

Modelado CALPUFF-WRF de la dispersión de PM_x, NO_x y SO₂ emitidos por la Termoeléctrica de Miraflores en el Canal de Panamá

Modeling CALPUFF-WRF of the dispersion of PM_x, NO_x and SO₂ emitted by the Thermoelectric of Miraflores in the Panama Canal

Ricardo De León Ortega ^{1*}, José Fábrega ¹

¹Programa de Doctorado en Ingeniería de Proyectos, Universidad Tecnológica de Panamá, ¹Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas, Universidad Tecnológica de Panamá

¹ricardo.leon2@utp.ac.pa, ¹jose.fabrega@utp.ac.pa

Resumen– En esta primera etapa de la investigación se modeló la dispersión y el transporte de material particulado, óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre emitidos por la Planta Termoeléctrica de Miraflores. Se escogió el modelo CALPUFF por ser el recomendado por la EPA para recorridos mayores de 50 km y donde se presentan cambios de cobertura: agua, suelo. Este modelo, además de ser complejo, requiere el uso de datos continuos en tiempo y espacio para generar resultados válidos. A falta de una cobertura total en estaciones meteorológicas superficiales, recurrimos al uso del modelo meteorológico WRF con el cual se pudo simular el campo de vientos tridimensional para un dominio de 50x50km² con resolución de 4x4km². Los resultados obtenidos que se presentan en este artículo muestran los puntos de mayor concentración promedio de 1h de contaminantes, cuyos valores aplicando la metodología EPA para Puerto Rico como referencia, arrojan buenos índices de calidad del aire.

Palabras claves– Modelado atmosférico, dispersión, CALPUFF, WRF, termoeléctrica de Miraflores, Canal de Panamá.

Abstract– In this first stage of the research the dispersion and transport of particulated material, nitrogen oxides and sulfur dioxide emitted by the Miraflores Thermoelectric Plant were modeled. The CALPUFF model was chosen because it is recommended by the EPA for routes over 50 km and where changes in coverage are presented: water, soil. This model, besides being complex, requires the use of continuous data in time and space to generate valid results. In the absence of total coverage in surface meteorological stations, we used the WRF meteorological model with which the three-dimensional wind field could be simulated for a 50x50km² domain with 4x4km² resolution. The results obtained in this article show the points with the highest average concentration of 1h of pollutants, whose values applying the EPA methodology for Puerto Rico as a reference, yield good air quality.

Keywords– Atmospheric modeling, dispersion, CALPUFF, WRF, thermoelectric power plant in Miraflores, Panama Canal.

Tipo de Artículo: Original

Fecha de Recepción: 27 de febrero de 2017

Fecha de Aceptación: 25 de septiembre de 2017

1. Introducción

La mayoría de las actividades humanas y los procesos naturales producen contaminantes al aire, no todos problemáticos, sin embargo, algunas formas se estiman estar relacionadas con muertes prematuras en todo el mundo [1]. La concentración en la cual un contaminante atmosférico alcanza a la población depende directamente de cuán disperso esté el mismo en el aire. El modelado de dispersión es una técnica poderosa para evaluar si una fuente emisora de

contaminantes atmosféricos representa o no un problema. Históricamente el modelado de dispersión ha sido campo para meteorólogos, sin embargo, en la actualidad es una herramienta importante en estudios académicos de calidad de aire y en la práctica profesional de ingenieros ambientales. La aproximación basada en clases de estabilidad atmosférica de los modelos de dispersión utilizados en el pasado, ha sido reemplazada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de

América (EPA) por modelos numéricos que requieren de la parametrización continua de las variables, meteorológicas y de emisión, relacionadas con la dispersión atmosférica. Esto conlleva, un método semi-empírico donde las ecuaciones matemáticas de la dispersión se calibran con observaciones para que el modelo genere resultados. En esta investigación se utilizó el modelo de dispersión de licencia libre más reciente aprobado por la EPA: CALPUFF v.5.8.5 [2]. Es un modelo gaussiano de dispersión de contaminantes en forma de nubes (*puff*), cuya primera versión fue desarrollada a finales de los 80's [3]. El objetivo fue modelar la dispersión y el transporte de material particulado (PM_x), óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de azufre (SO₂) que son los contaminantes típicos de la combustión fósil. Se escogió como fuente fija la Planta Termoelectrónica de Miraflores del Canal de Panamá, dada la importancia relevante del área utilizada para múltiples actividades donde convergen residentes y visitantes tanto nacionales como extranjeros. Este tipo de trabajo no ha sido realizado en el Canal de Panamá y se espera que las concentraciones de contaminantes atmosféricos calculadas por CALPUFF, a partir de las emisiones medidas, sirvan de referencia para una gestión ambiental en el área y el buen funcionamiento de la Planta. CALPUFF requiere un modelo meteorológico CALMET, la caracterización de la fuente de emisión para calcular la dispersión y el transporte con CALPUFF y finalmente, el cálculo de concentraciones en la zona de estudio con CALPOST.

