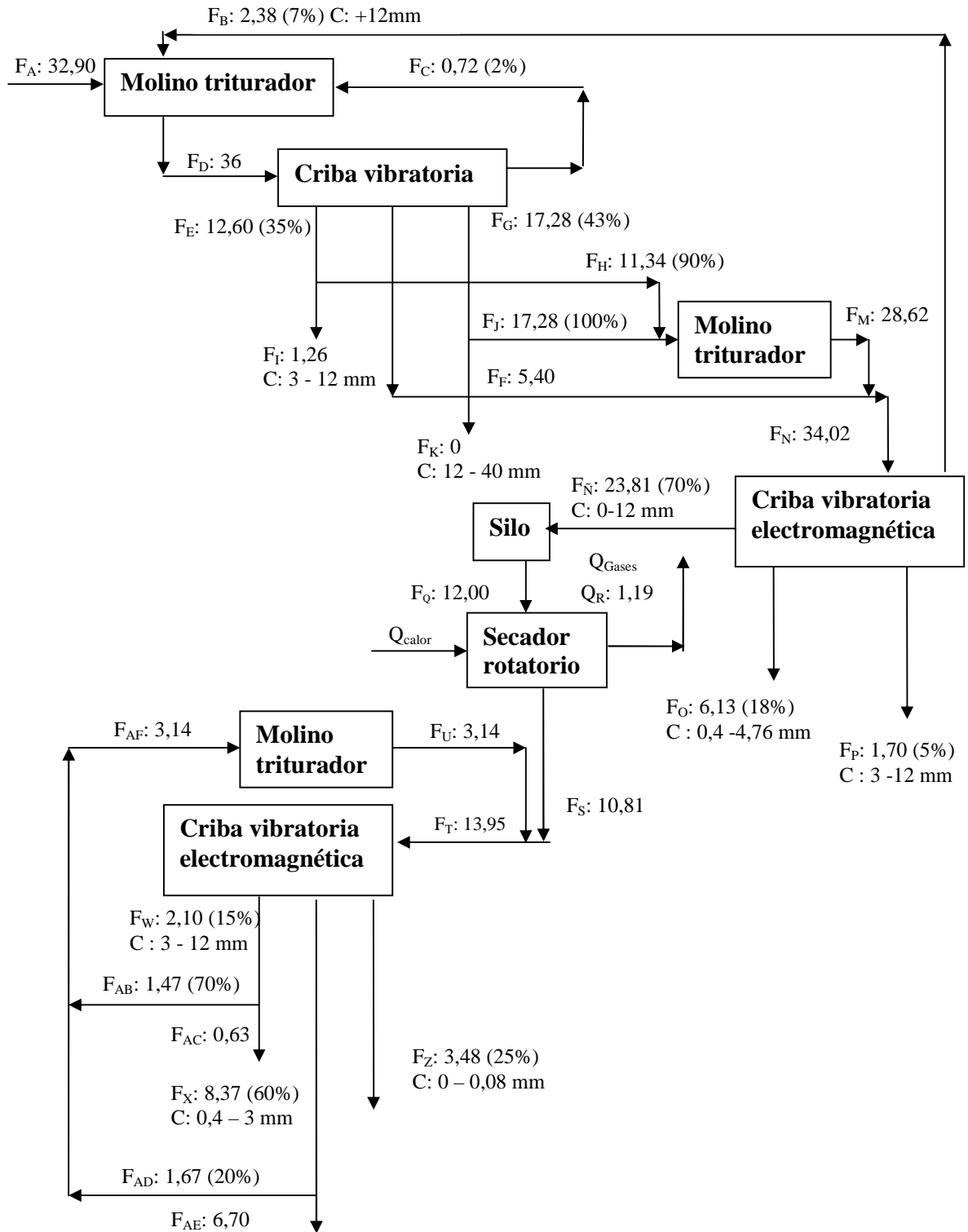
ZP: Zeolita Procesada en el secador rotatorio (t/h).

IC: Índice de Consumo de combustible en secador rotatorio (kg combustible/t zeolita procesada). El combustible es diesel.

Tabla. Consumo de combustible para diferentes capacidades de trabajo del secador.

Capacidad de trabajo del secador rotatorio (%)	Consumo combustible del secador rotatorio (kg/h)	Zeolita seca procesada en el secador rotatorio (t/h)	IC (kg combustible/ t zeolita seca)
98	134,79	13,52	9,97
80	107,78	10,81	9,97
60	80,86	8,11	9,97
52 (promedio)	71,39	7,16	9,97
40	53,54	5,37	9,97
28	37,69	3,78	9,97

ANEXO 8
BALANCE DE MASA TRABAJANDO EL SECADOR ROTATORIO AL 80% DE SU CAPACIDAD.



Donde:

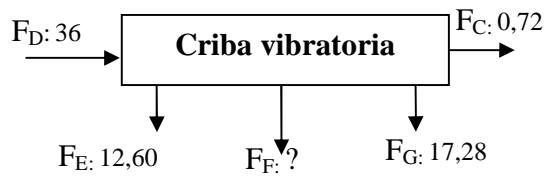
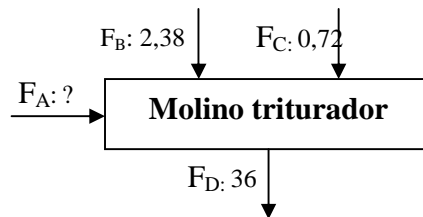
C: Clase granulométrica de cada producto de zeolita.

Balance parcial

Entrada = Salida

$$F_A + F_B + F_C = F_D$$

$$F_A = 32,90 \text{ t/h}$$



$$F_D = F_E + F_F + F_G + F_C$$

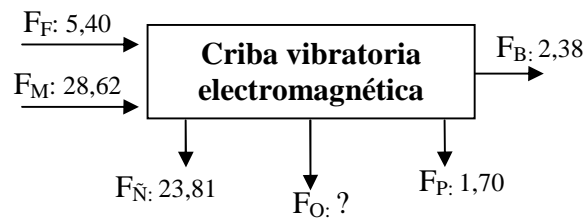
$$F_F = F_D - (F_E + F_G + F_C)$$

$$F_F = 5,40 \text{ t/h}$$



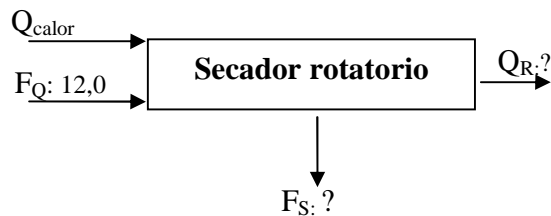
$$F_H + F_I = F_M$$

$$F_M = 21,47 \text{ t/h}$$



$$F_F + F_M = F_{\tilde{N}} + F_O + F_P + F_B$$

$$F_O = 6,13 \text{ t/h}$$



Donde:

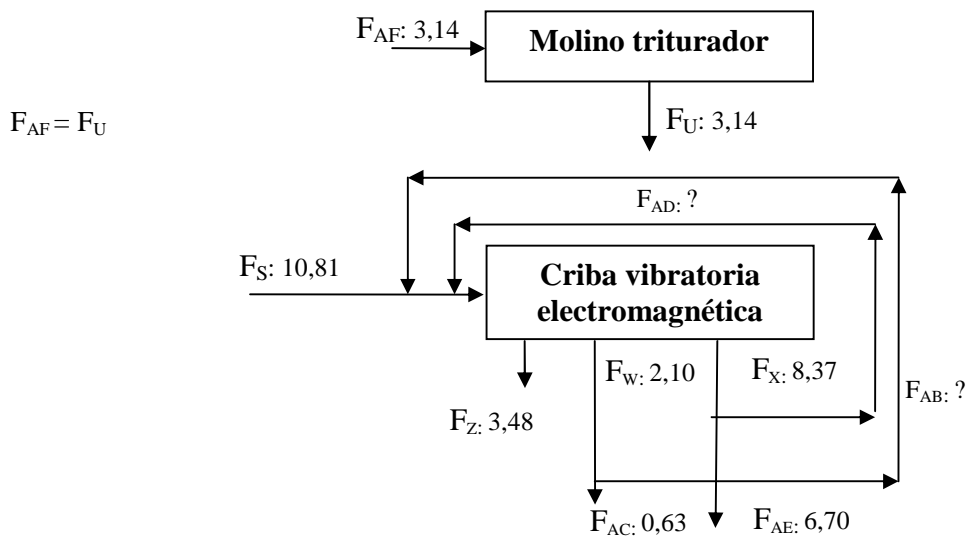
Q_R : agua evaporada; W_1 : Humedad de entrada (18%); W_2 : Humedad de salida (9%)

$$Q_R = F_Q - F_S$$

$$F_S = F_Q (100 - W_1) / (100 - W_2)$$

$$F_S = 10,81 \text{ t/h}$$

$$Q_R = 1,19 \text{ t/h}$$



$$F_W = F_{AB} + F_{AC}$$

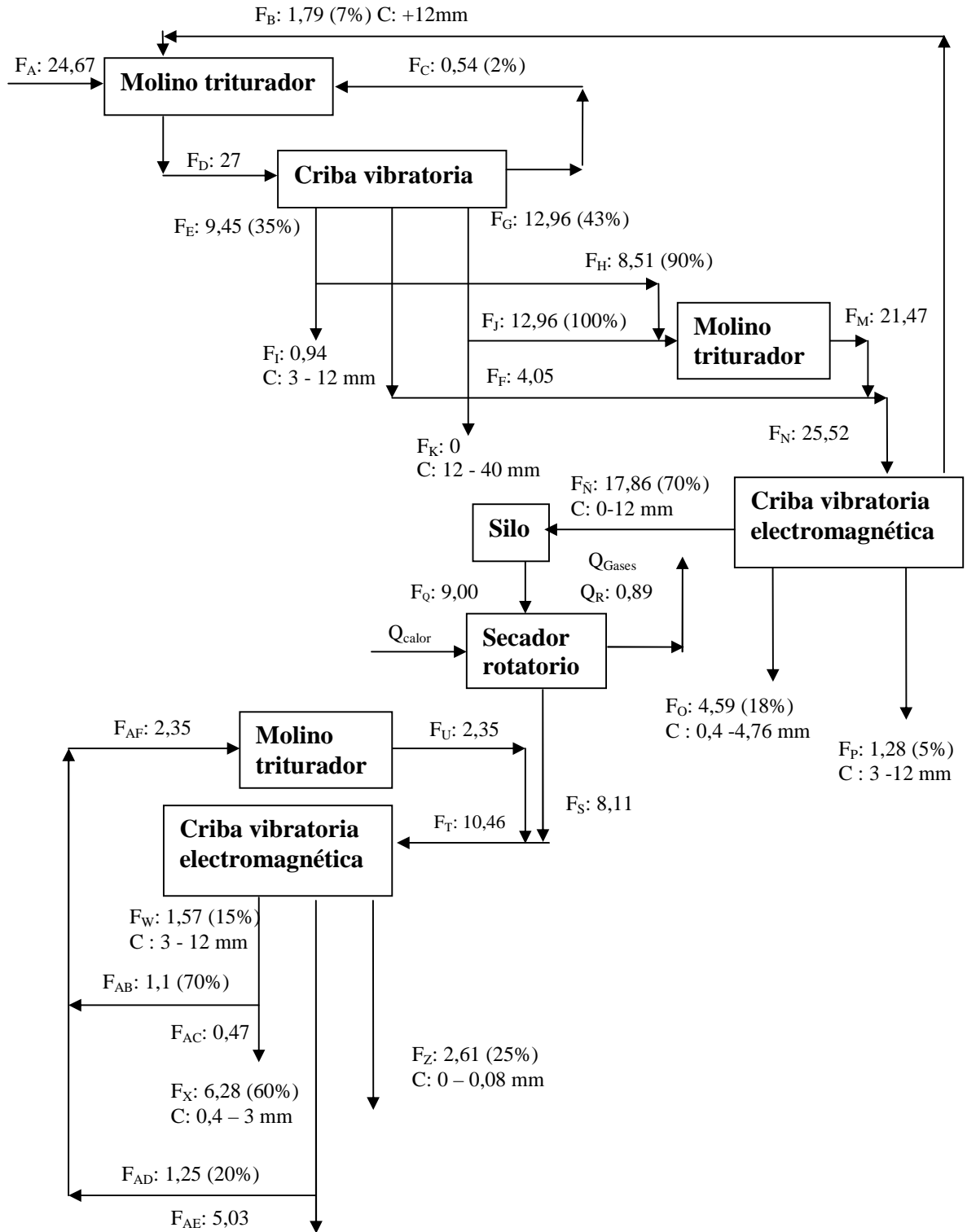
$$F_{AB} = F_W - F_{AC} = 1,47 \text{ t/h}$$

$$F_X = F_{AE} + F_{AD}$$

$$F_{AD} = F_X - F_{AE} = 1,67 \text{ t/h}$$

Este balance está hecho para la campaña de Rayonitro con el Fertilzol, como producto líder de la planta con tratamiento de secado de 10,81 t/h, trabajando al 80% de la capacidad máxima del secador rotatorio y utilizando los valores promedio de sus producciones reales en los seis años de estudio. Se obtiene en menor proporción otros productos sin tratamiento de secado como el Zoad y el Zook.

