
**VALORACIÓN CUALITATIVA DE LA CALIDAD DE UN INVENTARIO
DE EMISIONES INDUSTRIALES PARA EL MODELADO DE
DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN LA COSTA NORORIENTAL
DE VENEZUELA**

Lázaro V. Cremades y Gladys Rincón

RESUMEN

La incertidumbre es una medida de la similitud entre el valor estimado y el valor real (generalmente desconocido en un inventario de emisiones), la cual proporciona una idea de la calidad del resultado. A su vez, como los resultados del inventario alimentan a los modelos de dispersión de contaminantes, la incertidumbre del inventario es una medida de la calidad de los resultados del modelo, valorando adicionalmente las ecuaciones y suposiciones propias del modelo. El objetivo de este trabajo es la valoración cualitativa de la calidad de las estimaciones de emisiones de un inventario de emisiones industriales y de los

parámetros geométricos y operacionales de las chimeneas, a ser usados en el modelado de la dispersión de contaminantes. Para ello se ha propuesto un método, el cual ha sido aplicado a un inventario de emisiones de industrias pesadas en la costa nororiental de Venezuela. Se ha demostrado que, aun cuando este estudio se caracterizó por la poca disposición de las industrias a suministrar información, ha sido factible estimar las tasas de emisión, los parámetros de las chimeneas y la calidad de los valores estimados. Los resultados en conjunto presentaron una calidad aceptable.

Introducción

Un inventario de emisiones es un listado actualizado y amplio de las emisiones estimadas de los contaminantes atmosféricos en un área geográfica específica y durante un intervalo de tiempo determinado. Su ela-

boración desagregada, precisa y actualizada, es una tarea compleja que demanda la integración de la información en un marco de concurrencia institucional entre industrias y autoridades reguladoras. Los inventarios de emisiones en conjunto con el uso de modelos de

dispersión de contaminantes conforman una herramienta adecuada para evaluar la calidad del aire.

El concepto de incertidumbre refleja duda acerca de la veracidad del resultado obtenido, siendo una medida de la similitud entre el valor estimado y el valor real. Por

lo tanto, la incertidumbre da una idea de la calidad del resultado. A su vez, como los resultados del inventario alimentan a los modelos de dispersión de contaminantes, la incertidumbre del inventario es una medida de la calidad de lo que se obtendrá del modelo, valorando adi-

PALABRAS CLAVE / Calidad del Aire / Contaminación Atmosférica / Dispersión de Contaminantes / Emisiones Industriales /

Recibido: 14/05/2009. Modificado: 20/12/2010. Aceptado: 04/01/2011.

Lázaro V. Cremades. Licenciado en Química, Universidad de Palma de Mallorca, España. Doctor en Ingeniería Química, Institut National Polytechnique de Toulouse, Francia. Doctor en Ciencias, Universi-

tat de les Illes Balears, España. Profesor, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, Universidad Politècnica de Cataluña, España.

Gladys Rincón. Ingeniero Químico y Magister en Investigación de Operaciones, Universidad Central de Venezuela. Doctor en Ingeniería de Proyectos Calidad y Ambiente, Universidad Politècnica de Cataluña, España.

Profesor, Universidad Simon Bolívar (USB), Venezuela. Dirección: Departamento de Procesos y Sistemas, USB. Apartado 89000. Caracas 1080-A, Venezuela. e-mail: grincon@usb.ve

QUALITATIVE EVALUATION OF AN INDUSTRIAL EMISSIONS INVENTORY QUALITY FOR THE MODELLING OF CONTAMINANTS IN THE NORTHEASTERN COAST OF VENEZUELA

Lázaro V. Cremades and Gladys Rincón

SUMMARY

Uncertainty is a measure of similarity between the estimated value and the real value (generally unknown in an emissions inventory), and it gives an idea about the quality of the result. In turn, as the results of the inventory feed the contaminant dispersion models, the uncertainty of the inventory is a measure of the quality of the model's results, additionally evaluating the equations and assumptions of the model. The aim of this work is the qualitative evaluation of the quality of emissions estimates from an inventory of industrial emissions and of the geometric and

operational parameters of the chimneys, to be employed in modeling the dispersion of contaminants. To this end, a method is proposed and has been applied to an emissions inventory from heavy industries in the Northeastern coast of Venezuela. It is demonstrated that, even though this study was characterized by a meager propensity of industries to supply information, it has been possible to estimate emission rates, chimney parameters and the quality of the estimated values. Together, the results show an acceptable quality.

VALORIZAÇÃO QUALITATIVA DA QUALIDADE DE UM INVENTÁRIO DE EMISSÕES INDUSTRIAIS PARA A MODELAGEM DE DISPERSÃO DE CONTAMINANTES NA COSTA NORDESTE DA VENEZUELA

Lázaro V. Cremades e Gladys Rincón

RESUMO

A incerteza é uma medida da semelhança entre o valor estimado e o valor real (geralmente desconhecido em um inventário de emissões), a qual proporciona uma idéia da qualidade do resultado. Por sua vez, como os resultados do inventário alimentam os modelos de dispersão de contaminantes, a incerteza do inventário é uma medida da qualidade dos resultados do modelo, valorizando adicionalmente as equações e suposições próprias do modelo. O objetivo deste trabalho é a valorização qualitativa da qualidade das estimativas de emissões de um inventário de emissões industriais e dos parâmetros geométricos

e operacionais das chaminés, a ser usados na modelagem da dispersão de contaminantes. Para isto foi proposto um método, o qual tem sido aplicado a um inventário de emissões de indústrias pesadas na costa nordeste da Venezuela. Tem sido demonstrado que, ainda quando este estudo se caracterizou pela pouca disposição das indústrias a subministrar informação, tem sido factível estimar as taxas de emissão, os parâmetros das chaminés e a qualidade dos valores estimados. Os resultados em conjunto apresentaram uma qualidade aceitável.

cionalmente las ecuaciones y suposiciones propias del modelo.