2. Caracterización de la Planta Termoelectrónica de Miraflores como fuente fija de emisión

La Planta Termoelectrónica de Miraflores, ubicada a un costado de las esclusas del mismo nombre a la entrada Pacífica del Canal de Panamá, inicia en 1925 como Planta de Generación Eléctrica con la instalación de máquinas de pistones en el edificio donde operaba una subestación desde 1914, cuando el Canal de Panamá inició sus operaciones [4].

Al momento de esta investigación, la misma contaba con 8 motores (ver tabla 1), unos a diésel y otros a búnker, de los cuales se contaba con el informe de emisiones de los motores 6, 7 y 8 medidas en febrero de 2012 (ver tabla 3). El informe de 2013 estaba bajo revisión aún.

Las unidades 6, 7 y 8 pertenecen a un motor de combustión interna que utiliza búnker para su operación y diésel para el arranque y parada de la unidad [5].

La ubicación geográfica de las chimeneas de estos motores se muestra en la figura 1 y en la tabla 2 [6].

Tabla 1. Motores operativos en la Planta Termoelectrónica de Miraflores al momento de la investigación

Unidad	Tipo de Máquina	Combustible	P en MW	Condición
1	Turbina de gas	Diésel	9	No operativa
2	Turbina de gas	Diésel	9	No operativa
3	Turbina de vapor	Búnker	22	Fuera de servicio por averías
4	Turbina de vapor	Búnker	24	Fuera de servicio por averías
5	Turbina de gas	Diésel	18	No operativa
6	Motor de combustión interna	Búnker	18	Operativa
7	Motor de combustión interna	Búnker	18	Operativa
8	Motor de combustión interna	Búnker	18	Operativa



Figura 1. Localización de las chimeneas de los motores 6, 7 y 8 de la Planta Termoelectrónica de Miraflores. Imagen de Google Earth.

Tabla 2. Coordenadas UTM WGS84 de las chimeneas de los motores 6, 7 y 8 de la Planta Termoeléctrica de Miraflores

Unidad	Latitud Y en m Norte	Longitud X en m Este
6	995 209	654 899
7	995 193	654 888
8	995 190	654 899

Tabla 3. Emisiones de PMx, NOx y SO₂ en los motores 6, 7 y 8 de la Planta Termoeléctrica de Miraflores medidas del 27 al 29 de febrero de 2012

Unidad	Caudal Medido (Nm ³ /s)	Concentración Medida (mg/Nm ³)		
		PMx	NOx	SO ₂
6	67.6044	30.44	85.25	435.89
7	59.4391	56.34	70.66	376.62
8	54.5018	40.46	75.56	375.00
Emisión ponderada (mg/Nm ³)		41.91	77.54	398.15
Emisión ponderada (ton/día)		0.20	0.39	2.06
Emisión ponderada (ton/año)		79.83	147.21	755.80
Método de medición		EPA Método 5	EPA Método 7	EPA Método 6

Tabla 4. Datos de la Chimenea Equivalente como Fuente Fija de Emisión para el Modelado CALPUFF

Unidad	Diámetro interior (m)	Altura (m)	Velocidad del gas (m/s)	T (K)
6	1.61	-----	33.2073	621.73
7		-----	29.1965	596.40
8		-----	26.7713	597.82
Equivalente	1.61	30*	29.72	605.32
Latitud, m	995 199.5			
Longitud, m	654 895.7			
Elevación, m	19.60**			

*estimación in situ, de la base respecto al NMM.

**valor calculado por el programa CALPUFF utilizando el Modelo Digital del Terreno.

Para la modelación CALPUFF [7] se reemplazaron las tres chimeneas por una sola equivalente cuya posición se calculó en el centroide del triángulo formado por las chimeneas 6, 7 y 8. Esta chimenea equivalente tiene la misma configuración geométrica de

las chimeneas originales. Altura de 30 m y diámetro interno de 1.61 m. La emisión, calculada a partir de las concentraciones medidas, será la ponderada de los tres motores de acuerdo a lo establecido en el Decreto Ejecutivo No.5 de 4 de febrero de 2009, "Por el cual se dictan normas ambientales de emisiones de fuentes fijas" [6]. El factor de ponderación para cada motor será igual a su caudal medido entre el caudal total emitido por los tres motores. La suma de los productos de cada factor de ponderación por la concentración medida del contaminante dará como resultado su emisión ponderada.

3. Modelado Meteorológico CALMET

3.1 Datos de Entrada

El modelo WRF (*Weather Research and Forecasting Model*) [8] es un sistema numérico de última generación para la predicción del clima a mesoescala (de 10 Km hasta cientos de km) que puede generar simulaciones atmosféricas utilizando datos reales (observaciones o análisis) o condiciones idealizadas.

Para la investigación se escogió un dominio de 50x50 km², cuyo centro se ubicó aproximadamente en el centro del Canal de Panamá (9°06'44"N, 79°45'55"W, WGS84) con un cuadrículado de 4x4 Km², 35 niveles verticales con el nivel más bajo a 20 m del suelo. El modelo WRF generó, a partir de datos reales (medidos y de análisis) una meteorología simulada tridimensional para el dominio de estudio, correspondiente al año 2014, del 1 de enero a las 0:00 h hasta el 31 de diciembre a las 23:00 h. (ver figura 2).



Figura 2. Dominio para el modelo meteorológico WRF.

