

## Índice integrado de calidad del aire para ciudades colombianas

### Integrated air quality index for Colombian cities

*Mauricio Jaramillo\**, Daniel Enrique González, María Eugenia Núñez, Gloria Portilla

Grupo de Producción más Limpia. Facultad de Ingeniería. Pontificia Universidad Javeriana Seccional Cali, Colombia, Calle 18 N.º 118-250, Cali, Colombia

(Recibido el 16 de septiembre de 2008. Aceptado el 12 de marzo de 2009)

#### Resumen

En este trabajo se propone un índice que integra información sobre los dos contaminantes criterio de mayor incidencia sobre la salud humana en las ciudades colombianas, ozono ( $O_3$ ) y material particulado con diámetro menor a  $10 \mu m$  ( $PM_{10}$ ), utilizando lógica difusa. El índice se calcula para las normas de calidad del aire que rigen actualmente en Colombia, aunque su adaptación a otras reglamentaciones es sencilla.

----- *Palabras clave:* Calidad del aire, contaminación atmosférica, lógica difusa, indicadores ambientales

#### Abstract

In this work an integrated index is proposed using fuzzy logic which incorporates information on the two criteria pollutants of highest incidence on human health in Colombian cities, ozone ( $O_3$ ) and particulate matter with diameter less than  $10 \mu m$  ( $PM_{10}$ ). The index is calculated for current Colombian air quality standards, although its adaptation to others is straightforward.

----- *Keywords:* Air quality, air pollution, fuzzy logic, environmental indicators

---

\* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 2 + 321 83 52, fax: + 57 + 2 + 555 28 23, correo electrónico: mjaramil@javerianacali.edu.co (M. Jaramillo).

## Introducción

La contaminación atmosférica es un fenómeno complejo que involucra numerosas reacciones químicas y fotoquímicas, así como procesos dispersivos y sinergias de algunos componentes extraños a la composición normal de la atmósfera que provocan efectos perjudiciales para el medio ambiente y la salud con implicaciones negativas en lo social y económico. Ante tal situación, la adopción de medidas correctivas encaminadas solamente al cumplimiento de las normas gubernamentales no es suficiente para garantizar la sostenibilidad ambiental. Esto ha generado la necesidad de realizar mediciones específicas de aquellos contaminantes que afectan en mayor proporción a la población y de informar oportunamente sobre el estado de la calidad del aire, para facilitar a las autoridades ambientales y a los mismos habitantes tomar medidas preventivas y correctivas. Para la comunicación del diagnóstico de la calidad del aire urbano se utilizan índices que permiten identificar las condiciones bajo las cuales se encuentra expuesta la población en un momento determinado. Es importante tener información oportuna y clara de la calidad del aire urbano que ayude a las autoridades ambientales a establecer controles, desarrollar acciones preventivas conducentes a la mitigación de impactos negativos de la contaminación en la población, pronosticar posibles episodios críticos y suministrar información ambiental a la población como es su derecho. Para el público, se requiere comunicar esta información en una forma sencilla y de fácil comprensión, sin recurrir a detalles técnicos que son de interés de autoridades e investigadores. Un índice de calidad de aire permite expresar mediante un indicador cualitativo y cuantitativo el estado de contaminación del aire en una escala de intervalo previamente establecida. En este estudio se propone un índice integrado que incluye simultáneamente las concentraciones de ozono ( $O_3$ ) y material particulado con diámetro menor de  $10\ \mu m$  ( $PM_{10}$ ) como generadores de una valoración integrada del estado de calidad de aire. Para su cuantificación se utiliza lógica difusa, dado

que las interacciones entre los contaminantes y las variables físicas y químicas que estas suponen, corresponden a relaciones complejas que exigen técnicas de inferencia difusa. Colombia no cuenta con un índice de calidad ambiental que incluya más de un contaminante simultáneamente. Además no se reporta la calidad del aire en todas las regiones del país. Las únicas ciudades que actualmente reportan un índice son Bogotá<sup>1</sup> (IBOCA), Bucaramanga (IBUCA) y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Dos de estos índices utilizan la misma metodología de cálculo (IBOCA e IBUCA). Ambos índices se obtienen de los datos de concentraciones de  $CO$ ,  $SO_2$ ,  $PM_{10}$ ,  $NO_2$  y  $O_3$ , estableciéndose un valor normalizado para cada contaminante y seleccionándose finalmente el de mayor valor, el cual se registra como el IBOCA/IBUCA de la ciudad. Son índices que reportan diariamente la calidad del aire. Respecto a experiencias internacionales de países que reportan un índice de calidad del aire, se tiene que la mayoría de estos están basados en el índice de calidad del aire (AQI) establecido por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos (USA EPA). En Latinoamérica, países como Chile y México cuentan con sus propios índices y evalúan contaminantes críticos según sus necesidades, por ejemplo, el Índice de Calidad de Aire de Partículas (ICAP) y el Índice de Calidad del Aire (ICA) de Chile evalúan  $PM_{10}$ ,  $CO$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$  y  $O_3$ ; en México se evalúan 6 contaminantes ( $PM_{10}$ ,  $O_3$ ,  $SO_2$  y  $NO_x$ ,  $CO$  y PST). Por lo general, las metodologías para elaboración de índices actuales toman el contaminante con peor valor en cada estación de monitoreo y se selecciona, entre ellos, el de mayor nivel de contaminación relativo a su norma, como representativo de la calidad del aire. La metodología propuesta en este trabajo permitirá comunicar el estado de la calidad atmosférica en zonas urbanas que cuenten con datos de mediciones de monitoreo de los dos contaminantes mencionados. En este trabajo describiremos la metodología propuesta para la elaboración del índice y su aplicación a datos reales de monitoreo.