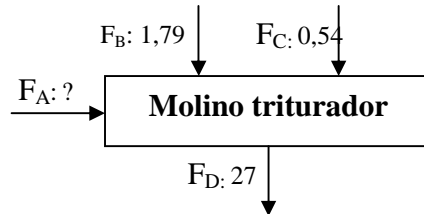
ANEXO 9
BALANCE DE MASA TRABAJANDO EL SECADOR ROTATORIO AL 60% DE SU CAPACIDAD.



Donde:

C: Clase granulométrica de cada producto de zeolita.

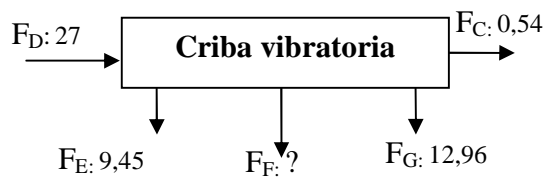
Balance parcial



Entrada = Salida

$$F_A + F_B + F_C = F_D$$

$$F_A = 24,67 \text{ t/h}$$



$$F_D = F_E + F_F + F_G + F_C$$

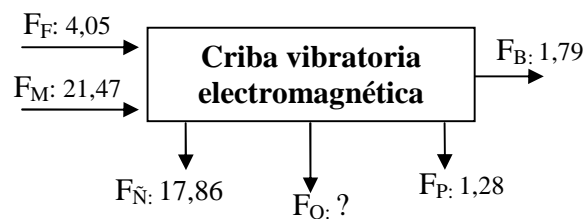
$$F_F = F_D - (F_E + F_G + F_C)$$

$$F_F = 4,05 \text{ t/h}$$



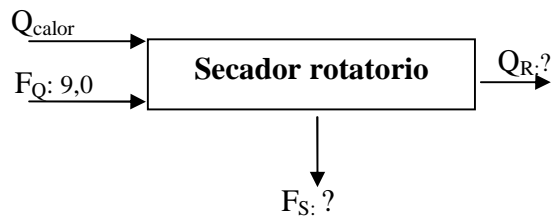
$$F_H + F_I = F_M$$

$$F_M = 21,47 \text{ t/h}$$



$$F_F + F_M = F_N + F_O + F_P + F_B$$

$$F_O = 4,59 \text{ t/h}$$



Donde:

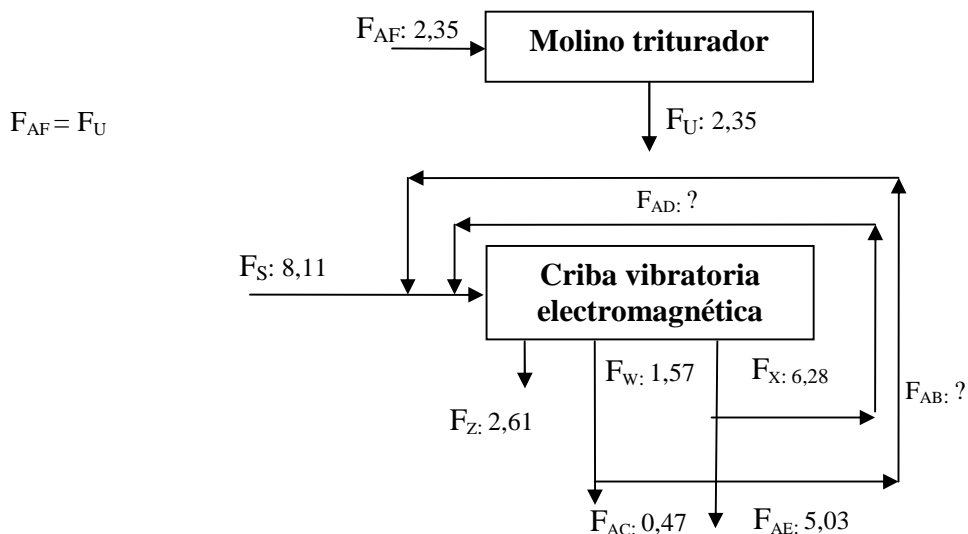
Q_R : agua evaporada; W_1 : Humedad de entrada (18%); W_2 : Humedad de salida (9%)

$$Q_R = F_Q - F_S$$

$$F_S = F_Q (100 - W_1) / (100 - W_2)$$

$$F_S = 8,11 \text{ t/h}$$

$$Q_R = 0,89 \text{ t/h}$$



$$F_W = F_{AB} + F_{AC}$$

$$F_{AB} = F_W - F_{AC} = 1,10 \text{ t/h}$$

$$F_X = F_{AE} + F_{AD}$$

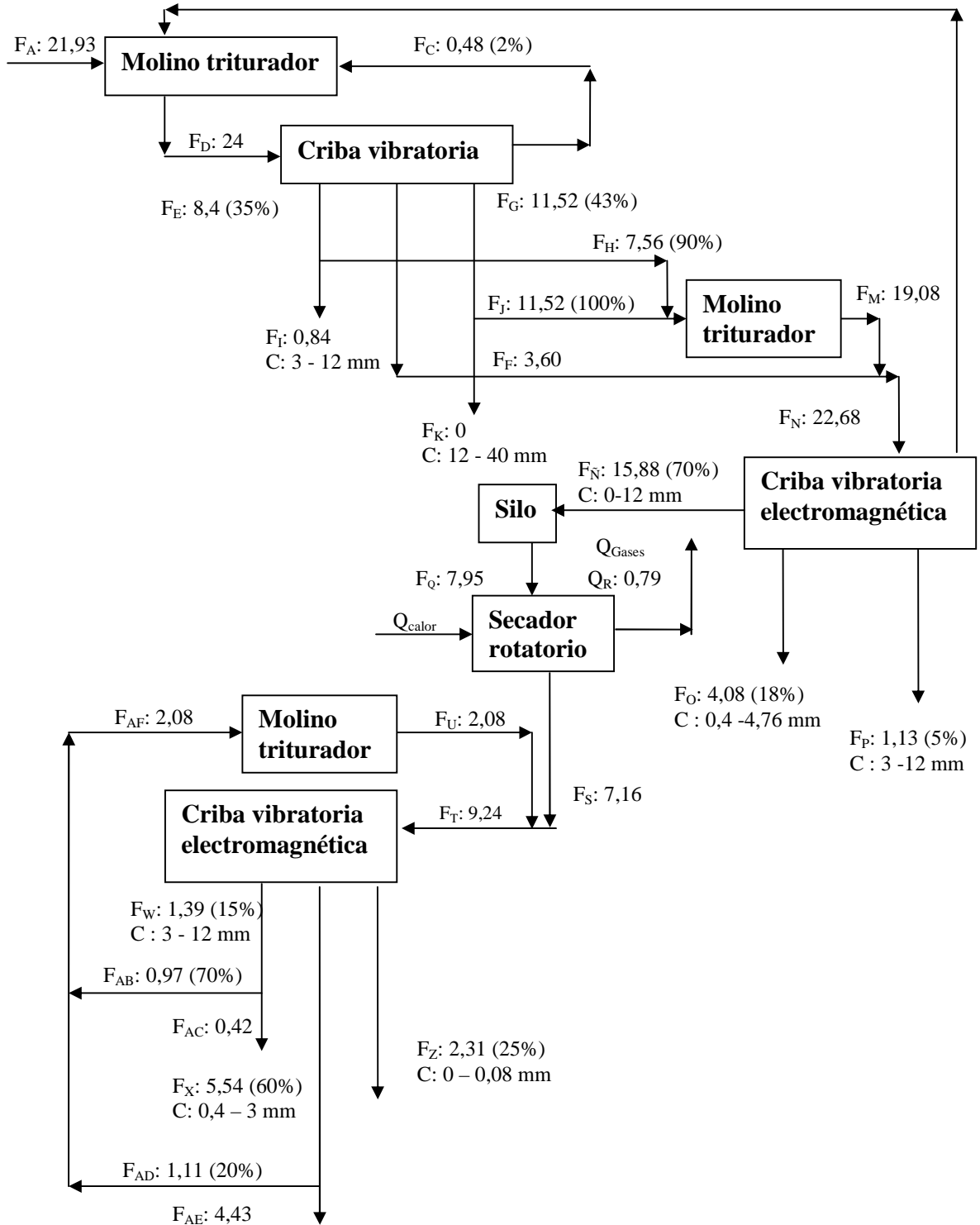
$$F_{AD} = F_X - F_{AE} = 1,25 \text{ t/h}$$

Este balance está hecho para la campaña de Rayonitro con el Fertilizol, como producto líder de la planta con tratamiento de secado de 8,11 t/h, trabajando al 60% de la capacidad máxima del secador rotatorio y utilizando los valores promedio de sus producciones reales en los seis años de estudio. Se obtiene en menor proporción otros productos sin tratamiento de secado como el Zoad y el Zook.

ANEXO 10

BALANCE DE MASA PARA LA PRODUCCIÓN PROMEDIO DE LA PLANTA, TRABAJANDO EL SECADOR ROTATORIO AL 52% DE SU CAPACIDAD.

F_B : 1,59 (7%) C: +12mm



Donde:

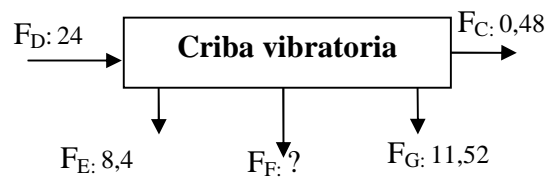
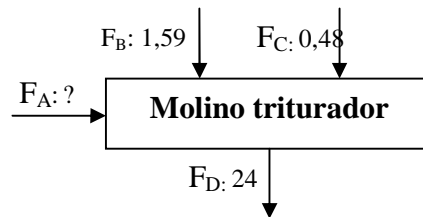
C: Clase granulométrica de cada producto de zeolita.