Este modelo meteorológico tridimensional se georeferenció a una cuadrícula de mayor resolución que contenía el uso y la cobertura del suelo, además de la

configuración del terreno. Como Modelo Digital del Terreno se utilizó el SRTM1 (*Shuttle Radar Topography Mission Global Coverage*) Versión 3, cuya precisión es de 30 m (aproximadamente 1") [9]. Este modelo contiene información sobre las elevaciones utilizando el WGS84 como referencia geodésica con una cobertura global entre 56° de Latitud Sur a 60° de Latitud Norte (ver figura 3).

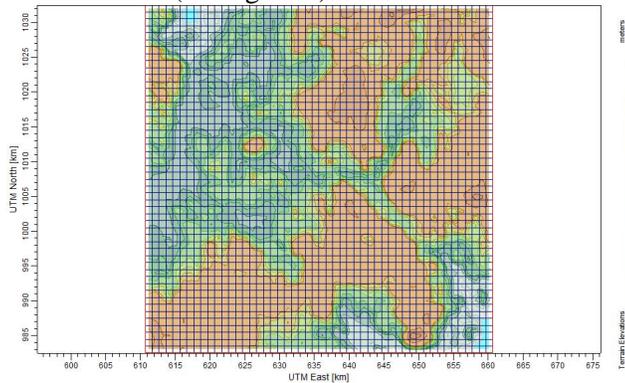


Figura 3. Modelo del Terreno extraído del SRTM1 para el dominio de estudio en una cuadrícula de 1x1 km² de resolución espacial.

Para el uso del suelo y cobertura se utilizó el GLCC (*Global Land Cover Characterization*) [10], específicamente los datos de Uso del Suelo y Cobertura para América del Norte. Este modelo de uso del suelo y cobertura global tiene una resolución de 1 km (30" aproximadamente), la información contenida fue obtenida por la unidad de ciencias de la Tierra y sensorado remoto (*Earth Science and Remote Sensing Unit, ESRS*) de la NASA (Agencia Espacial de los Estados Unidos de América) y utiliza la proyección Lambert Equiárea Azimutal como referencia cartográfica (ver figura 4).

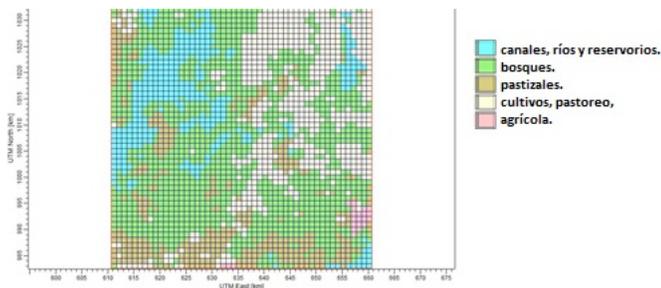


Figura 4. Modelo de uso del suelo y cobertura extraído del GLCC para el dominio de estudio en la cuadrícula de 1x1 km² de resolución espacial.

3.2 Procesado y Resultados

Con los datos de entrada geodésicos (modelo digital del terreno, uso del suelo y cobertura) y los datos del modelo WRF postprocesados para que fueran compatibles con CALMET [11], se especificó una cuadrícula de 1x1 km² para generar el campo de vientos tridimensional que se ajuste a la forma del terreno y al tipo de cobertura. Los resultados del procesado CALMET se muestran en las figuras 5 y 6.

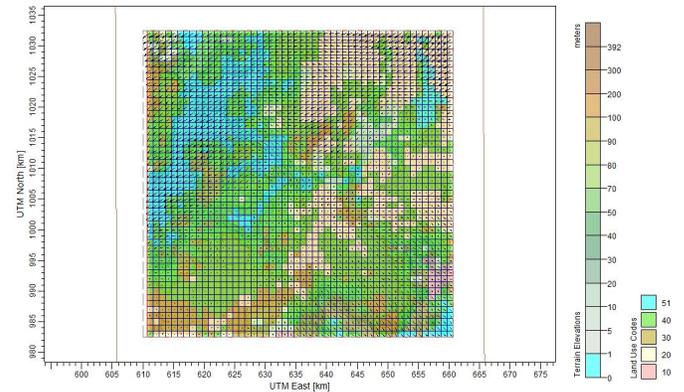


Figura 5. Modelo Meteorológico CALMET donde se muestra la dirección del viento en cada celda para el dominio de estudio en una cuadrícula de 1x1 km² de resolución espacial.

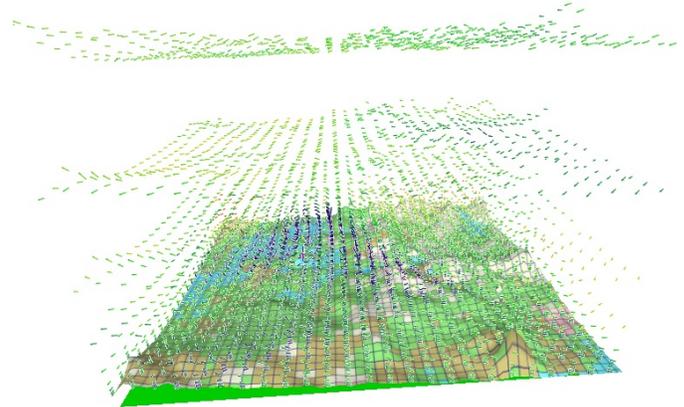


Figura 6. Modelo Meteorológico CALMET muestra la variación tridimensional de los vientos tanto en dirección como en velocidad, entre otras variables meteorológicas.