1 Actualmente el DAMA está realizando una revisión de su índice, con el fin de adecuarlo a los estándares internacionales

### Contaminantes involucrados en el índice

El efecto combinado de los contaminantes sobre la población es difícil de determinar debido a que ellos no actúan por separado, son mezclas complejas de composición variable y por lo tanto pueden tener efectos de interacción desconocidos y su modelación matemática podría resultar difícil [1]. Se denominan contaminantes criterio aquellos que están sujetos a normatividad legal en cuanto a sus niveles máximos permitidos. En Colombia estas sustancias son: ozono ( $O_3$ ), material particulado con diámetro menor que  $10 \mu m$  ( $PM_{10}$ ), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre ( $SO_2$ ), dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) y material particulado total (PST). Los niveles máximos se determinan a partir de los efectos negativos sobre la salud que individualmente producen según estudios aceptados internacionalmente y están reglamentados en la resolución 601 de 2006 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia. Los contaminantes seleccionados para la elaboración del índice integrado,  $O_3$  y  $PM_{10}$ , son los que en general tienden a presentar niveles más elevados relativos a las normas en las ciudades colombianas. Para la elección de ozono se tuvo en cuenta que al ser éste el resultado de procesos fotoquímicos en los que intervienen compuestos orgánicos volátiles (COV), óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) y la acción de la radiación solar, sus niveles están relacionados con las concentraciones de estos precursores. El material particulado con diámetro menor que  $10 \mu m$  ( $PM_{10}$ ) fue elegido por ser el contaminante criterio de mayores efectos negativos directos sobre la salud de la población debido a su capacidad de ingresar a los bronquios y presentar un efecto sinérgico con otros contaminantes incrementando así su efecto perjudicial.

#### Material particulado con diámetro menor de $10 \mu m$ ( $PM_{10}$ )

El material particulado incluye diversas partículas sólidas y líquidas, orgánicas e inorgánicas que se emiten directamente al aire o que se forman por

reacciones químicas de precursores provenientes de diversas fuentes. Su clasificación está basada en los efectos sobre la salud debido a su diámetro (Tabla 1) [2]. Los efectos severos de este contaminante en el sistema respiratorio conducen a problemas cardiovasculares, enfermedades respiratorias agudas, muertes prematuras de niños, cáncer pulmonar, reducción de la esperanza de vida para adultos mayores y empeoramiento de enfermedades respiratorias y cardíacas [2].

**Tabla 1** Material particulado y efectos en la salud

Partículas	Efectos sobre la salud
$PM_{10}$	Aquellas menores de $10 \mu m$ con capacidad de ingresar en los pulmones hasta las vías respiratorias bajas.
$PM_{2.5}$	Partículas finas (menores de $2,5 \mu m$ ) con capacidad para ingresar y depositarse en los pulmones.
Ultra finas	Partículas menores de $0,1 \mu m$ que ingresan al sistema circulatorio.

#### Ozono ( $O_3$ ) troposférico

Es un contaminante secundario que se forma por efecto de la radiación solar sobre contaminantes primarios tales como dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) y compuestos orgánicos volátiles (COV). Su efecto altamente oxidante causa irritación en las mucosas, ojos y pulmones; dolor de cabeza, garganta y pecho con mayor efecto negativo en adultos mayores [3].

#### Normatividad colombiana sobre calidad de aire

Las concentraciones máximas permisibles para cada uno de los contaminantes considerados en este trabajo según la normatividad ambiental de Colombia [4] se presentan en la tabla 2. En el caso de ozono, ppm significa partes por millón por volumen. Cuando las concentraciones se expresan en  $\mu g/m^3$ , la norma corresponde al valor equivalente a presión normal nivel del mar y a  $20 \text{ }^\circ C$ .