La estimación cualitativa de la incertidumbre evidencia las fortalezas y debilidades potenciales en el inventario, centrándose en la forma de recolección de información, en los recursos disponibles, calidad de la información recolectada, métodos usados para estimar las emisiones, procedimientos de cálculos, referencias y documentación de los métodos utilizados, suposiciones subyacentes con sus referencias, e identificación de las fuentes de emisión no incluidas en el inventario (CICA, 1997a).

El objetivo de este estudio es la valoración cualitativa de la calidad de las estimaciones de emisiones atmosféricas en un inventario de emisiones de fuentes industriales, y de los parámetros

geométricos y operacionales de las chimeneas a ser usados en el modelado de la dispersión de contaminantes. El método propuesto para elaborar el inventario de emisiones industriales y valorar la calidad de sus resultados ha sido aplicado a un inventario de emisiones de industrias pesadas en la costa nororiental de Venezuela, que se caracterizó por la poca disposición de las industrias a dar información sobre sus emisiones.

Inventario de Emisiones Industriales

Elaboración del inventario de emisiones

El método propuesto para la elaboración de un inventario de emisiones industriales se ha inspirado en la metodología presentada por el Centro de Información sobre Contamina-

ción de Aire (CICA), a través de los Manuales del Programa de Inventarios de Emisiones de México (CICA, 1997a), que a su vez se ha basado en contenidos de la *United States Environmental Protection Agency* (US EPA). En esta propuesta el aseguramiento de la calidad es un elemento integrador del proceso de desarrollo del inventario, con el objeto de cuidar la calidad de los datos recopilados, el adecuado tratamiento de los mismos, la verificación permanente de los procedimientos para el cálculo y la calidad de los mismos. A continuación se expone cada paso del método para elaborar inventarios:

Definición del objetivo. El objetivo indica explícitamente lo que se va a inventariar y el uso final que se le dará al mismo.

Identificación de documentos. La información sobre tasas de

emisión, tasas de actividad (flujo másico o volumétrico de alimentación fresca o producto por unidad de tiempo, volumen o energía de gas combustible), corrientes de operación, geometría de las chimeneas, y condiciones operacionales de las emisiones, generalmente se encuentra en los informes obligatorios entregados por las industrias a las autoridades reguladoras, bases de datos propias de las industrias, e informes técnicos tratados como literatura abierta.

Identificación de fuentes de emisión. Dentro del área geográfica de estudio se identifican aquellas industrias que posiblemente emiten los contaminantes considerados. Después de un análisis minucioso de la documentación disponible se elabora una lista con las fuentes de emisión identificadas, la cual se coteja con la información recopilada por las autoridades reguladoras.

Recopilación de datos de emisiones y de chimeneas. La complejidad de la información a recopilar es función del uso final que se le dará al inventario. Si se pretende apoyar el modelado de la difusión de contaminantes, además de los datos para estimar las emisiones se requiere conocer la localización y geometría de las chimeneas (altura y diámetro), y las condiciones normales de operación de los gases de salida (temperatura y velocidad), denominados en este trabajo “parámetros de las chimeneas”. Estos parámetros son suministrados generalmente por las industrias o las autoridades reguladoras, pero si no se dispone de ellos, por ser necesarios para el modelado de la dispersión de contaminantes, deben ser supuestos bajo ciertas premisas:

La localización de las chimeneas se estima haciendo uso de imágenes de satélite a través del programa Google Earth®. Cuando esto no es posible, se localizan dentro de los límites de batería de la industria.

Para cada servicio que prestan las chimeneas se puede suponer que la altura, diámetro, temperatura y velocidad, están dentro de intervalos típicos. Las chimeneas inventariadas se agrupan según el tipo de servicio que prestan y se fija el intervalo típico de cada parámetro según cada servicio, haciendo uso de los valores reales extremos. Las suposiciones hechas para estimar estos parámetros deben favorecer que los gases de salida alcancen la mayor altura posible de sobrelevación del penacho, con el objeto de trabajar bajo un escenario conservador desde el punto de vista de la contaminación.

La contaminación en un punto dado depende de la altura del eje del penacho de los gases de salida de las chimeneas, debido a que a la salida de las chimeneas los gases sufren una elevación

por la propia velocidad vertical que llevaban, y por el empuje térmico provocado por tener una temperatura superior a la del aire. La altura de la chimenea, y la temperatura y velocidad de los gases de salida, se asumen igual al mayor valor posible dentro del intervalo típico. En los casos en que se conoce el caudal de los gases de salida, el diámetro se calcula a partir del caudal y la velocidad; en caso contrario también se estima dentro de un intervalo típico.

Selección del método para estimar emisiones (MEE). Se considera el tipo de fuente de emisión, disponibilidad de datos para realizar el cálculo, uso que se le dará al inventario, recursos económicos disponibles, y riesgo de la emisión. La jerarquía de los MEE propuesta por el CICA (1997b) considera los costos de elaboración y la precisión del cálculo. Esa jerarquía es: pruebas *in situ*, modelos de emisión, factores de emisión, balances de masa, encuestas y extrapolación de datos.

Cálculo de las emisiones estimadas. Exige verificar las suposiciones hechas por el método de estimación de emisiones, las hechas para el cálculo, y comprobar el procedimiento de cálculo usado.