4. Modelado de dispersión CALPUFF

4.1 Área de Muestreo y cuadrícula discreta

Adicional al campo de vientos tridimensional generado por CALMET, el programa permite escoger un área de muestreo y análisis menor al dominio de estudio, para evitar errores de borde y demorar menos los cálculos de CALPUFF.

Para ello, CALPUFF pidió el rango de pixeles a considerar en las direcciones X e Y. El dominio total fue de 50 pixeles de 1x1 km² en cada dirección, se le indicó al programa que considerara como cuadrícula de muestreo del 2 al 50 en ambas direcciones. Una vez definida la cuadrícula de muestreo, ésta se transformó a una red de puntos llamados receptores. Para ello, CALPUFF calculó las coordenadas del centro de cada pixel transformando la cuadrícula a discreta.

4.2 Fuente de Emisión de Contaminantes a modelar

Como fuente puntual fija se escogió la chimenea equivalente a los motores 6, 7 y 8. El programa CALPUFF requiere como datos de entrada: las coordenadas de la chimenea equivalente, la elevación de la base respecto al Nivel Medio del Mar (NMM), la altura de la chimenea, la temperatura promedio del gas en la chimenea en Kelvin, el diámetro interior en m y la velocidad del gas en la salida de la chimenea en m/s.

4.3 Contaminantes a modelar

Finalmente, se escogieron las especies a modelar: PMx, NOx, SO₂ y se introdujeron las emisiones estimadas en ton/año a partir de las concentraciones medidas de los contaminantes en los gases de salida, suministradas por la ACP en el Informe de Ensayo de Emisiones de 2012. Debido a que la medición se realiza una vez al año con los motores trabajando a la potencia recomendada por el fabricante (17 MW), la emisión de contaminantes se consideró constante para el modelado.

4.4 Procesado y resultados

Se corrió CALPUFF con los parámetros recomendados en defecto. En estos receptores, el programa calculó las concentraciones y los flujos de deposición horarios de cada contaminante modelado.

Para esta investigación fue de interés solo las concentraciones calculadas a nivel de terreno.

5. Procesado y resultados CALPOST

CALPOST es el tercer componente modelador de CALPUFF, el cual calculó la concentración promedio a nivel de terreno y el flujo de deposición promedio de cada contaminante modelado para periodos específicos de tiempo (1 h, 3 h, 24 h, 1 año), a partir de los resultados CALPUFF (ver tabla 5). Igualmente, determinó en qué receptores se dan las concentraciones

promedios más altas para cada contaminante y en qué momento (ver tabla 6). CALPOST arrojó los resultados en tablas y gráficos (ver figuras 7 a 10) con el visor CALPUFF View v 8.4.0 de *Lakes Environmental Software*.

Tabla 5. Concentraciones máximas calculadas por CALPUFF para la dispersión y transporte de PMx, NOx y SO₂ emitidos por la Planta Termoeléctrica de Miraflores para el año 2014

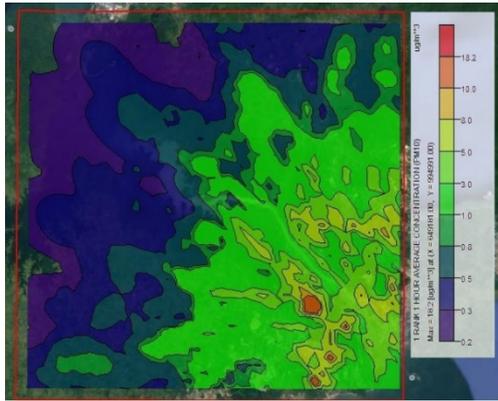
Periodo	Concentración máxima (µg/Nm ³)			Momento y lugar	
	PMx	NOx	SO ₂	Día Hora	Y (m, N) X (m, E)
1h	18.186	33.097	169.950	12/oct 4:00	994 991 649 181
3h	6.948	12.648	64.948	12/oct 2:00	
24h	1.367	2.479	12.730	11/oct 23:00	
1 año	0.119	0.222	0.113	----	995 991 654 181

Tabla 6. Concentraciones máximas promedio en 1h calculadas por CALPUFF para la dispersión y transporte de PMx, NOx y SO₂ emitidos por la Planta Termoeléctrica de Miraflores para el año 2014 y su correspondiente Índice de Calidad de Aire calculado con los parámetros de la EPA