Balance parcial

Entrada = Salida

$$F_A + F_B + F_C = F_D$$

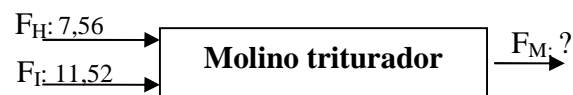
$$F_A = 21,93 \text{ t/h}$$



$$F_D = F_E + F_F + F_G + F_C$$

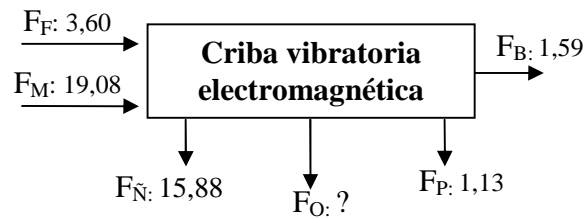
$$F_F = F_D - (F_E + F_G + F_C)$$

$$F_F = 3,60 \text{ t/h}$$



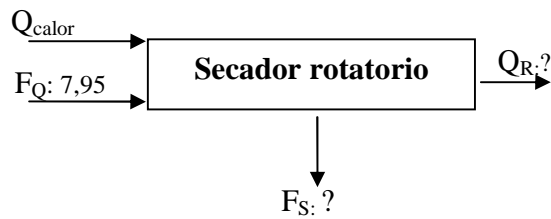
$$F_H + F_I = F_M$$

$$F_M = 19,08 \text{ t/h}$$



$$F_F + F_M = F_N + F_O + F_P + F_B$$

$$F_O = 4,08 \text{ t/h}$$



Donde:

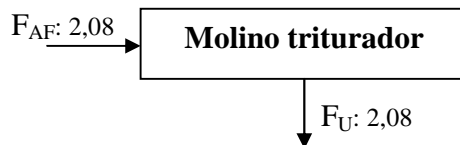
Q_R : agua evaporada; W_1 : Humedad de entrada (18%); W_2 : Humedad de salida (9%)

$$Q_R = F_Q - F_S$$

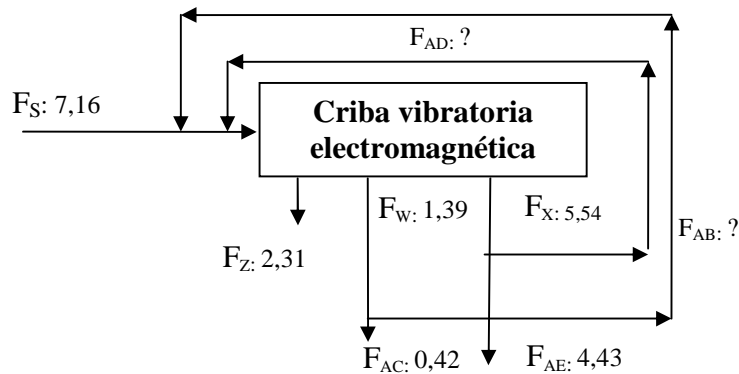
$$F_S = F_Q (100 - W_1) / (100 - W_2)$$

$$F_S = 7,16 \text{ t/h}$$

$$Q_R = 0,79 \text{ t/h}$$



$$F_{AF} = F_U$$



$$F_W = F_{AB} + F_{AC}$$

$$F_{AB} = F_W - F_{AC} = 0,97 \text{ t/h}$$

$$F_X = F_{AE} + F_{AD}$$

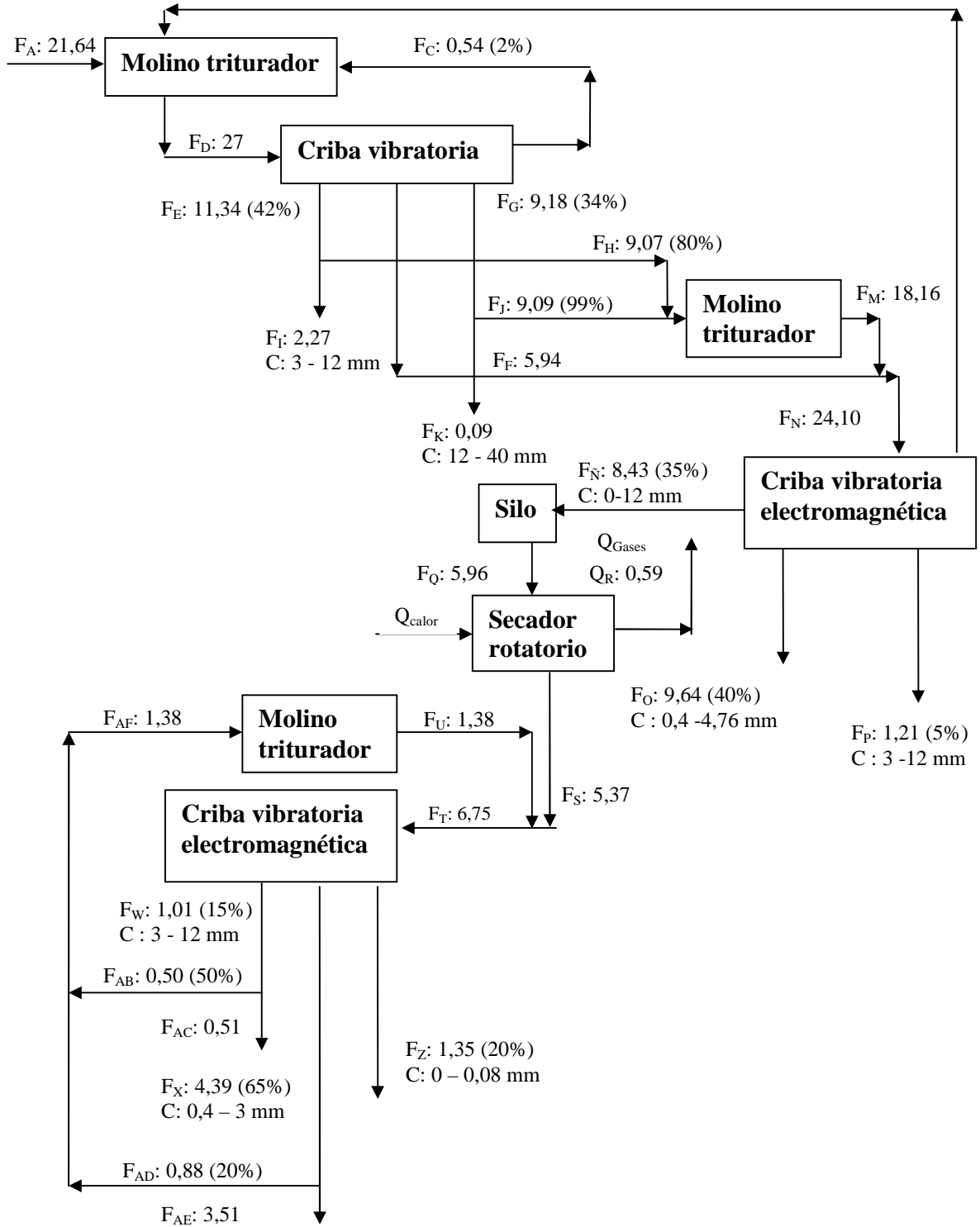
$$F_{AD} = F_X - F_{AE} = 1,11 \text{ t/h}$$

Este balance está hecho para la campaña de Rayonitro con el Fertilizol, como producto líder de la planta con tratamiento de secado de 7,16 t/h, trabajando al 40% de la capacidad máxima del secador rotatorio y utilizando los valores promedio de sus producciones reales en los seis años de estudio. Se obtiene en menor proporción otros productos sin tratamiento de secado como el Zoad y el Zook.

ANEXO 11

BALANCE DE MASA PARA 60% DE LA PRODUCCIÓN SIN TRATAMIENTO DE SECADO (ZOOK) Y MÍNIMAS PRODUCCIONES CON SECADO.

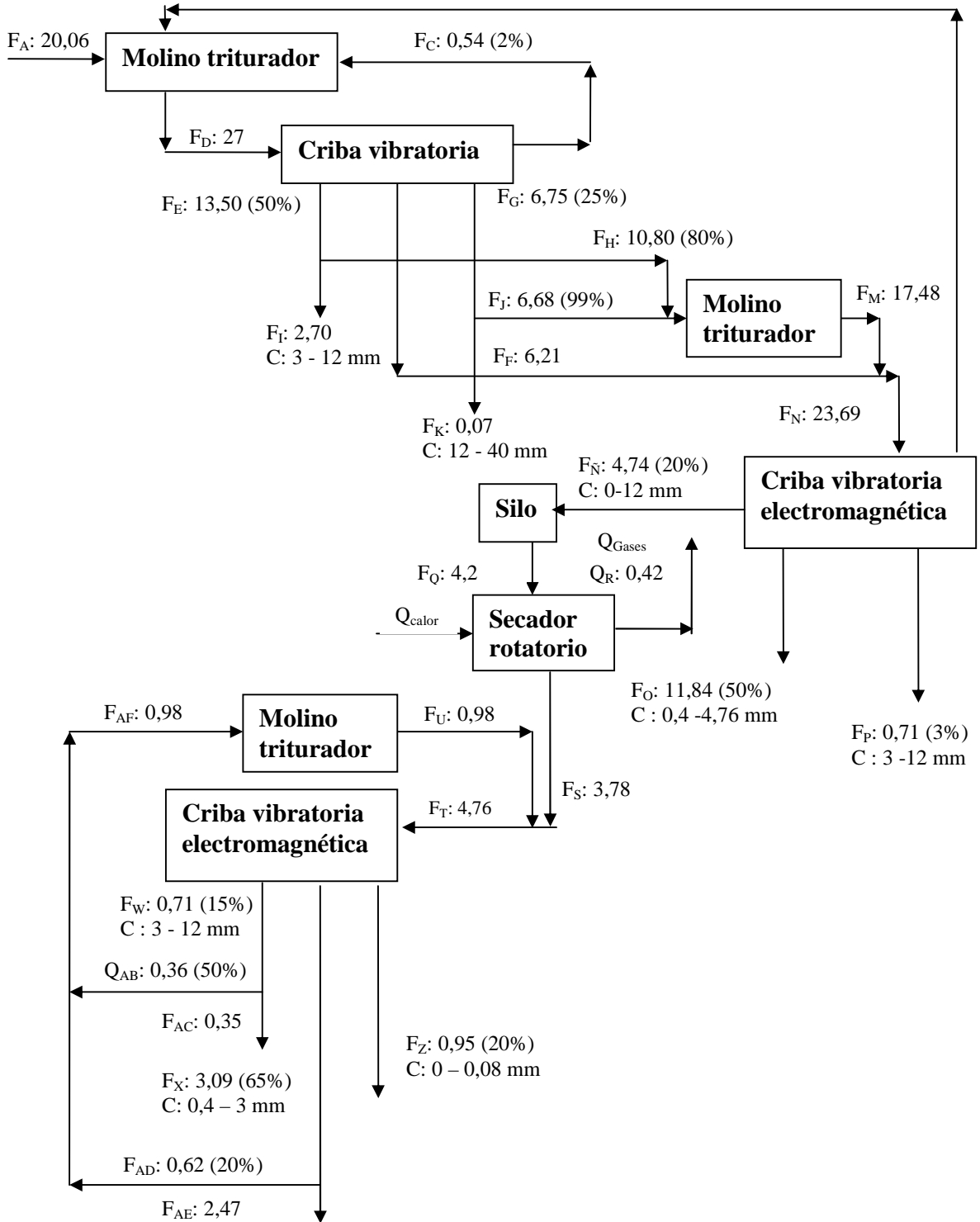
$F_B: 4,82$ (20%) $C: +12\text{mm}$



ANEXO 12

BALANCE DE MASA PARA 60% DE LA PRODUCCIÓN SIN TRATAMIENTO DE SECADO (ZOAD) Y MÍNIMAS PRODUCCIONES CON SECADO.

$F_B: 4,82$ (20%) C: +12mm



ANEXO 13

DATOS Y VARIABLES CALCULADAS DE LA PLANTA DE ZEOLITA.