Valoración de la calidad de los resultados del inventario de emisiones

La valoración cualitativa de la calidad se hace a través de una escala de evaluación de los criterios de aceptación, tipo Likert. La escala Likert mide el agrado o satisfacción ante un estímulo, y presenta cinco opciones que se traducen en una puntuación de 0 (mínimo grado de calidad) a 4 (máximo grado de calidad).

Criterios de aceptación de la calidad de los parámetros de las chimeneas: La incertidumbre asociada a los parámetros de las chimeneas

es función de las características del instrumento de medición, su calibración, y el método usado para tal fin, o de las suposiciones hechas y forma de obtención del parámetro.

El diseño de los criterios de aceptación y de la escala de evaluación para parámetros obtenidos por mediciones directas exige que se conozca y documente el método usado para la medición, el cual a su vez se califica haciendo uso de los criterios de calidad para pruebas *in situ* de la US EPA (1995). Se supone que los parámetros de las chimeneas originarios de las bases de datos de las industrias han sido obtenidos con métodos bien fundamentados y se corresponden con la realidad, otorgándole la máxima calificación.

Mientras que para los casos en que los parámetros se suponen, los criterios de aceptación y la escala de evaluación valoran el efecto del parámetro sobre la sobrelevación de la altura del penacho. Para el cálculo de la sobrelevación se han utilizado las fórmulas de Briggs (1969, 1975), por ser de las más empleadas en la literatura (Sofiev *et al.*, 2003; Ludwig *et al.*, 1989; McRae *et al.*, 1982).

Las chimeneas inventariadas se agrupan según el tipo de servicio que prestan, para establecer el intervalo típico de cada parámetro según cada servicio, y se escoge como “caso real” aquella chimenea considerada la más representativa para cada tipo de servicio. El efecto sobre la altura del penacho por variaciones del diámetro, altura, temperatura y velocidad se analiza en base a una cantidad porcentual con respecto al intervalo típico. Éste se representa como la desviación de la altura del penacho con respecto a la altura alcanzada por el penacho para el caso real.

Criterios de aceptación de la calidad de las tasas de

emisión. El diseño de estos criterios y de su escala de evaluación se apoya en la jerarquía propuesta por CICA (1997b) para los métodos de estimación de emisiones, que valora el nivel de confianza del cálculo frente los costos de elaboración, combinado con los criterios de la US EPA (1995) para calificar a los factores de emisión AP-42 y para calificar a las pruebas *in situ*.

La incertidumbre de las tasas de emisiones obtenidas por medición directa es función de las características del instrumento de medición, la calibración del mismo, la metodología utilizada, la documentación de soporte, la frecuencia y representatividad del muestreo. Cuando se usa otro método de estimación de emisiones, la incertidumbre es una combinación de la incertidumbre propia del método y de los datos de actividad.

Cuantificación numérica de la incertidumbre cualitativa. La valoración de la incertidumbre de los parámetros de las chimeneas y de las tasas de emisión se estima a través de la “tasa de calidad”, para lo cual se aplica el siguiente algoritmo.

Haciendo uso de las escalas de evaluación diseñadas previamente, asignar un valor a la calidad de cada parámetro y de cada tasa de emisión de las chimeneas. Luego, para cada chimenea, sumar la calificación de calidad asignada a cada parámetro de la chimenea, y por separado, sumar la calificación asignada a la tasa de emisión de cada contaminante inventariado. Calcular los parámetros porcentuales denominados tasas de calidad.

La tasa de calidad es el resultado de dividir la puntuación total obtenida por la puntuación total máxima o situación ideal. Se define situación ideal cuando todos los valores son el resultado de

métodos de medición directa, representativos de las condiciones promedios de operación de la fuente y cuya forma de medición ha alcanzado la calificación A para pruebas *in situ*, según US EPA (1995). Las tasas de calidad establecen la calidad de los datos frente a la situación ideal.

La tasa de calidad de los parámetros de la chimenea está referida a los parámetros geométricos y operacionales de cada chimenea, y la tasa de calidad de las emisiones se refiere a la estimación de las emisiones de cada chimenea. La tasa de calidad industrial es la suma de las tasas de calidad de todas las chimeneas de una industria, bien sea por parámetro o por emisión, entre el número total de fuentes de emisión inventariadas en la industria. La tasa de calidad global es la suma de las tasas de calidad industrial, bien sea por parámetro o por emisión, entre el total de industrias.

Si la tasa de calidad es 1, significa que todos los valores proceden de métodos de medición directa (situación ideal), lo cual, aunque pudiera ser deseable, elevaría apreciablemente los costos de elaboración del inventario (CICA, 1997b). Una tasa de calidad igual a 0 genera duda acerca de la veracidad del resultado obtenido y, por tanto, es inaceptable. El límite de aceptación de la tasa de calidad se ha definido como igual a 0,70, ya que por costos todos los datos no pueden proceder de pruebas *in situ*.

Desarrollo del Inventario el la Costa Nororiental de Venezuela

Región de estudio

La región de estudio está localizada en la costa nororiental del estado Anzoátegui, Venezuela, e incluye los municipios Guanta, Sotillo, Urbaneja, Bolívar, Peñalver y Píritu, en una franja de ~55km que ocupa un área de 2897km² y tiene 659000 habitantes, según censo del 2001.