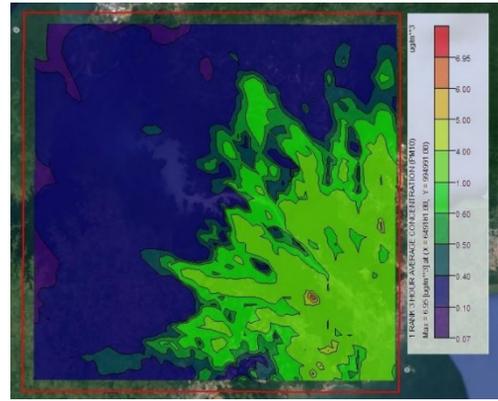
Contaminante Periodo	Concentración en µg/Nm ³ y ppb	AQI** (EPA)	Categoría Efecto a la salud	Personas en riesgo
PMx 1h	18.186 ----	17	Bueno Ninguno	Personas con enfermedades respiratorias.
NOx 1h	33.097 17.601*	16	Bueno Ninguno	Personas con asma u otra enfermedad respiratoria, los adultos mayores y niños.
SO ₂ 1h	169.950 64.959*	86	Moderado Ninguno	Personas con asma.

*Calculado con el convertidor de µg/Nm³ a ppb para gases.

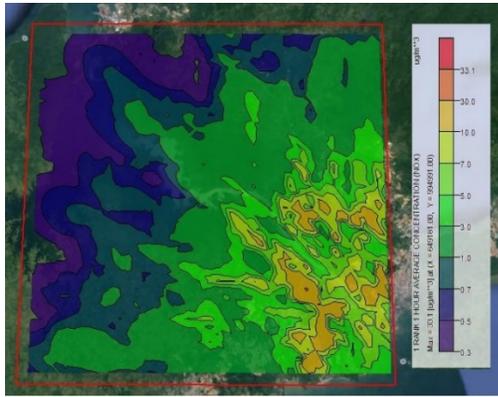
** Air Quality Index calculado a partir de las concentraciones en ppb para los gases y en µg/m³ para las PMx.



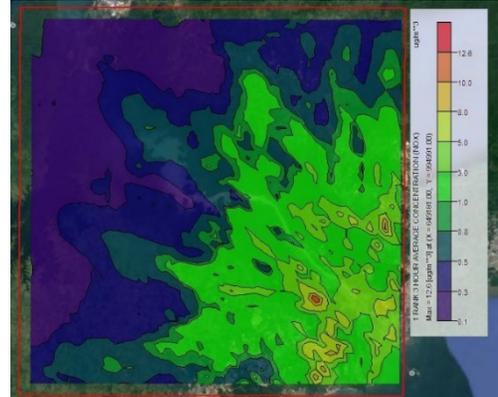
PMx



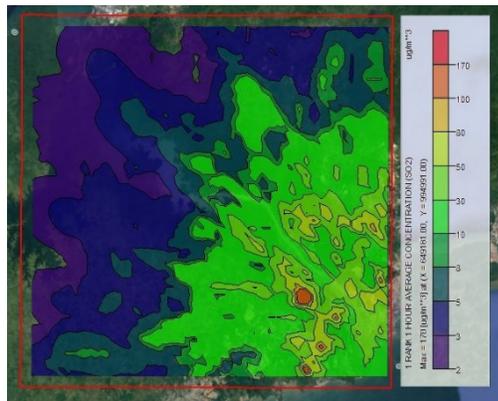
PMx



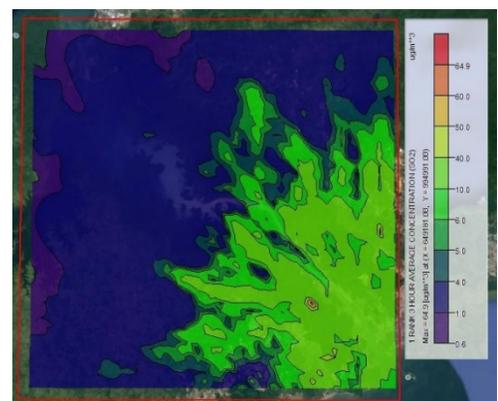
NOx



NOx



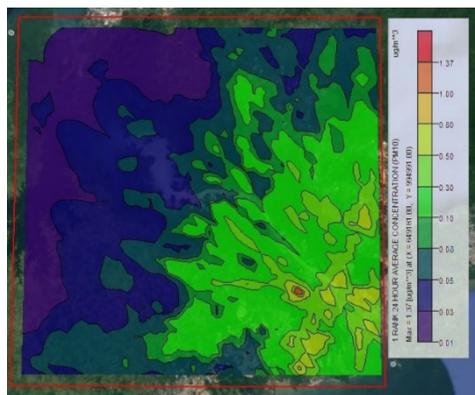
SO₂



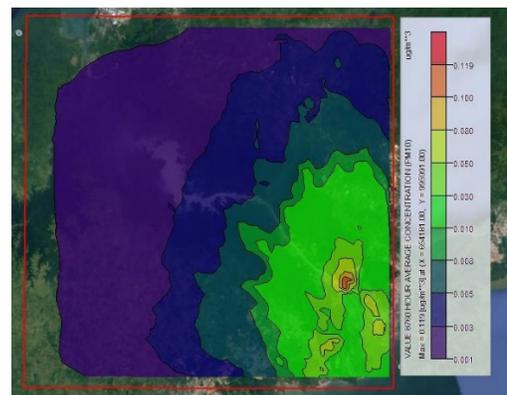
SO₂

Figura 7. Concentraciones promedio en 1h para PMx, NOx y SO₂ en el dominio de estudio en µg/Nm³. Gráficos de CALPUFF View v.8.4.0 montados sobre una imagen de Google Earth del área.