Valores que se utilizan en el Software ISCST3 para la modelación de la dispersión del PM₁₀ y para la selección de los dispositivos de control de la emisión del PM₁₀.

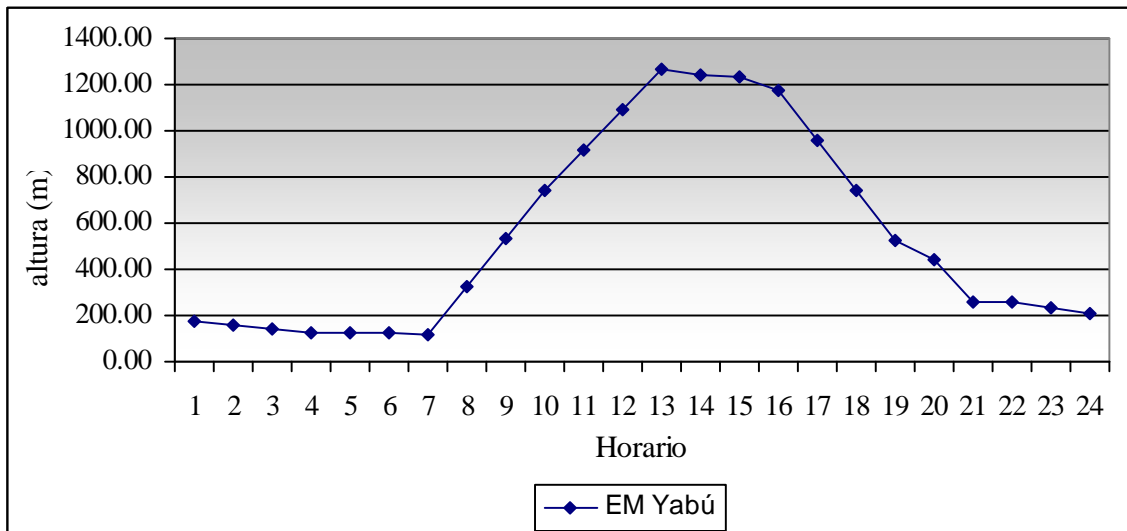
Tipo de Fuente	Puntual	Identificación de la fuente	Producción de zeolita seca
Localización de la fuente			
Coordenada X*		593 228	m
Coordenada Y*		277 665	m
Elevación de la base sobre el nivel del mar*		110	m
Altura de emisión sobre la base*		22	m
Parámetros de la fuente de emisión.		Contaminante PM ₁₀	
Temperatura de los gases, salida de la chimenea*		453,15	K
Velocidad de los gases a la salida de la chimenea** (promedio seis años)		1,29 – 2,04	m/s
Diámetro interior de la chimenea a la salida de los gases*		0,5	m
Horas promedios de producción**		6,00	h
Flujo de gases (máxima capacidad instalada)**		3 826,00	m ³ /h
Horario de producción**		7,30 am – 4,30 pm	
Combustible**		Diesel	
Consumo (máxima capacidad instalada)		122,19	kg/h

*: Términos que permanecen constantes independientemente de los ritmos productivos.

** : Términos que varían con los ritmos productivos.

ANEXO 14

COMPORTAMIENTO HORARIO DE LA ALTURA PROMEDIO DE LA CAPA DE MEZCLA DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DEL YABÚ



ANEXO 15

DETERMINACIÓN DEL FLUJO VOLUMÉTRICO DE GAS Y SU VELOCIDAD DE SALIDA.

1. Cálculo del flujo volumétrico de gas

$$Q = Q_a + Q_{cv} \dots\dots\dots (3.1)$$

Donde:

Q: Flujo máximo del gas emitido través de la chimenea (m³/h).

Q_a: Flujo de Aire (m³/h)

Q_{cv}: Flujo de Combustible (m³/s).

El flujo de aire se obtiene a través de la expresión 3.2

$$Q_a = \frac{RE * AE * FC_M}{100} \dots\dots\dots(3.2)$$

Donde:

RE = 120 % es la relación estequiométrica

AE: Aire Estequiométrico (m³/kg).

FC_M: Flujo Másico de Combustible (kg/h).

El aire estequiométrico se obtiene a través del siguiente procedimiento:

Ecuación para determinar metros cúbicos de oxígenos para combustionar cada % de los siguientes elementos químicos (C, H, S).

$$\frac{\% \text{ KgC}}{100 \text{ Kg}} * \frac{1 \text{ KmolC}}{12 \text{ KgC}} * \frac{1 \text{ KmolO}_2}{\text{KmolC}} * \frac{22,4 \text{ m}^3 \text{O}_2}{1 \text{ KmolO}_2} = a \text{ m}^3 / \text{kg} \text{O}_2 \dots\dots\dots(3.3)$$

$$\frac{\% \text{ KgH}}{100 \text{ Kg}} * \frac{1 \text{ KmoleH}}{1 \text{ KgH}} * \frac{0,5 \text{ KmoleO}_2}{2 \text{ KmoleH}} * \frac{22,4 \text{ m}^3 \text{O}_2}{1 \text{ KmoleO}_2} = b \text{ m}^3 / \text{kg} \text{O}_2 \dots\dots\dots(3.4)$$

$$\frac{\% \text{ KgS}}{100 \text{ Kg}} * \frac{1 \text{ KmoleS}}{32 \text{ KgS}} * \frac{1 \text{ KmoleO}_2}{1 \text{ KmoleS}} * \frac{22,4 \text{ m}^3 \text{O}_2}{1 \text{ KmoleO}_2} = c \text{ m}^3 / \text{kg} \text{O}_2 \dots\dots\dots(3.5)$$

Donde: **C**arbono (C); **H**idrógeno (H); **A**zufre (S); **O**xígeno (O₂); a, b y c son valores numéricos expresado en $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \text{O}_2$

Sustituyendo (3.3), (3.4) y (3.5) en (3.6) se obtiene oxígeno total para combustionar los elementos químicos antes mencionados.

$$a \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \text{O}_2 + b \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \text{O}_2 + c \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \text{O}_2 = \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \text{O}_2 \text{Total} \dots\dots\dots (3.6)$$

Sustituyendo (3.6) en (3.7) se obtiene el Aire Estequiométrico en (m³/kg) de aire, esta expresión se sustituye en (3.2)

$$AE = O_2 \text{Total} * \left(\frac{100 \text{ m}^3 \text{Naire}}{21 \text{ m}^3 \text{NO}_2} \right) \dots\dots\dots (3.7)$$

El cálculo del aire estequiométrico se realizó teniendo en cuenta la composición elemental del combustible Diesel como se muestra en la siguiente tabla, suponiendo la oxidación del C, H y S, como se representa en las siguientes ecuaciones químicas:



Composición elemental del combustible Diesel.

Combustible	Composición química (%)		
	S	H	C
Diesel	0,67	13,86	83,91

El flujo másico de combustible se obtuvo teniendo en cuenta el Índice de Consumo de la base de datos de consumo de combustible, según producción de zeolita con tratamiento de secado, anexo 13. A continuación se muestra la expresión:

$$Q_{cv} = \frac{FC_M (kg/h)}{\rho (g/cm^3)} = \frac{FC_M (kg/h)}{\rho (kg/m^3)} = m^3/h \dots\dots\dots(3.11)$$

$$1 \text{ g/cm}^3 = 1000 \text{ kg/m}^3$$

del diesel = 0,8354 g/cm³ según certificado de la Empresa Comercializadora de Combustible.

Para obtener Q se sustituye (3.11) en (3.1).

2. Cálculo de la velocidad de salida del gas

Para obtener la velocidad de salida de los gases, se plantea la siguiente expresión:

$$Q = A * V = m^3/s \dots\dots\dots(3.12)$$

Donde:

A: Área del tubo (chimenea), (m²).

V: Velocidad de salida de los gases (m/s).

$$A = \frac{\pi * d^2}{4} = m^2 \dots\dots\dots(3.13)$$

Donde:

$$= 3,14.$$

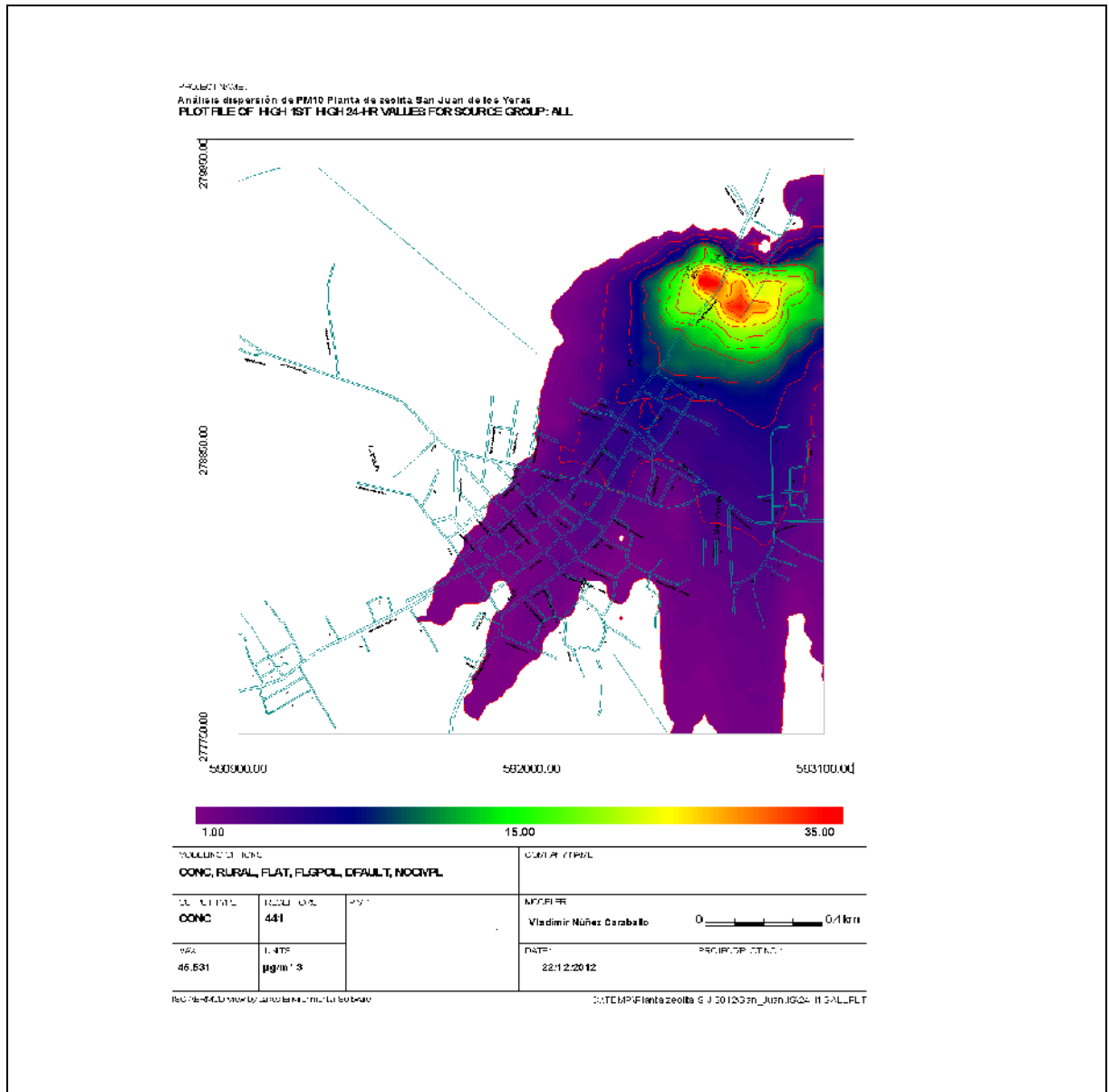
d: diámetro interior de la chimenea.