En la región operan 11 industrias pesadas: una industria de refinación de petróleo (IRP), una industria del cemento (IC), y nueve industrias que operan en el Complejo Industrial de Jose (CIJ): cuatro de mejoramiento del crudo extrapesado (IM1, IM2, IM3, IM4), cuatro petroquímicas que producen metanol, amoniaco y urea, y metil-ter-butyl-eter (IP1, IP2, IP3, IP4) y una industria fraccionadora de gas de petróleo (IFG). El resto de las industrias de la región son consideradas medianas y pequeñas.

El clima de esa región tropical es semiárido, con una temporada de lluvias (mayo-octubre) y otra de sequía. La temperatura es estable durante el año, entre 18 y 39°C, con valores promedios mensuales de 26-28°C. La velocidad del viento de superficie varía entre 2,2 y 6,6m·s⁻¹ y la dirección prevaleciente del viento en enero-mayo es noreste, en julio-septiembre es sur-sureste, y en octubre-diciembre es una combinación de vientos del noreste con vientos del oeste.

Universo de fuentes y sus características

Este estudio se ha limitado a las emisiones de total de partículas suspendidas (TSP) y dióxido de azufre (SO₂) para el año 2006, emitidas desde las 11 industrias pesadas (IM1, IM2, IM3, IM4, IP1, IP2, IP3, IP4, IC, IFG). No se han tenido en cuenta las emisiones de TSP y SO₂ provenientes de las fuentes móviles, ni de las industrias pequeñas y medianas. El estudio se ha centrado en TSP debido a que en Venezuela sólo se regula este tamaño de partículas.

La identificación de las fuentes de emisión que emiten TSP y SO₂ desde el CIJ (que incluye 9 industrias), se hizo con ayuda de un inventario de emisiones atmosféricas para los años 2004, 2005 y 2006, llevado a cabo por auditores externos (Sánchez y

Rondón, 2007). Posteriormente, esta información se contrastó con los diagramas de procesos de las evaluaciones de impacto ambiental de las industrias (OCN, 1997; Petrolera Ameriven, 1999; Ingeniería Caura, 2006; Acroven, 2007) y con los informes de caracterización de emisiones (Acasia; 2006, 2007; Hidrolab, 2006, Sincor, 2006).

Las fuentes de emisión de la IRP se identificaron por medio de una revisión minuciosa de los diagramas de flujo de procesos contenidos en las evaluaciones de impacto ambiental de esa industria (PDVSA, 1997, 2006). Las fuentes de emisión de la IC se identificaron haciendo uso de los informes de caracterización de emisiones (Hidrolab 2004a-g) y la información restante fue suplida directamente por la industria.

En total se identificaron 163 fuentes de emisión, de las cuales 150 son fuentes puntuales (hornos, incineradores, calderas, generadores eléctricos y mecheros) y 13 fuentes de área (pilas de coque y azufre, ensacadora, despacho a granel y bandas transportadoras de cemento). Los mecheros normalmente no se contabilizan como fuentes de emisión por ser equipos de emisiones no continuas diseñados para situaciones de contingencias. Pero, en este caso, de un total de 13 mecheros, se han contabilizado cinco por emitir cantidades importantes de TSP o SO₂ (PDVSA, 2006; Sánchez y Rondón, 2007).

Estimación de las emisiones industriales

Antes de hacer uso de las tasas de emisión reportadas en el inventario de emisiones atmosféricas del CIJ (Sánchez y Rondón, 2007), se hizo una revisión profunda de este documento para establecer la procedencia de las tasas de emisión reportadas. De esta revisión se conoció que los valores de tasas de emisión procedían de campañas de mediciones, bien documenta-

das, realizadas por cada industria, o en su defecto, fueron estimadas por los auditores, haciendo uso de factores de emisión o balances de masa, con métodos bien documentados. La información voluntaria facilitada por la gerencia de las industrias y la de carácter oficioso fueron de vital importancia para despejar incertidumbres sobre algunos datos dudosos, así como para completar información. Además, se usaron los valores de tasas de emisión reportados en los informes de caracterización de emisiones en pruebas *in situ*, tras comprobar que los mismos eran representativos de los volúmenes de emisión de TSP y/o SO₂.

En el inventario del CIJ también se ha reportado un estimado de las emisiones de TSP desde las pilas de coque de la mejoradora IM4, calculado a partir de las características de las pilas de coque, base de datos propia de esa industria, algoritmos y factores de emisión señalados en el Capítulo 13, Sección 13.2.4 de US EPA (1995). Sabiendo que las emisiones de polvo de coque y azufre provienen de pilas de almacenamiento al aire libre localizadas en un área en común para las cuatro mejoradoras, sin distintivos importantes, y con el mismo sistema de control de emisiones, se consideró válido y acertado estimar por extrapolación las emisiones de TSP de las pilas de coque de las otras tres mejoradoras a partir de las emisiones desde las pilas de coque de la IM4. La extrapolación es un método adecuado siempre y cuando se use en condiciones similares dentro de la misma industria, o equivalente, para aquellos casos en que no se cuenta con suficiente información para soportar métodos de estimación más rigurosos. No se contabilizaron las emisiones desde las pilas de azufre almacenadas al aire libre junto con las pilas de coque, por carecer de información.

Las emisiones de las fuentes de área de la IC se obtu-

vieron de los informes de caracterización de emisiones atmosféricas. Las tasas de emisión de las fuentes de la IRP se estimaron haciendo uso de los factores de emisión AP-42 de la US EPA y de los datos de actividad reportados en las evaluaciones de impacto ambiental. Las emisiones desde esta industria se subestimaron por no disponer prácticamente de ninguna información sobre las mismas, de ahí que tan sólo se contabilizaran 9 de las 18 fuentes de emisión identificadas.