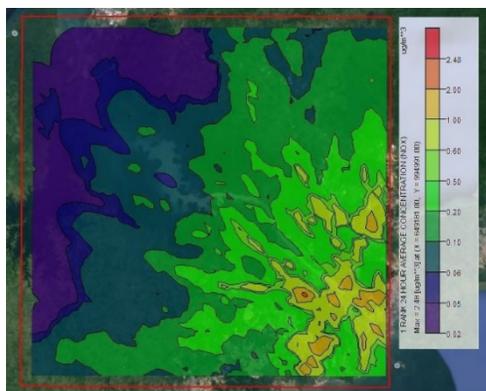
Figura 8. Concentraciones promedio en 3h para PMx, NOx y SO₂ en el dominio de estudio en µg/Nm³. Gráficos de CALPUFF View v.8.4.0 montados sobre una imagen de Google Earth del área.



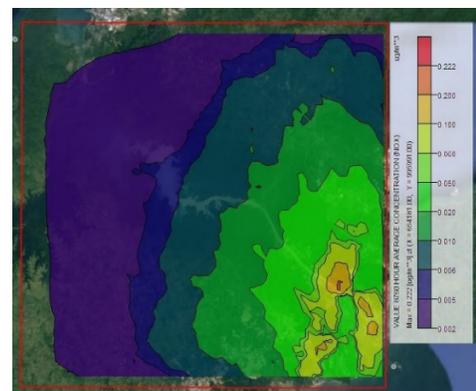
PMx



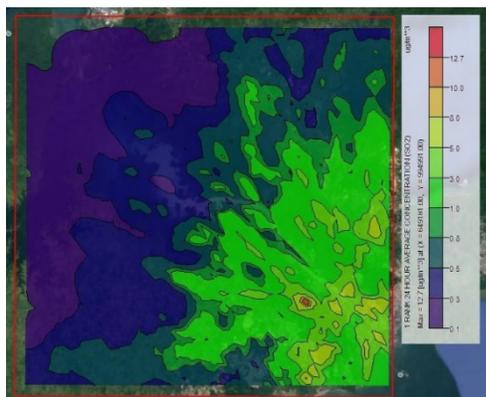
PMx



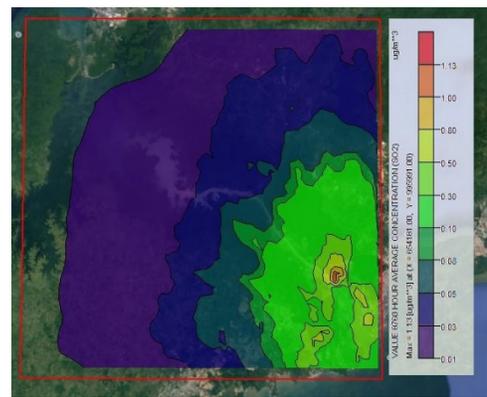
NOx



NOx



SO₂



SO₂

Figura 9. Concentraciones promedios en 24h para PMx, NOx y SO₂ en el dominio de estudio en µg/Nm³. Gráficos de CALPUFF View v.8.4.0 montados sobre una imagen de Google Earth del área.

Figura 10. Concentraciones promedios en 1 año para PMx, NOx y SO₂ en el dominio de estudio en µg/Nm³. Gráficos de CALPUFF View v.8.4.0 montados sobre una imagen de Google Earth del área.

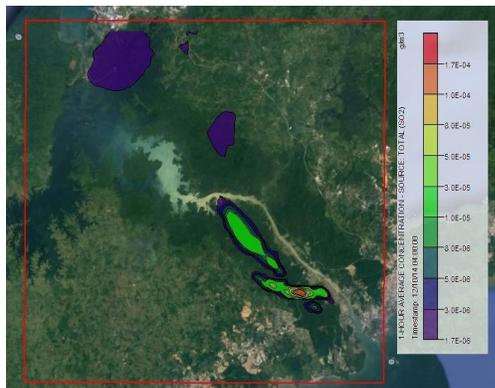


Figura 11. Pluma de dispersión de contaminantes provenientes de la Planta Termoelectrica de Miraflores en el momento de mayor concentración promedio de 1h: 12 de octubre de 2014 a las 4:00 h. Gráfico de CALPUFF View v.8.4.0 montado sobre una imagen de Google Earth del área.

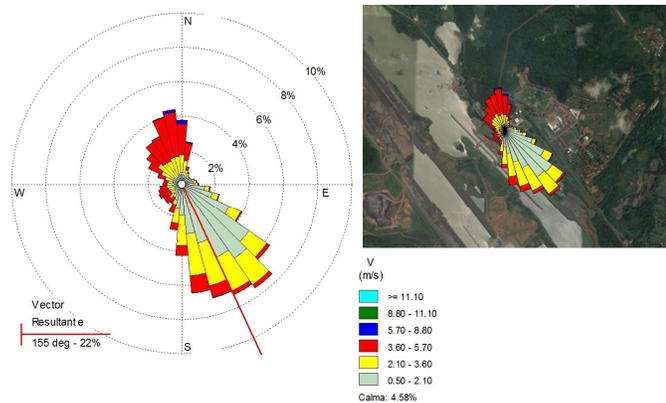


Figura 12. Rosa de los vientos localizada en Planta Termoelectrica de Miraflores. Muestra la distribución estadística de los vientos durante el año 2014. Gráfico de CALPUFF View v.8.4.0 montado sobre una imagen de Google Earth del área.