Sustituyendo y despejando (3.13) en (3.12) se obtiene la velocidad de salida de los gases.

$$V = \frac{4 * Q}{\pi * d^2} = m/s \dots\dots\dots(3.14)$$

ANEXO 16

RESULTADO DE LA DISPERSIÓN DEL PM₁₀, CON CONTROL DE LA EMISIÓN, EN EL EDV II.



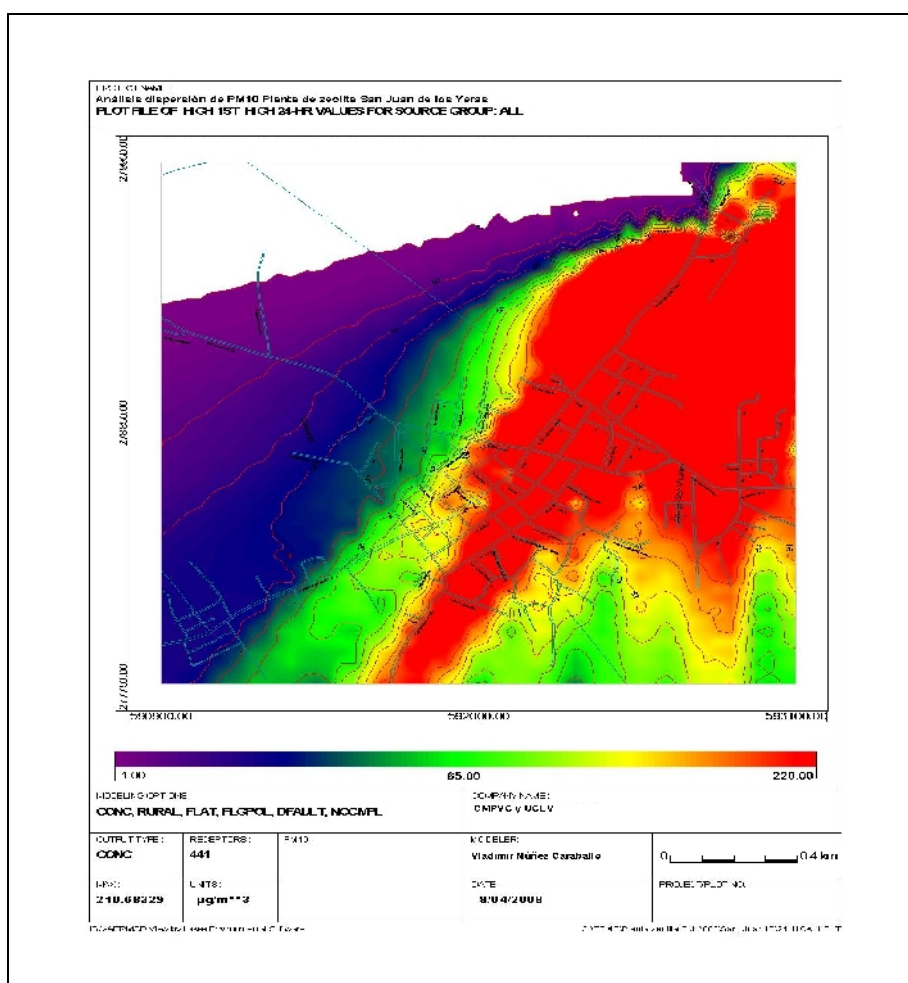
ANEXO 17

EJEMPLOS DEL PRONÓSTICOS DE CALIDAD DEL AIRE CON SIETE DÍAS DE ANTELACIÓN AL ECCA.

Fecha del ECCA	Cprom. diario de PM ₁₀ (µg/m ³)	Fecha de elaboración PCA	PCA con siete días antelación al ECCA (µg/m ³)
19-12-06	121,64	12-12-06	80
27-12-06	128,40	20-12-06	140
10-01-07	117,27	03-01-07	150
11-01-07	89,16	04-01-07	120
16-02-07	129,75	09-02-07	110
19-02-07	90,83	12-02-07	60
20-02-07	106,63	13-02-07	130
17-12-07	130,06	10-12-07	140
18-12-07	112,22	11-12-07	90
19-12-07	128,40	12-12-07	140
20-12-07	102,66	13-12-07	60
15-01-08	105,45	08-01-08	90
18-01-08	86,81	11-01-08	110
22-01-08	89,21	15-01-08	100
25-01-08	127,48	18-01-08	100
26-01-08	124,26	19-01-08	90
28-01-08	125,07	21-01-08	60
01-02-08	95,01	25-01-08	110
04-02-08	81,94	28-01-08	110
14-02-08	127,08	07-02-08	80
15-04-08	130,11	08-04-08	145

ANEXO 18

EJEMPLO DEL PRONÓSTICO DE CALIDAD DEL AIRE CON SIETE DÍAS DE ANTELACIÓN AL ECCA.



La concentración promedio del PM₁₀ para estos PCA es de 145 µg/m³, a continuación se agregan otros PCA con tres y un día de antelación al ECCA que tienen valores similares, para evitar repetir resultados.

Simbología de PCA con días de antelación ECCA	7	3	1	Año			
				Abril			
				2008	8	12	14

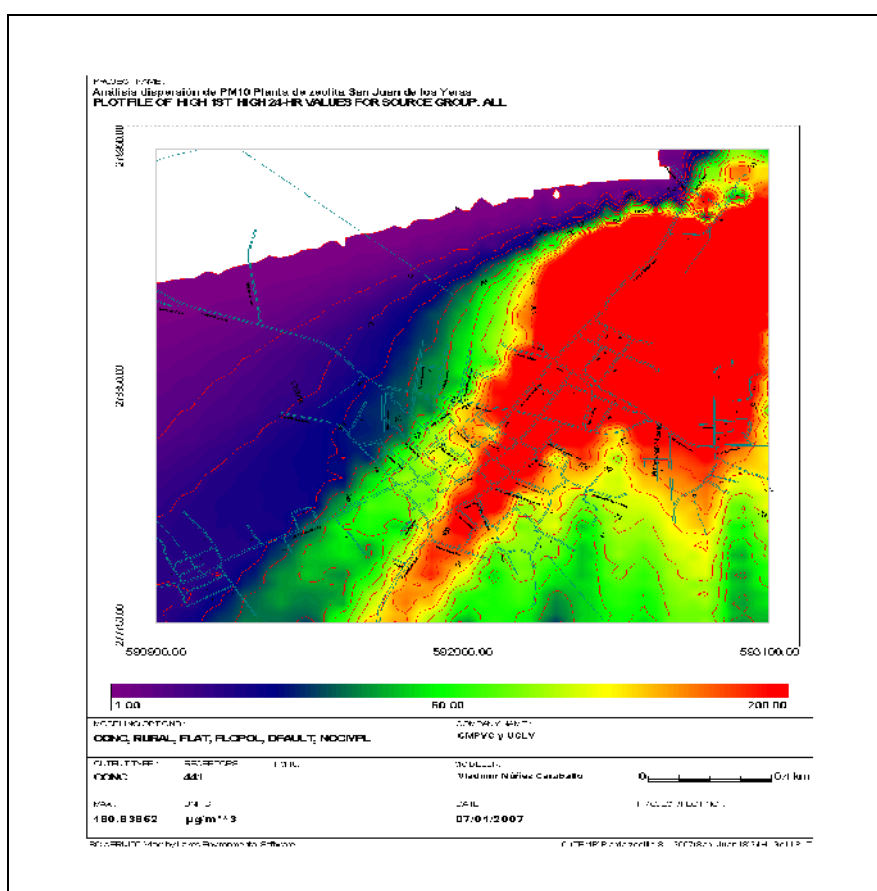
ANEXO 19

EJEMPLOS DEL PRONÓSTICOS DE CALIDAD DEL AIRE CON TRES DÍAS DE ANTELACIÓN AL ECCA.

Fecha del ECCA	Cprom. diario de PM ₁₀ (µg/m ³)	Fecha de elaboración PCA	PCA con tres días antelación al ECCA (µg/m ³)
19-12-06	121,64	16-12-06	100
27-12-06	128,40	24-12-06	105
10-01-07	117,27	07-01-07	110
11-01-07	89,16	08-01-07	85
16-02-07	129,75	13-02-07	140
19-02-07	90,83	16-02-07	85
20-02-07	106,63	17-02-07	90
17-12-07	130,06	14-12-07	135
18-12-07	112,22	15-12-07	105
19-12-07	128,40	16-12-07	100
20-12-07	102,66	17-12-07	85
15-01-08	105,45	12-01-08	90
18-01-08	86,81	15-01-08	80
21-01-08	101,71	18-01-08	90
22-01-08	89,21	19-01-08	80
25-01-08	127,48	22-01-08	100
04-02-08	81,94	01-02-08	75
14-02-08	127,08	11-02-08	105
15-04-08	130,11	12-04-08	145
17-11-08	130,72	14-11-08	130

ANEXO 20

EJEMPLO DEL PRONÓSTICO DE CALIDAD DEL AIRE CON TRES DÍAS DE ANTELACIÓN AL ECCA.



La concentración promedio del PM₁₀ para estos PCA es de 110 µg/m³, a continuación se agregan otros PCA con tres y un día de antelación al ECCA que tienen valores similares.

Simbología de PCA con días de antelación al ECCA	7	3	1

AAños	Diciembre	Enero	Febrero
2006	26		
2007		7	9
2008			11_25_28

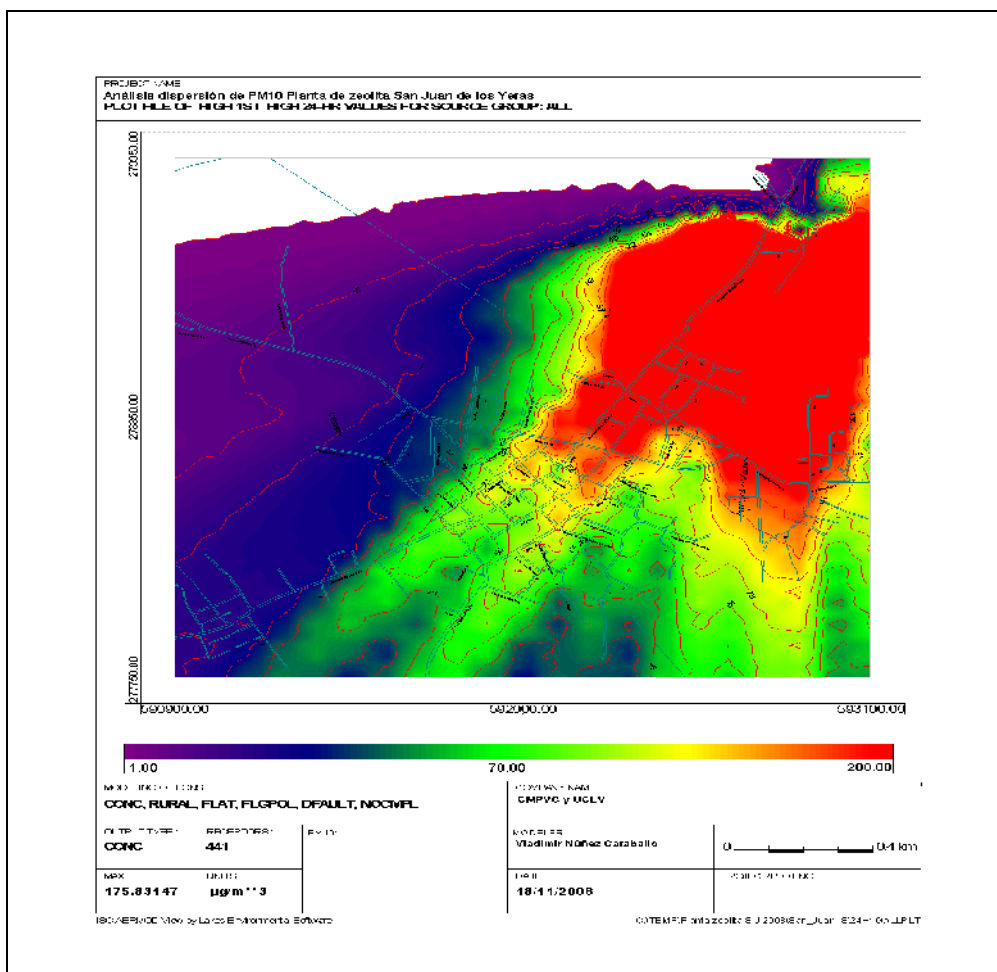
ANEXO 21

EJEMPLOS DEL PRONÓSTICOS DE CALIDAD DEL AIRE CON UN DÍA DE ANTELACIÓN AL ECCA.