Por último, de las 163 fuentes de emisión identificadas sólo 122 emiten ≥ 1 t/año de uno de los dos contaminantes. En total, para esta investigación, se contabilizaron 92 fuentes de emisión de TSP y 81 fuentes de SO_2 . En la Tabla I se presentan para cada industria las tasas de emisión inventariadas y el método de cálculo para las tasas de emisión.

Las emisiones estimadas de TSP fueron de 4790t/año. Las emisiones desde los mecheros concentran el 23% del total de las emisiones industriales de TSP. Este resultado ratifica lo acertado de incluir estos equipos en el inventario. La IRP y la IC emiten mayor cantidad de TSP que cualquiera de las industrias del CIJ, excluyendo a la IFG. Además, las emisiones de las fuentes de área de la IC no son relevantes frente a las emisiones desde las chimeneas de esa industria.

Las emisiones estimadas de SO_2 fueron de 8376t/año, principalmente, desde las industrias que usan petróleo como materia prima, quizás, por el alto contenido de azufre en el crudo venezolano (~2,53%). Destaca que el 64% de las emisiones de este contaminante provienen de la IM4, el 30% de la IM1 y el 16% de la IRP.

TABLA I
TASAS DE EMISIÓN (TSP Y SO_2), CANTIDAD DE FUENTES DE EMISIÓN Y MÉTODO EMPLEADO PARA ESTIMAR EMISIONES, POR INDUSTRIAS PARA 2006

Industria	TSP (t/año)	N° fuentes emisión	SO_2 (t/año)	N° fuentes emisión
IM1 Industria mejoradora 1	309 c, f	9	357 c	14
IM2 Industria mejoradora 2	139 b	7	685 b, f	10
IM3 Industria mejoradora 3	64 b	8	364 b	9
IM4 Industria mejoradora 4	54 a, b	13	5402 a, b, f	20
IP1 Industria petroquímica 1	114 b	3	17 b	3
IP2 Industria petroquímica 2	23 a, b	2	11 a, b	2
IP3 Industria petroquímica 3	245 a, b	2	13 a, b	3
IP4 Industria petroquímica 4	30 b	3	68 b	4
IFG Industria fraccionadora de gas	1113 d, f	9	15 c	7
IRP Industria de refinación de petróleo	1434 c, e	10	1348 c, e, f	3
IC Industria del cemento	1209 a, b	18	96 a, b	6
Fuentes de área IC	29 a, b	5	-	-
Fuentes de área IM	27 e, g	4	-	-
Total de fuentes de emisión	4790	92	8376	81

- a: Calculada haciendo uso de pruebas *in situ* con metodología validada.
- b: Calculada haciendo uso de pruebas *in situ* con metodología no validadas.
- c: Calculada haciendo uso de los factores de emisión a partir del flujo de gas combustible.
- d: Calculada mediante balance de masa a partir del gas combustible y contenido de H_2S .
- e: Calculada haciendo uso de los factores de emisión a partir de diferentes tasas de actividad (alimentación fresca, azufre producido, gas quemado para mecheros).
- f: Las emisiones desde los mecheros se hizo usando factores de emisión y suponiendo que los mecheros operan emitiendo humos durante un lapso acumulado de 30 días al año.
- g: Calculado por extrapolación a partir de la tasa de emisión de TSP desde las pilas de coque de la IM4.

Valoración de la calidad del inventario en la costa nororiental de Venezuela

Para el análisis del efecto de los parámetros (temperatura, velocidad, altura y diámetro) sobre la altura del penacho se usaron 80 chimeneas de las que se disponía de la información completa. Se identificaron 9 tipos de servicios que prestan las diferentes chimeneas: hornos atmosféricos, hornos de vacío, hornos de coquización, hornos de hidrotreamiento, hornos de aceite caliente, hornos reformadores, incineradores de azufre, calderas y generadores eléctricos. Para cada tipo de servicio se establecieron los intervalos típicos de cada parámetro y se escogió el "caso real".

Los resultados del análisis de sensibilidad de dichos parámetros sobre la altura del penacho de los gases de salida, haciendo uso de las fórmulas de Briggs, se muestran en la Figura 1. Las variaciones del parámetro (T, v, h, D) por encima o por debajo del caso real reportan valores equivalentes a la media aritmética de la desviación; a mayor variación de los parámetros se obtiene una mayor desviación de la altura del penacho, y se acentúa la diferencia entre el mayor y menor valor de la desviación.

Al comparar los cuatro parámetros de la Figura 1 se puede concluir que el diámetro es quien ejerce mayor influencia sobre la altura del penacho, posiblemente porque para penachos calientes como los del inventario, el diámetro tiene una influencia cuadrática sobre el empuje térmico. La temperatura y velocidad presentan medias de desviación similares, aunque la diferencia entre el valor máximo y mínimo de la desviación es algo mayor para el parámetro velocidad. El pa-