6. Resultados

Para los tres contaminantes modelados, el comportamiento de dispersión fue similar. Las concentraciones promedio mayores se presentaron en un período de 1h y fueron disminuyendo al aumentar el periodo de modelado como era de esperarse. Siendo los valores mayores para las concentraciones de SO₂ y los menores para el material particulado PM_x. (ver figuras 7 a 10).

Las gráficas presentan, además, la distribución espacial de las concentraciones de contaminantes en el dominio de estudio. Los rangos de valores de concentraciones en 1h variaron de 0.2 a 18.2 µg/Nm³ para las PM_x, de 0.3 a 33.1 µg/Nm³ para los NO_x y de 2 a 170 µg/Nm³ para los SO₂. Las máximas concentraciones para los tres contaminantes se presentaron a 5 718.5 m al Suroeste de la fuente de emisión y la distribución de concentraciones de mediano valor en la escala de variación fue la de mayor cobertura espacial (ver figuras 7 y 13).

Los rangos de valores de concentraciones en 3h variaron de 0.07 a 6.95 µg/Nm³ para las PM_x, de 0.1 a 12.6 µg/Nm³ para los NO_x y de 0.6 a 64.9 µg/Nm³ para los SO₂. La distribución de concentraciones para este período de modelado fue de menor cobertura espacial que para 1h, sin embargo, las máximas concentraciones de contaminantes se presentaron en el mismo punto (ver figura 8).

Los rangos de valores de concentraciones en 24h variaron de 0.01 a 1.37 µg/Nm³ para las PM_x, de 0.02 a 2.48 µg/Nm³ para los NO_x y de 0.1 a 12.7 µg/Nm³ para los SO₂. La distribución de concentraciones para este período de modelado fue bastante similar que para 1h, tanto en cobertura espacial de valores medios de concentración en la escala de variación como en el punto donde se presentaron las mayores concentraciones (ver figura 9).

Los rangos de valores de concentraciones en 1 año variaron de 0.001 a 0.119 µg/Nm³ para las PM_x, de 0.002 a 0.222 µg/Nm³ para los NO_x y de 0.01 a 1.13 µg/Nm³ para los SO₂. La distribución de concentraciones para este periodo de modelado fue la de menor cobertura espacial y las mayores concentraciones se presentaron a 1 066 m al Noroeste de la Fuente de Emisión (ver figuras 10 y 13).



Figura 13. Localización de la Fuente de Emisión Fija y los receptores para mayor concentración de contaminantes

modelados en periodos de 1h, 3h, 24h y 1 año en 2014. Imagen de *Google Earth* del área de estudio.

Otras herramientas del programa *CALPUFF View* v.8.4.0 de *Lakes Environmental* incluyen la animación de la pluma de dispersión para el período de modelado. En la figura 11 se muestra la simulación de la pluma para el momento de mayor concentración promedio de 1h, el 12 de octubre de 2014 a las 4:00 h.

Otra herramienta de utilidad es la rosa de los vientos presentada en la figura 12, donde se da la distribución de los vientos por rangos de velocidad, dirección y frecuencia de ocurrencia expresada en porcentaje. Durante 2014, se presentaron períodos de calma en 4.8%, vientos de 5.70 a 8.80 m/s en 0.6%, de 3.60 a 5.70 m/s en 19.8%, de 2.10 a 3.60 en 27.8% y de 0.5 a 2.10 m/s en 47%. El vector promedio hacia donde sopló el viento, tomando como referencia la chimenea equivalente de la Planta Termoeléctrica de Miraflores, tuvo una dirección de 141° con frecuencia de ocurrencia de 22%.

Comparando las figuras 11 y 12 se observa que el momento de mayores concentraciones coincide con vientos de 3.6 a 5.70 m/s de 19.8% de frecuencia de ocurrencia y en dirección opuesta al vector promedio que representa la dirección preponderante del viento, según la data del año 2014.

7. Conclusiones

Esta investigación aplicada, en su primer avance de modelado, utilizó los datos de mediciones de las emisiones de contaminantes provenientes de los tres motores de combustión interna operativos en enero de 2014, en la Planta Termoeléctrica de Miraflores, suministrados por la ACP. Actualmente, la planta cuenta con dos motores adicionales de combustión interna a base de búnker (motores 9 y 10) conectados a un precipitador de partículas, lo cual disminuye la contaminación, sin embargo, las emisiones de estos dos motores deberán tomarse en cuenta en el próximo modelado.