Fecha del ECCA	Cprom. diario de PM ₁₀ (µg/m ³)	Fecha de elaboración PCA	PCA con un día antelación al ECCA (µg/m ³)
19-12-06	121,64	18-12-06	110
27-12-06	128,40	26-12-06	110
10-01-07	117,27	09-01-07	105
11-01-07	89,16	10-01-07	80
16-02-07	129,75	15-02-07	140
19-02-07	90,83	18-02-07	85
20-02-07	106,63	19-02-07	90
17-12-07	130,06	16-12-07	135
18-12-07	112,22	17-12-07	100
19-12-07	128,40	18-12-07	100
20-12-07	102,66	19-12-07	85
15-01-08	105,45	14-01-08	90
18-01-08	86,81	17-01-08	80
21-01-08	101,71	20-01-08	90
22-01-08	89,21	21-01-08	80
25-01-08	127,48	24-01-08	110
26-01-08	124,26	25-01-08	110
14-02-08	127,08	13-02-08	110
15-04-08	130,11	14-04-08	145
17-11-08	130,72	16-11-08	130

ANEXO 22

EJEMPLO DEL PRONÓSTICO DE CALIDAD DEL AIRE CON UN DÍA DE ANTELACIÓN AL ECCA.



La concentración promedio del PM_{10} para estos PCA es de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Simbología de PCA con días de antelación ECCA	7	3	1

Año	Noviembre	Enero
2007		11
2008	18	20

ANEXO 23

EJEMPLOS DE LOS VALORES PROMEDIOS DEL PM₁₀ DE LOS RESULTADOS DEL MONITOREO ACTIVO EN LA ZONA DE ESTUDIO Y VARIABLES METEOROLÓGICAS DIARIAS.

Día	Mes	Año	Cprom diario de PM ₁₀ (µg/m ³) en 24 h	RR (mm)	dd ⁽⁰⁾	ff (m/s)
13	12	2006	46,46		65	0,86
14	12	2006	45,28		70	0,36
15	12	2006	36,70		180	0,22
16	12	2006	46,03		65	0,14
17	12	2006	26,76		50	0,58
18	12	2006	42,92	4,2	65	1,00
19	12	2006	121,64	1,6	35	1,63
20	12	2006	44,46	5,6	60	1,33
21	12	2006	45,33		65	1,22
22	12	2006	45,27		75	1,05
23	12	2006	45,11		80	0,53
24	12	2006	27,33		95	0,28
25	12	2006	37,82	30	130	0,86
26	12	2006	14,93	50,6	260	0,39
27	12	2006	128,40		30	0,86
9	1	2007	39,94	4,1	50	0,44
10	1	2007	117,27		38	1,69
11	1	2007	89,16		50	2,16
12	1	2007	47,67		60	2,22
13	1	2007	27,44		55	2,11

ANEXO 24

EJEMPLOS DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS GRAVIMÉTRICO, MUESTRA DIARIA EM UNO.

Días	Mes	Años	L1 (l)	L2 (l)	Vt (m³)	T (°C)	P (hP)	Vo (m³)	P1 (g)	P2 (g)	Cm PTS (µg/m³)	Cm PM₁₀ (µg/m³)
13	12	2006	2056,384	2059,383	2,999	24,70	1005,30	2,979	0,23842	0,23869	90,63	45,31
14	12	2006	2059,383	2062,335	2,952	26,40	1002,90	2,909	0,23842	0,23867	85,94	42,97
15	12	2006	2062,335	2065,215	2,880	27,30	1001,80	2,826	0,23839	0,23859	70,76	35,38
16	12	2006	2065,215	2068,170	2,955	25,90	1003,40	2,918	0,23845	0,23871	89,10	44,55
8	1	2007	2103,185	2105,975	2,790	26,40	1005,40	2,756	0,23839	0,23861	79,82	39,91
9	1	2007	2105,975	2108,845	2,870	21,30	1005,80	2,885	0,23839	0,23861	76,25	38,12
10	1	2007	2108,845	2111,795	2,950	21,00	1007,40	2,974	0,23839	0,23903	215,23	107,61
11	1	2007	2111,795	2114,655	2,860	23,20	1009,50	2,867	0,23839	0,23887	167,40	83,70
1	2	2008	2289,003	2291,919	2,916	25,20	1007,60	2,899	0,23839	0,23893	186,30	93,15
2	2	2008	2291,919	2294,860	2,941	20,60	1007,70	2,969	0,23850	0,23864	47,15	23,57
3	2	2008	2294,860	2297,759	2,899	25,10	1007,40	2,882	0,23845	0,23858	45,11	22,55
4	2	2008	2297,759	2300,747	2,988	26,20	1007,40	2,960	0,23845	0,23890	152,05	76,02
5	2	2008	2300,747	2303,546	2,799	23,60	1006,80	2,795	0,23845	0,23867	78,71	39,36

ANEXO 25

EJEMPLOS DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS GRAVIMÉTRICO, MUESTRA DIARIA EN LA EM DOS.

Días	Mes	Años	L1 (L)	L2 (L)	Vt (m³)	T (°C)	P (hP)	Vo (m³)	P1 (g)	P2 (g)	Cm PTS (µg/m³)	Cm PM₁₀ (µg/m³)
13	12	2006	1036,780	1039,740	2,940	24,70	1005,30	2,940	0,23839	0,23867	95,22	47,61
14	12	2006	1039,740	1042,619	2,837	26,40	1002,90	2,837	0,23839	0,23866	95,17	47,59
15	12	2006	1042,619	1045,567	2,893	27,30	1001,80	2,893	0,23845	0,23867	76,04	38,02
16	12	2006	1045,567	1048,551	2,947	25,90	1003,40	2,947	0,23845	0,23873	95,02	47,51
8	1	2007	1083,704	1086,517	2,779	26,40	1005,40	2,779	0,23845	0,23870	89,97	44,98
9	1	2007	1086,517	1089,495	2,994	21,30	1005,80	2,994	0,23845	0,23870	83,50	41,75
10	1	2007	1089,495	1092,426	2,954	21,00	1007,40	2,954	0,23845	0,23920	253,85	126,93
11	1	2007	1092,426	1095,272	2,853	23,20	1009,50	2,853	0,23845	0,23899	189,25	94,62
1	2	2008	1577,966	1580,770	2,787	25,20	1007,60	2,787	0,23839	0,23893	193,74	96,87
2	2	2008	1580,770	1583,646	2,904	20,60	1007,70	2,904	0,23839	0,23857	61,99	30,99
3	2	2008	1583,646	1586,556	2,893	25,10	1007,40	2,893	0,23845	0,23862	58,76	29,38
4	2	2008	1586,556	1589,429	2,846	26,20	1007,40	2,846	0,23839	0,23889	175,71	87,85
5	2	2008	1589,429	1592,254	2,821	23,60	1006,80	2,821	0,23845	0,23870	88,62	44,31

ANEXO 26

EJEMPLOS DEL PORCENTAJE DE CONFIABILIDAD DE LOS PCA.

Fechas	% Confiabilidad del PCA para 7 días	% Confiabilidad del PCA para 3 días	% Confiabilidad del PCA para 1 día
19-12-06	65,77	82,21	90,43
27-12-06	90,97	81,78	85,67
10-01-07	72,09	93,80	89,54
11-01-07	65,41	95,33	89,73
16-02-07	84,78	92,10	92,10
19-02-07	66,06	93,58	93,58
20-02-07	78,08	84,40	84,40
17-12-07	92,36	96,20	96,20
18-12-07	80,20	93,56	89,11
19-12-07	90,96	77,88	77,88
20-12-07	58,44	82,79	82,79
15-01-08	85,35	85,35	85,35
18-01-08	73,29	92,16	92,16
21-01-08	58,99	88,49	88,49
22-01-08	87,90	89,68	89,68
25-01-08	78,45	78,45	86,29
01-02-08	84,22	84,20	84,20
04-02-08	65,75	91,53	91,53
Promedio	74,17	87,52	88,32
Máximo	92,36	99,45	99,45
Mínimo	47,97	77,88	77,88
DESVEST	11,74	6,17	4,85

ANEXO 27

EJEMPLOS DE LOS VALORES DE LA DISCREPANCIA PARA LOS PCA.

Fechas	Cm diaria de PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (EMA1)	Cm diaria de PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (EMA2)	RECM ($\mu\text{m}/\text{m}^3$) para PCA con siete días antes ECCA	RECM ($\mu\text{m}/\text{m}^3$) para PCA con tres días antes ECCA	RECM ($\mu\text{m}/\text{m}^3$) para PCA con un día antes ECCA
19-12-06	108,60	135,70	43,69	25,36	17,61
27-12-06	116,25	141,50	16,73	26,32	21,99
10-01-07	107,30	127,50	34,12	12,09	15,61
11-01-07	83,10	93,90	31,32	6,87	10,67
16-02-07	116,85	142,30	23,26	16,00	16,00
19-02-07	85,60	95,10	31,26	7,79	7,79
20-02-07	102,10	110,70	23,85	17,29	17,29
17-12-07	117,25	142,50	16,04	13,52	13,52
18-12-07	106,60	117,80	22,86	8,98	13,34
15-01-08	102,55	108,65	15,65	15,65	15,65
18-01-08	81,05	91,50	23,85	8,79	8,79
21-01-08	95,00	108,90	42,26	13,53	13,53
22-01-08	85,60	92,70	11,44	9,96	9,96
25-01-08	114,90	139,70	30,38	30,38	21,75
Promedio	104,38	122,15	30,76	17,71	16,76
Máximo	117,30	145,20	66,27	31,09	31,09
Mínimo	77,3	87,7	11,44	6,87	7,79
DESVEST	13,29	21,03	13,07	7,80	6,02

ANEXO 28

EJEMPLOS DE LA EFECTIVIDAD DEL PCA CON UN DÍA DE ANTELACIÓN AL ECCA.