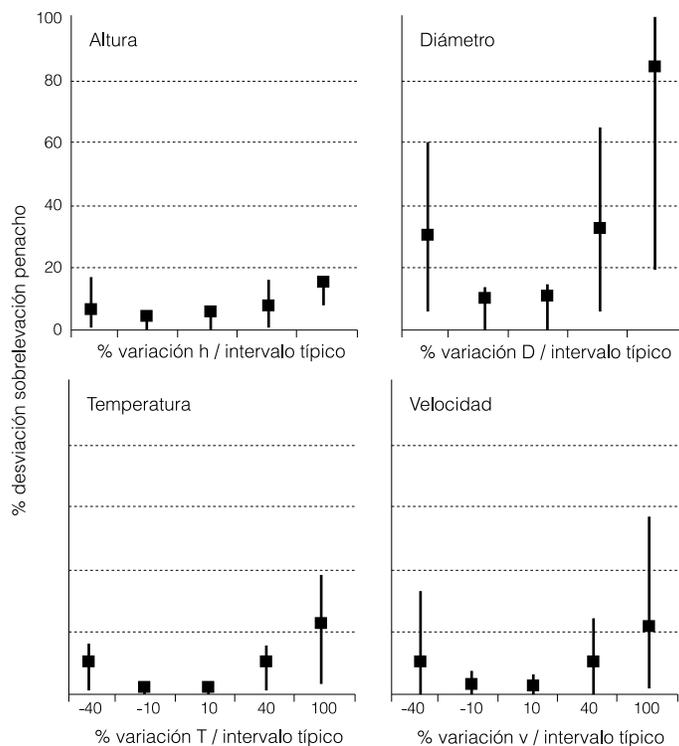


Figura 1. Estudio de la influencia de la variación de la temperatura (T) y velocidad (v) de los gases de salida, y del diámetro (D) interno de la chimenea sobre la altura del penacho a través de la media aritmética, mínimo y máximo de la desviación de sobrelevación. Por problemas de escala, no se presenta el valor máximo de la desviación de la altura del penacho en la gráfica del diámetro (218%).

TABLA II
CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DE LA CALIDAD
DE LOS PARÁMETROS DE LAS CHIMENEAS
Y DE LAS TASAS DE EMISIÓN

Aplicado a:	Calificación	Criterios de aceptación
Parámetros de las chimeneas	4	Resultados de pruebas <i>in situ</i> evaluadas A-B (US EPA, 2005). Información proveniente de bases de datos de las industrias. Utilización de equipo de medición directa
	3	Temperatura y velocidad, resultados de pruebas <i>in situ</i> evaluadas C-D (US EPA, 2005). Altura, supuesta dentro de rangos típicos de equipos similares en industrias similares. Localización, uso de Google Earth®.
	2	Temperatura y velocidad, supuestas dentro de intervalos típicos de equipos similares en industrias similares. Localización, dentro del límite de batería de industrias con área de proceso inferior al tamaño de malla usado para el modelado.
	1	Diámetro, supuesto en base a intervalos típicos de equipos similares en industrias similares. Localización, dentro del límite de batería de industrias con área de proceso superior al tamaño de malla usado para el modelado.
	0	Criterio de ingeniería no documentados, con incertidumbre muy alta.
Tasas de emisión	4	Resultados de pruebas <i>in situ</i> evaluadas A-B (US EPA, 2005).
	3	Modelización de emisiones usando modelos informatizados.
	2	Factores de emisión evaluados A-B (US EPA, 2005). Resultados de pruebas <i>in situ</i> evaluadas C (US EPA, 2005). Factores de emisión evaluados C (US EPA, 2005).
	1	Balances de masa, soportados con nivel de detalle para validación. Extrapolación en condiciones similares, dentro de misma región e industria. Resultados de pruebas <i>in situ</i> evaluadas D (US EPA, 2005). Factores de emisión evaluados D (US EPA, 2005).
	0	Extrapolación con condiciones similares, en regiones geográficas diferentes. Balances de masa sin nivel de detalle para la validación. Criterios de ingeniería, bien fundamentados, para obtener un orden de magnitud.
	0	Factores de emisión evaluados E (US EPA, 2005). Criterio de ingeniería no documentados, con incertidumbre muy alta.

rámetro altura es el que muestra menor influencia. El análisis ha revelado lo sensible que es la sobre-elevación ante variaciones de esos parámetros, y en especial del diámetro interno.

La Tabla II muestra los criterios de aceptación diseñados para valorar la calidad de los parámetros de las chimeneas, los cuales toman en cuenta el impacto de los cuatro parámetros

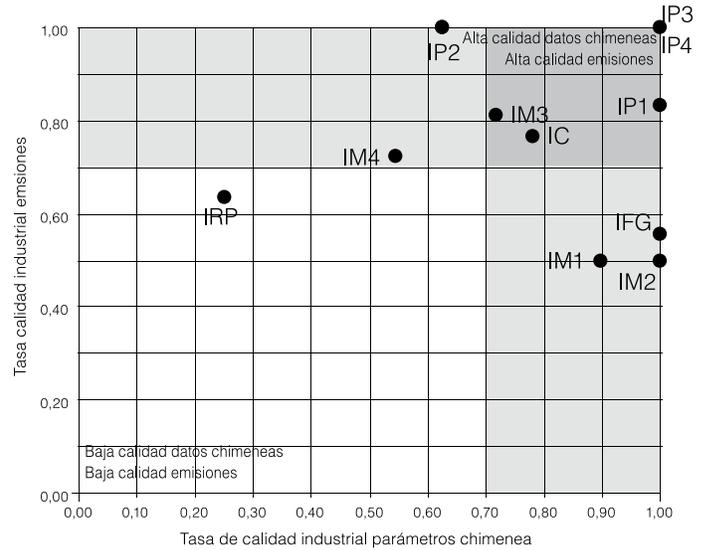


Figura 2. Tasas de calidad industrial de los parámetros de las chimeneas (altura, diámetro, temperatura y velocidad) y de las tasas de emisión (TSP y SO₂). IM: industria mejoradora, IP: industria petroquímica, IFP: industria fraccionadora de gas, IC: industria del cemento, IRP: industria de refinación de petróleo.

tros analizados (T, v, h, D) sobre la sobre-elevación del penacho. En la Tabla II, también se presentan los criterios de aceptación de las tasas de emisión.