Los resultados obtenidos de la distribución de concentraciones han sido de utilidad para determinar el área real de influencia de la Planta Termoeléctrica de Miraflores e identificar los puntos receptores donde el programa calculó las mayores concentraciones de contaminantes. Estos resultados deberán ser comparados, en la próxima etapa de la investigación,

con mediciones en campo de las concentraciones de PMx, NOx y SOx. Teniendo en cuenta la actividad propia del Canal de Panamá, con toda seguridad las concentraciones medidas en campo estarán influenciadas por otras fuentes de estos contaminantes. Sin embargo, se espera puedan ser correlacionados con los resultados calculados por el modelo CALPUFF.

La fortaleza de este primer modelado radica en la utilización de los datos del modelo meteorológico regional WRF con el cual se logra un modelo meteorológico tridimensional más completo que el obtenido con datos meteorológicos superficiales. Sin embargo, el problema es la resolución de 4x4km², con la cual CALMET trabajó para ajustar los datos a una cuadrícula de 1x1km². En la siguiente etapa de la investigación se desea complementar los datos del modelo WRF con los datos meteorológicos de por lo menos dos estaciones superficiales cercanas a la fuente fija (Aeropuerto de Albrook, Esclusas de Pedro Miguel) y los datos de radiosonda lanzada cada 15 días en Corozal. De esta forma se logrará un modelo meteorológico CALMET con resolución 1x1km² más acorde al área de estudio.

Esta investigación solo contempla el transporte y la difusión de los contaminantes modelados. Sin embargo, para contaminantes que sufren transformaciones químicas, como el NOx, será interesante ajustar los valores calculados por CALPUFF tomando en cuenta estas transformaciones.

Finalmente, las concentraciones máximas promedios en 1h para los tres contaminantes modelados, se utilizaron para calcular el Índice de Calidad de Aire (*Air Quality Index*, AQI). Este índice varía para cada región y al no contarse con los mismos para Panamá, se utilizó el calculador de AQI con los datos de Puerto Rico y la metodología establecida por la EPA [12].

8. Agradecimiento

Agradecemos a los directivos y personal técnico de la División de Ambiente de la Autoridad del Canal de Panamá, por la información suministrada para esta investigación durante la pasantía realizada del 15 de enero al 15 de abril de 2014.

El reconocimiento a la empresa canadiense *Lakes Environmental Software* por el apoyo con la data WRF para el dominio de estudio y el visor de resultados

CALPUFF View v.8.4.0 sin los cuales los resultados de esta investigación hubiesen sido limitados.

El reconocimiento al Dr. José Fábrega, director de esta investigación y al personal del CIHH de la Universidad Tecnológica de Panamá por su apoyo técnico durante el desarrollo de este avance.

9. Referencias

- [1] A. D. Visscher, *Air Dispersion Modeling: Foundations and Applications*, Nueva York: John Wiley & Sons, Inc., 2014.
- [2] United State Environmental Protection Agency, «Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling,» EPA, 27 septiembre 2016. [En línea]. Available: https://www3.epa.gov/scram001/dispersion_prefrec.htm. [Último acceso: 22 febrero 2017].
- [3] Joseph S. Scire, David G. Strimaitis, Robert J. Yamartino. *A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model (Version 5)*, Concord: Earth Tech Inc., 2000.
- [4] A. G. González, «Una visita a la termoeléctrica Miraflores en el Canal de Panamá,» *Panama Hitek*, 25 marzo 2015. [En línea]. Available: <http://panamahitek.com/una-visita-a-la-termoelectrica-miraflores-en-el-canal-de-panama/>. [Último acceso: 20 febrero 2017].
- [5] Instituto Especializado de Análisis de la Universidad de Panamá, *Informe de Mediciones provenientes de la Planta Termoeléctrica de Miraflores*, Panamá: Universidad de Panamá, 2009.
- [6] Laboratorio Ambiental y de Higiene Ocupacional EnviroLAB S.A., *Informe de Ensayo de Emisiones de Fuentes Fijas Significativas*, Panamá: EnviroLAB S.A., 2012.
- [7] Jesse L. Thé, Cristiane L. Thé, Michael A. Johnson. *Calpuff View: User Guide V.8.4*, Ontario: Lakes Environmental Software, 2016.
- [8] Weather Research and Forecasting Model, «Home page,» WRF Board, abril 2016. [En línea]. Available: <http://wrf-model.org/index.php>. [Último acceso: 20 febrero 2017].
- [9] USGS, «Home page,» Shuttle Radar Topography Mission (STRM), enero 2015. [En línea]. Available: <https://lta.cr.usgs.gov/SRTM1Arc>. [Último acceso: 22 febrero 2017].
- [10] USGS, «Home page,» Global Land Cover Characterization (GLCC), enero 2015. [En línea]. Available: <https://lta.cr.usgs.gov/GLCC>. [Último acceso: 20 febrero 2017].
- [11] Joseph S. Scire, Françoise R. Robe, Mark E. Fernau, Robert J. Yamartino. *A User's Guide for the CALMET Meteorological Model (Version 5)*, Concord: Earth Tech Inc., 2000.
- [12] Air Now, «Air Quality Index (AQI) Basics,» AQI, 31 agosto 2016. [En línea]. Available: <https://airnow.gov/index.cfm?action=aqibasics.aqi>. [Último acceso: 20 febrero 2017].