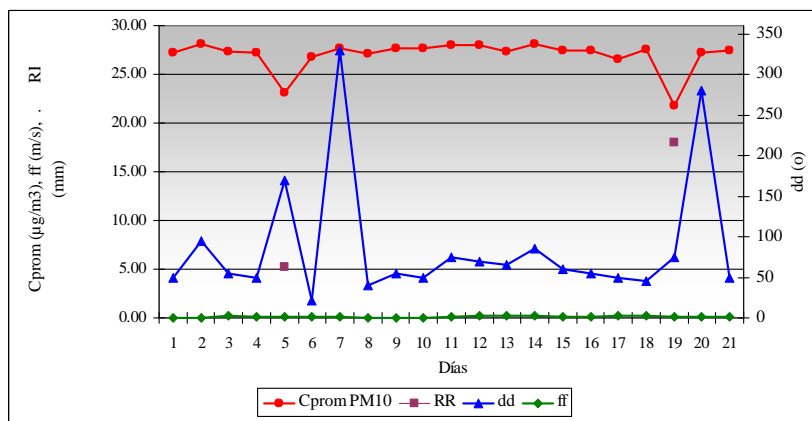
Nro	Fechas	Nivel del aviso del ECCA a ocurrir	Nivel del ECCA acontecido	Nivel del ECCA que pudo haber ocurrido	Efectividad (%)	Efectividad (Cualitativa)
1	19/12/2006	Atención	Atención*		100	Alta
2	26/12/2006	Atención		Atención**	100	Alta
3	27/12/2006	Atención	Atención*		100	Alta
4	10/01/2007	Atención	Atención*		100	Alta
5	11/01/2007				100	Alta
6	16/02/2007	Atención	Atención*		100	Alta
7	17/02/2007	Atención		Atención**	100	Alta
8	18/02/2007	Atención		Atención**	100	Alta
9	19/02/2007				100	Alta
10	20/02/2007		Atención*		50	Baja
11	17/12/2007	Atención	Atención*		100	Alta
12	18/12/2007	Atención	Atención*		100	Alta
13	19/12/2007	Atención	Atención*		100	Alta
14	20/12/2007		Atención*		50	Baja
15	15/01/2008		Atención*		50	Baja
16	18/01/2008				100	Alta
17	20/01/2008	Atención		Atención**	100	Alta
18	21/01/2008		Atención*		50	Baja

Simbología

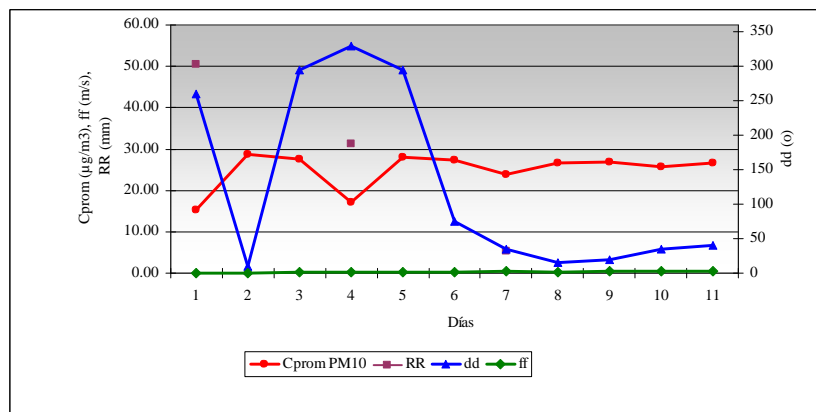
***No ocurrió el ECCA, **Se evitó el ECCA, *Ocurrió el ECCA.

ANEXO 29

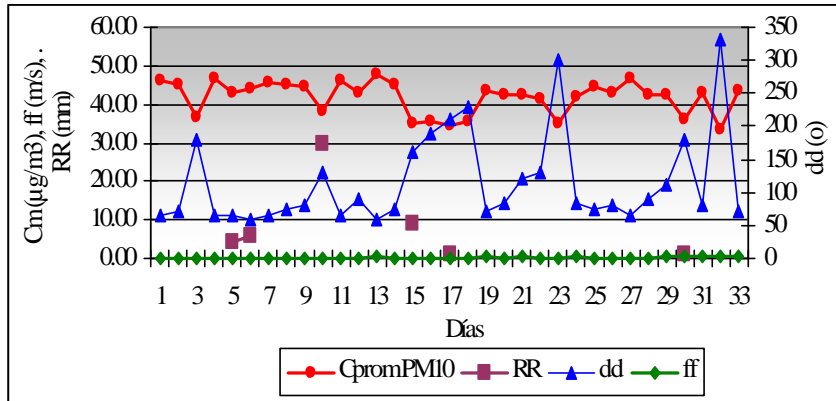
COMPORTAMIENTO DEL PM₁₀ CON LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS.



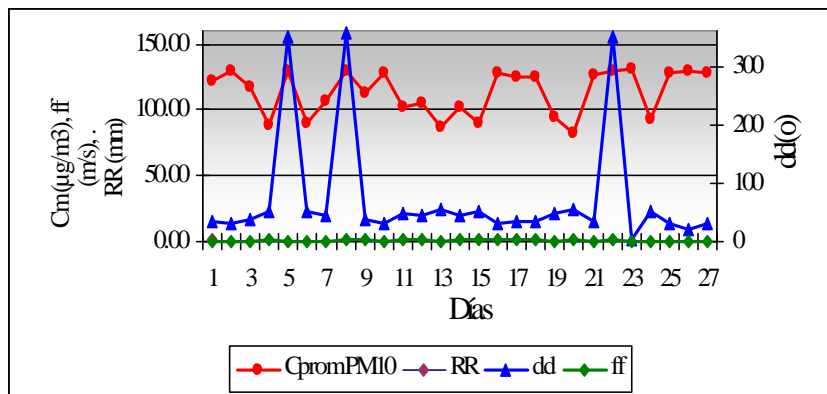
Días inactivos.



Días inactivos desfavorables



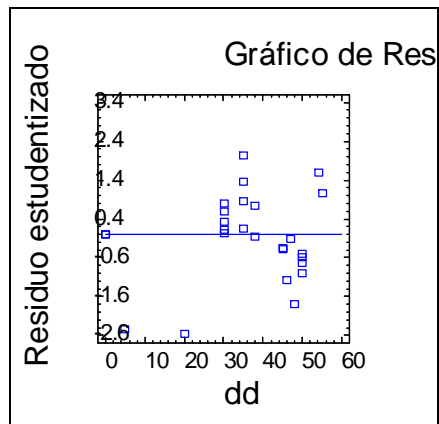
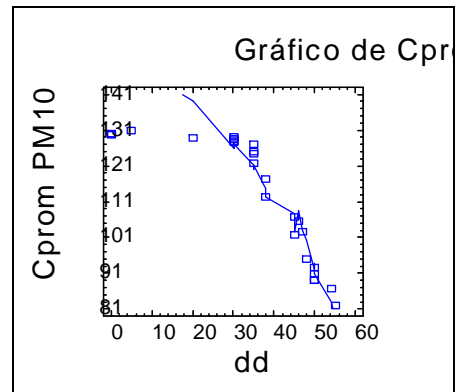
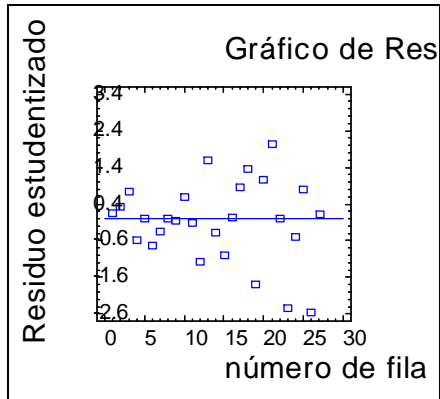
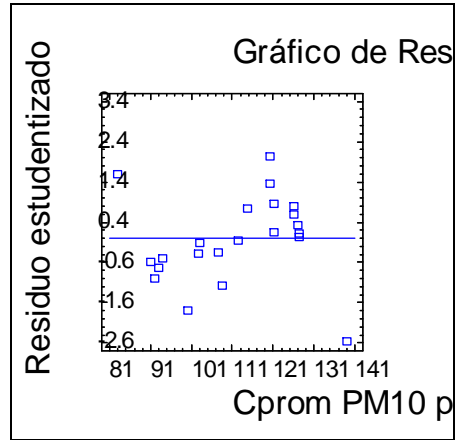
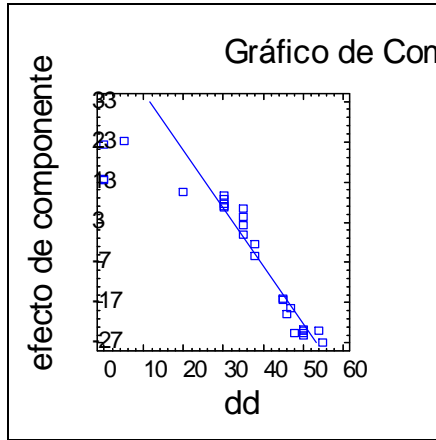
Días inactivos favorables



Días inactivos desfavorables

ANEXO 30

ESTADÍSTICOS DE LAS PM₁₀.



ANOVA adicional para variables en el orden de ajuste.

Análisis de Varianza					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
dd	225764,0	1	225764,0	445,73	0,0000
E	12220,1	1	12220,1	24,13	0,0001
ff	15,2702	1	15,2702	0,03	0,8637
Modelo	238000,0	3			

Intervalos de confianza.

Parámetro	Error		Estadístico	
	Estimación	Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
CONSTANTE	137,266	8,96128	118,728	155,804
dd	-1,43731	0,0948955	-1,63362	-1,24101
E	4,20833	0,856711	2,43609	5,98058
ff	0,203646	1,17286	-2,2226	2,62989

ANEXO 31

EJEMPLOS DEL PORCENTAJE DE CONFIABILIDAD DE LA APLICACIÓN DEL MODELO DE PRONÓSTICO DE LA Cprom. PM₁₀, CON 24 HORAS DE ANTELACIÓN A LA OCURRENCIA DE ECCA.

Modelo, ecuación 3.6, Epígrafe 3.10

Nro.	Fechas	Confiabilidad (%)
1	08/01/2009	88,89
2	13/01/2009	95,83
3	14/01/2009	75,00
4	01/01/2010	95,65
7	26/01/2011	95,45
8	11/02/2011	83,33
9	21/12/2012	87,50
10	26/12/2012	86,96
11	29/12/2012	75,00
% confiabilidad 90		48,00
% confiabilidad 80		74,00
Promedio		87,00
Máximo		100,00
Mínimo		63,33

ANEXO 32

ECCA EVITADOS CON LA APLICACIÓN DE LOS PCA Y LAS ACCIONES IMPLEMENTADAS EN LA PLANTA DE ZEOLITA.

Años de aplicación	Meses del periodo poco lluvioso					
de los PCA	Enero	Febrero	Marzo	Noviembre	Diciembre	Total
2006				2	4	6
2007	3	5				8
2008	4	3	1	4	4	16
2009	4	3				7
2010	2	3		3	3	11
2011	1	1		4	1	7
2012	2	2		1	4	9
Total	16	17	1	14	16	64