Las tasas de calidad de las emisiones de las 122 fuentes de emisión y de los parámetros (T, v, h, D) de las 113 chimeneas han sido tasadas de forma individual, haciendo uso de dichos criterios de aceptación. Como ejemplo, se presenta la estimación de la tasa de calidad de la industria IP2, la cual tiene dos fuentes de emisión (caldera e incinerador). La tasa de calidad de las emisiones alcanzó la máxima calificación por ser el resultado de pruebas *in situ* evaluadas A y B según la US EPA. La tasa de calidad de los parámetros de las dos chimeneas resultó ser de 1, ya que esta información provenía de la base de datos propia de la industria IP2. Aun cuando las industrias inventariadas mostraron poca disposición a suministrar información sobre sus emisiones, el hecho de que estas industrias tengan participación accionaria de empresas líderes en el área a nivel internacional garantiza una forma de gerencia que avala la veracidad de la información

recopilada en sus bases de datos.

La Figura 2 muestra la tasa de calidad por industria para las 11 industrias inventariadas. El eje de las abscisas corresponde a la tasa de calidad industrial de los parámetros de las chimeneas y el eje de las ordenadas representa la tasa de calidad industrial de las tasas de emisión. En el gráfico se señala en gris la zona que está por encima del límite aceptación impuesto (>0,7).

En la Figura 2 se observa que 8 de las 11 industrias presentan tasas de calidad industrial por encima del criterio de aceptación tanto para los valores de emisión como para los parámetros de las chimeneas (IM2, IM3, IM4, IP1, IP2, IP3, IP4, IC), indicando que el 64% de los datos tienen alta calidad, debido a que gran parte de la información de los parámetros procedía de las bases de datos propias de las industrias y la de las tasas de emisión de pruebas *in situ* calificadas A o B. La IRP tiene ambas tasas de calidad industrial <0,70: los parámetros de las chimeneas se estimaron en base a intervalos típicos y las tasas de emisión se estimaron por factores de emisión. Las

tasas de calidad de esta industria no llegan al límite de aceptación impuesto en esta investigación (tasa de calidad de los parámetros de las chimeneas de 0,43; tasa de calidad de las tasas de emisión de 0,6).

Las industrias IM1, IFG, presentan tasas de calidad industrial para emisión <70% (68 y 64%, respectivamente), pero de 100% para los parámetros de las chimeneas. Sus tasas de emisiones se calcularon haciendo uso de factores de emisión evaluados A y D, correspondientes a emisiones de SO₂ y TSP a partir de flujo de gas combustible. La información sobre la geometría y condiciones de operación provenía de la base de datos de cada industria.

La tasa de calidad global para los parámetros de las chimeneas resultó 0,92 (con el 87% de los parámetros de las chimeneas con máxima calificación) y la tasa de calidad global para las tasas de emisión en 0,77.

Conclusiones

Se ha propuesto un método para elaborar inventarios de emisiones atmosféricas industriales que recolecta, adicionalmente, información sobre la geometría y condiciones de operación de las fuentes de emisión. Esta propuesta, además, valora cualitativamente la calidad de sus resultados, y ha sido probada en un inventario de fuentes industriales en la costa nororiental de Venezuela.

El método propuesto ha demostrado que, aun cuando este estudio se ha caracterizado por la poca disposición de las industrias a suministrar información al respecto, ha sido factible estimar las tasas de emisión, los parámetros de las chimeneas, y establecer, su calidad. Los resultados de la calidad, en conjunto, presentaron una calidad aceptable para ser usados en el modelado de la difusión de contaminantes.

El análisis de sensibilidad de los parámetros de las chi-

meneas ha permitido evaluar el efecto de la temperatura y velocidad de los gases de salida, y de la altura y diámetro interno de la chimenea, sobre la altura del penacho de los gases de salida, a través de las fórmulas de Briggs. El análisis ha revelado lo sensible que es el modelo ante variaciones del diámetro, lo cual se debe considerar al momento del modelado, sobre todo en el caso de la industria de refinación de petróleo (IRP).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al personal de la Dirección de Calidad del Aire del Ministerio del Poder Popular para el Ambiente, Venezuela, y a la Comisión de Educación, Cultura, Ciencia, Tecnología y Comunicación del Parlato de Venezuela, por el apoyo brindado. Este trabajo ha sido financiada por el Decanato de Investigación de la Universidad Simón Bolívar (proyecto DI-CAI-001-07), el Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (Fonacit; proyecto 2005000432) y el programa Alfa/LignoCarb Alfa 0412FIL.

REFERENCIAS

Acasia (2006) *Evaluación de Emisiones por las Chimeneas de los Granuladores 1 y 2, Reformadores 1 y 3 y Caldera de la Empresa Fertinitro, Ubicada en el Complejo Criogénico de Jose*. Informe técnico Environmental Assessments Acasia C.A. Los Teques, Venezuela, 63 pp.

Acasia (2007) *Evaluación de Emisiones por las Chimeneas de los Granuladores 1 y 2, Reformadores 1 y 3 y Caldera de la Empresa Fertinitro, Ubicada en el Complejo Criogénico de Jose*. Informe técnico Environmental Assessments Acasia C.A. Los Teques, Venezuela, 40 pp.

Acroven (2007) *Caracterización de las Emisiones Atmosféricas en las Fuentes Fijas en la Planta de Fraccionamiento Jose*. Informe técnico PDVSA, Anzoátegui, Venezuela, 289 p.