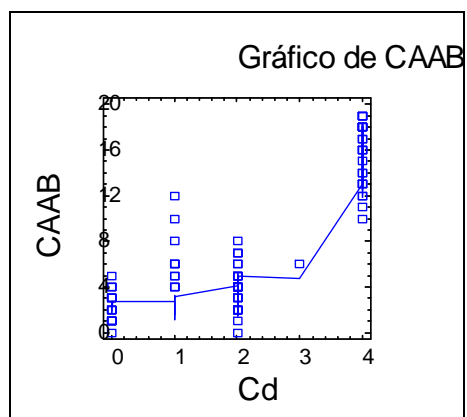
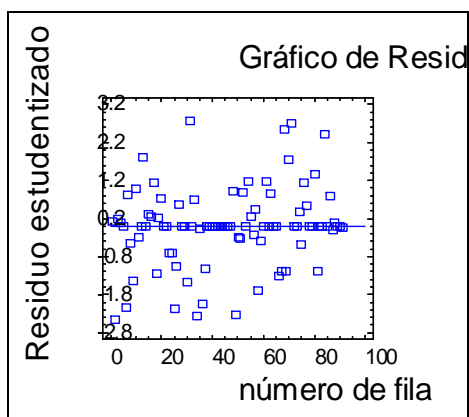
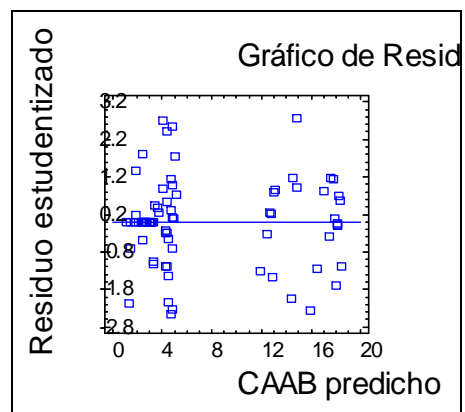
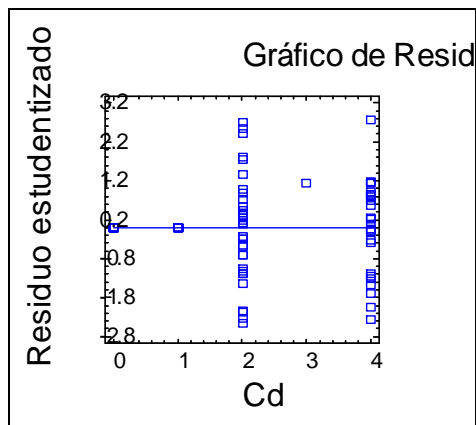
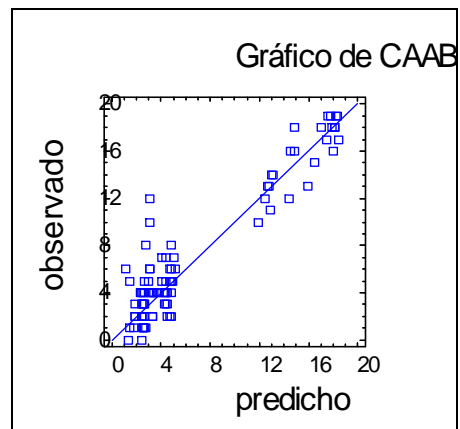
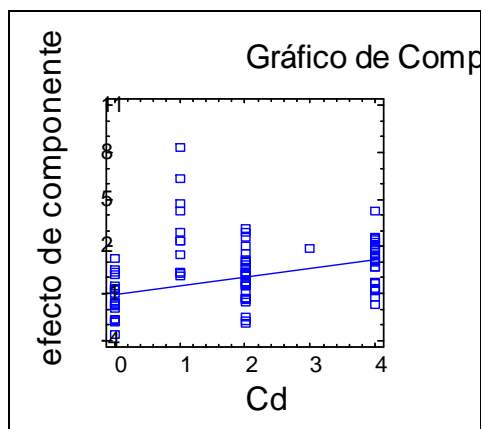
ANEXO 33

EJEMPLOS DE LAS CAAB OCURRIDAS EN EL PERIODO DE MONITOREO.

Días	Mes	Año	CAAB	Días	Mes	Año	CAAB
13	12	2006	5	17	12	2007	19
14	12	2006	2	18	12	2007	13
15	12	2006	2	19	12	2007	18
16	12	2006	5	20	12	2007	12
17	12	2006	2	21	12	2007	2
18	12	2006	2	22	12	2007	0
19	12	2006	18	23	12	2007	2
20	12	2006	4	24	12	2007	3
21	12	2006	3	25	12	2007	2
22	12	2006	6	26	12	2007	1
23	12	2006	4	27	12	2007	1
24	12	2006	4	28	12	2007	3
25	12	2006	4	29	12	2007	1
26	12	2006	6	30	12	2007	1
27	12	2006	19	31	12	2007	3
9	1	2007	6	17	1	2008	4
10	1	2007	15	18	1	2008	12
11	1	2007	13	19	1	2008	5
12	1	2007	6	20	1	2008	5
13	1	2007	1	21	1	2008	16
14	1	2007	2	22	1	2008	13
15	1	2007	4	23	1	2008	4
13	2	2007	1	24	1	2008	4
14	2	2007	0	25	1	2008	16

ANEXO 34

ESTADÍSTICOS DE ANÁLISIS DE LAS CAAB.



Intervalos de confianza.

Parámetro	Error		Estadístico	
	Estimación	Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
CONSTANTE	-1,39254	1,21493	-3,82939	1,04431
Cd	0,563047	0,66478	-0,770336	1,89643
Cprom. PM ₁₀	0,145496	0,0173256	0,110745	0,180247
dd	-0,000666436	0,00250894	-0,00569875	0,00436587
E	-0,1901	0,0700742	-0,330651	-0,0495483
ff	0,029271	0,305276	-0,583036	0,641578

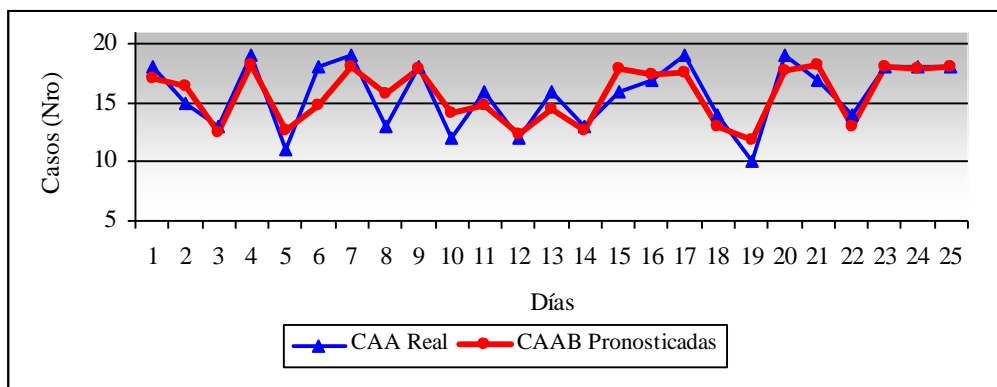
ANOVA adicional para variables en el orden de ajuste.

Fuente	Análisis de Varianza				
	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Cd	17297,9	1	17297,9	935,04	0,0000
Cprom. PM ₁₀	1379,59	1	1379,59	74,57	0,0000
dd	21,0267	1	21,0267	1,14	0,2912
E	137,733	1	137,733	7,45	0,0086
ff	0,170079	1	0,170079	0,01	0,9240
Modelo	18836,4	5			

Análisis de Varianza del modelo. ANOVA.

Fuente	Análisis de Varianza				
	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	18836,4	5	3767,28	203,64	0,0000
Residuo	980,476	53	18,4995		
Total (Corr.)	19816,9	58			

Comportamiento del pronóstico de las CAAB para los DAD con la aplicación del modelo.



ANEXO 35

GRÁFICO DEL PERFIL DEL VAN Y CÁLCULO DEL PRD.

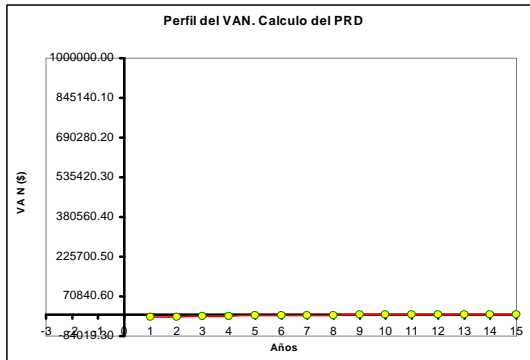


Figura 1. Ciclón corto convencional.

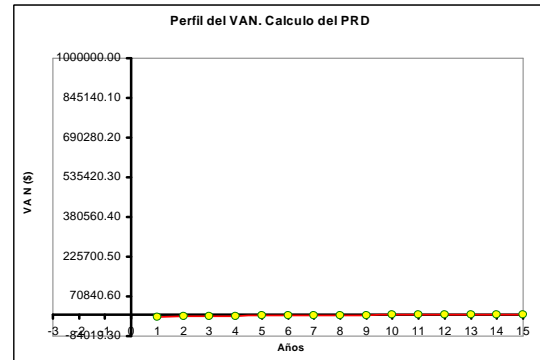


Figura 2. Ciclón largo convencional.

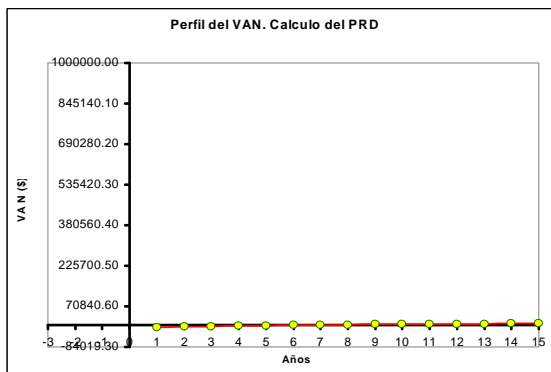


Figura 3. Ciclones largos convencionales instalados en paralelo (tres).

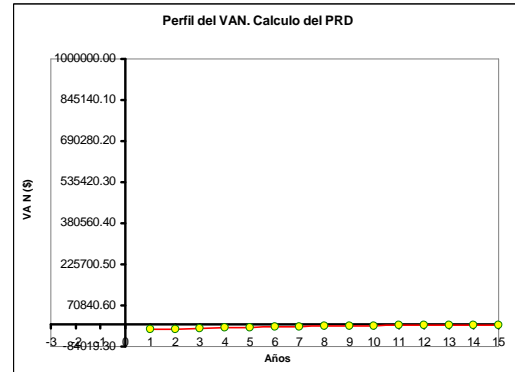


Figura 4. Ciclones cortos convencionales instalados en serie (dos).

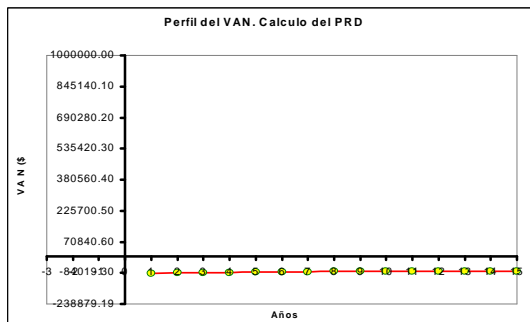


Figura 5. Secador rotatorio.

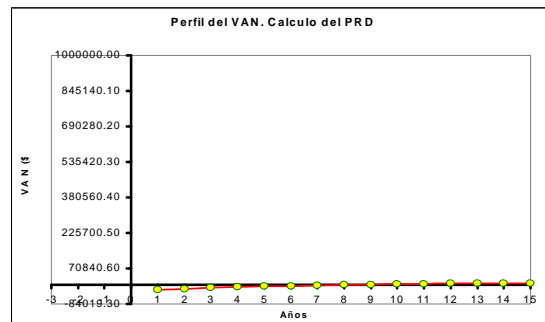


Figura 6. Ciclón corto convencional y filtros de mangas.

Tabla 1. Comparación del costo del impacto ambiental ahorrado por cada equipo de control de la emisión del PM₁₀, en MT.

Equipos de control de la emisión de PM₁₀	Reducción de ECCA con la instalación de equipos de control de PM₁₀ (días/año)	Costo de las CAAB cada día de ECCA (MT)	Promedio de pacientes con CAAB en días con ECCA	Total de casos de CAAB evitados por la no ocurrencia de ECCA	Costo del impacto ambiental ahorrado por la no ocurrencia del ECCA (MT)
Ciclón corto convencional	22	7,84	12,53	276	2 163,84
Ciclón largo convencional	17	7,84	12,53	213	1 669,92
Ciclón largo convencionales instalados en paralelo (tres)	32	7,84	12,53	401	3 143,84
Ciclón corto convencionales instalados en series (dos)	41	7,84	12,53	514	4 029,76
Ciclón corto convencional (dos en serie) y filtro de mangas	60	7,84	12,53	752	5 895,68
Secador rotatorio	30	7,84	12,53	451	3 535,84