Briggs GA (1969) *Plume Risd. USAEC Critical Review also exploring the possibility of using this model with Series. TID-25075*. Clearing-house for

Federal Scientific and Technical Information. Springfield, VA, EEUU. 86 pp.

Briggs GA (1975) *Lectures on Air Pollution and Environmental Impact Analyses: Workshop Proceedings. Am. Met. Soc. 29 Sep.-3 Oct., Boston, MA, EEUU. pp. 59-11*.

CICA (1997a) *RCN 670017 5104. Manuales del Programa de Inventarios de Emisiones de México. Fundamentos de Inventarios de Emisiones. Vol. II*. Centro de Información sobre Contaminación del Aire. Sacramento, CA, EEUU. 91 pp. www.epa.gov/ttn/catc/cica/other3_s.html (Cons. 04/2010).

CICA (1997b) *RCN 670-017 20-04. Manuales del Programa de Inventarios de Emisiones de México. Fundamentos de Inventarios de Emisiones. Vol. III*. Centro de Información sobre Contaminación del Aire. Sacramento, CA, EEUU. 133 pp. www.epa.gov/ttn/catc/cica/other3_s.html (Cons. 04/2010).

Hidrolab (2004a) *Emisiones Atmosféricas. Planta Vencemos Pertigalete Planta I*. Informe técnico Hidrolab Toro Consultores, C.A. Valencia, Venezuela. 191 pp.

Hidrolab (2004b) *Análisis de Emisiones Atmosféricas. Planta Vencemos Pertigalete Planta N° 2*. Valencia. Informe técnico Hidrolab Toro Consultores, C.A. Valencia, Venezuela. 50 pp.

Hidrolab (2004c) *Caracterización de Emisiones Atmosféricas Horno 6, 7, Enfriador L-6, L-7, Molino 11, 13, Banda a silo, Banda 904, Banda C*. Informe técnico Hidrolab Toro Consultores, C.A. Valencia, Venezuela. 185 pp.

Hidrolab (2004d) *Caracterización de Emisiones Atmosféricas Horno 1, 2, 3A, 3B, 4, 5, Molino 1, 9, 9A*. Informe técnico Hidrolab Toro Consultores, C.A. Valencia, Venezuela. 191 pp.

Hidrolab (2004e) *Caracterización de Emisiones Atmosféricas Ducto de Áreas de Canteras, Banda 2BF-9, y Triturador*. Informe técnico Hidrolab Toro Consultores, C.A. Valencia, Venezuela. 76 pp.

Hidrolab (2004f) *Caracterización de Emisiones Atmosféricas Ductos Corrientes de Turbinas 7 y 8*. Informe técnico Hidrolab Toro Consultores, C.A. Valencia, Venezuela. 44 pp.

Hidrolab (2004g) *Caracterización de Emisiones Atmosféricas Ensayadoras 2,3, Despacho A Granel, Bandas C-B, Muelle 2/3/5*. Informe técnico Hidrolab Toro Consultores, C.A. Valencia, Venezuela. 105 pp.

Hidrolab (2006) *Caracterización de Emisiones Atmosféricas en las Fuentes Fijas de Supermetanol S.A*. Informe técnico Hidrolab Toro Consultores, C.A. Valencia, Venezuela. 25 pp.

Ingeniería Caura (2006) *Estudio de Impacto Ambiental Yy Socio-cultural del Proyecto Expansión de la Planta de Metanol de Oriente (Metor)*. Informe técnico. Ingeniería Caura. Anzoátegui, Venezuela. 37 pp.

Ludwig FL, Salvador R, Bornstein R (1989) An adaptive volume plume model. *Atm. Env.* 23: 127-138.

McRae GJ, Goodin WR, Seinfeld JH (1982) Development of a second generation mathematical model for urban air pollution. *Atm. Env.* 16: 679-696.

OCN (1997) *Operadora Cerro Negro: Evaluación Ambiental Específica. Planta de Mejoramiento*. Informe técnico. Proyecto Cerro Negro. Anzoátegui, Venezuela. 325 pp.

Petrolera Ameriven (1999) *Evaluación Impacto Ambiental Proyecto Hamaca. Planta Mejoradora Petrolera Ameriven*. Informe técnico. Petrolera Ameriven. Anzoátegui, Venezuela. 420 pp.

PDVSA (1997) *Estudio de Impacto Ambiental Refinería de Puerto La Cruz y Refinería del Chaure*. Informe técnico. Petróleos de Venezuela, S.A. Anzoátegui, Venezuela. 356 pp.

PDVSA (2006) *Informe de Soporte para los Términos de Referencia del Proceso de la Refinería Puerto La Cruz Proyecto Puerto La Cruz*. Informe técnico. IRNR-USB-UDO, Caracas, Venezuela. 92 pp.

Sánchez J, Rondón A (2007) *Inventario de Emisiones Atmosféricas. Informe Final. Complejo Industrial, Jose Antonio Anzoátegui*. Informe técnico. PROLYS (Producción Limpia y Segura) y PDVSA. Anzoátegui, Venezuela. 146 pp.

Sincor (2006) *Informe Supervisión Ambiental. Periodo Octubre-Diciembre 2004*. Informe técnico. Sincor. Anzoátegui, Venezuela. 18 pp.

Sofiev M, Kaasik M, Hongisto M (2003) Model simulations of the alkaline dust distribution from Estonian sources over Baltic sea. *Water Air S. Pollut.* 146: 211-223.

US EPA (1995) *Compilation of Air Pollution Emission Factors (AP-42). Vol. I: Stationary Point and Area Sources*. 5ª ed. U.S. Environmental Protection Agency. NC, EEUU. www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ (Cons. 01/2011).