**Tabla 2** Niveles máximos permisibles, concentraciones y tiempos de exposición para prevención, alerta y emergencia aplicables a  $PM_{10}$  y  $O_3$  según la Resolución 601 de 2006 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia

<b>Contaminante</b>	<b>Tiempo de exposición</b>	<b>Unidades (¹)</b>	<b>Límite máximo permisible</b>	<b>Prevención</b>	<b>Alerta</b>	<b>Emergencia</b>
<b><math>PM_{10}</math></b>	Anual		70 (²)			
	24 horas	$\mu g/m^3$	150	300	400	500
<b><math>O_3</math></b>	8 horas	ppm	0,041			
		$\mu g/m^3$	80			
	1 hora	ppm	0,061	0,178	0,356	0,509
		$\mu g/m^3$	120	350	700	1000

(¹)  $\mu g/m^3$  a condiciones normales equivalentes a nivel del mar (101,3 kPa) y 25°C.

(²) Disminuirá a 60  $\mu g/m^3$  en el año 2009 y a 50  $\mu g/m^3$  en el 2011

### **Índices de calidad del aire**

Un índice de calidad del aire es un valor adimensional calculado a partir de uno o varios contaminantes criterio, representativo de los niveles o concentraciones de la contaminación atmosférica y de sus efectos en la salud, que permite a la población la comprensión oportuna y clara de la información relacionada con la calidad del aire en una zona y tiempo determinados.

Un buen índice debe tener las siguientes características [5]: Confiable: Los datos utilizados deben provenir de fuentes conocidas y autorizadas para su medición. Claro: De fácil comprensión e interpretación por la comunidad. Asequible: Información disponible en forma permanente para su consulta. Válido: Define la categoría correspondiente a la situación presente. Sensible: Discrimina los distintos niveles de variación. Disponible: Los datos básicos para la construcción del indicador deben ser de fácil obtención y sin restricciones de ningún tipo. Alcance: el indicador debe sintetizar el mayor número posible de condiciones o de distintos factores que afectan la situación descrita por dicho indicador. Adicionalmente, el índice que se propone en el

presente trabajo incorpora las siguientes características: Específico: Basado en las normas de la legislación colombiana, aunque puede ser fácilmente adaptado a otras legislaciones. Bivariante: Cuantifica los niveles bidimensionales de ozono y  $PM_{10}$  en un solo rango.

### **Metodología**

Para la construcción del índice integrado de calidad de aire se utilizan herramientas de lógica difusa como fundamento teórico. Esta técnica exige la definición de funciones de pertenencia para las variables de entrada, construcción de reglas de inferencia, realización de pruebas para determinar las mejores alternativas y “desfuzificación” (inversión) como proceso para extraer los resultados del sistema de inferencia [6]. El proceso de la elaboración del índice integrado contempla las siguientes fases:

#### **Estandarización de los contaminantes a nivel del mar**

Los valores de concentraciones de  $PM_{10}$  se expresan en  $\mu g/m^3$  y las de  $O_3$  en ppm (partes por millón por volumen). Para las ciudades colombiana-

nas, ubicadas a diferentes altitudes, temperaturas y presiones atmosféricas, las concentraciones dadas en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  deben estandarizarse con el fin de llevarlas a condiciones equivalentes a nivel del mar (101,3 kPa) y 25 °C

**Estandarización de los valores a la escalas de la Resolución 601**

Posteriormente y de acuerdo con las normas establecidas en la Resolución 601 de 2006 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia (Tabla 2) [7], los valores de concentraciones equivalentes a nivel del mar de cada uno de los dos contaminantes considerados se normalizan, interpolando linealmente, en una escala arbitraria de 0 a 500 similar a la utilizada por la EPA [8]. En esta escala normalizada, la concentración establecida en la norma a largo plazo (8 h para  $\text{O}_3$  y anual para  $\text{PM}_{10}$ ) corresponde a un índice de 50; la de corto plazo (1 h para  $\text{O}_3$

y 24 h para  $\text{PM}_{10}$ ) corresponde a 100. Los niveles de prevención, alerta y emergencia corresponden a índices normalizados de 200, 300 y 400 respectivamente. Adicionales a éstos definimos un nivel intermedio entre la norma a corto plazo y el nivel de prevención con un índice de 150, y una extensión a índice máximo de 500 con el fin de dar mayor detalle en la escala y permitir equivalencia con el índice de calidad del aire utilizado por la EPA (AQI) para contaminantes individuales. La correspondencia entre las concentraciones de la norma y los valores del índice normalizado para ozono y  $\text{PM}_{10}$ , así como las interpolaciones lineales para esta normalización, se presentan en la tabla 3: y en las ecuaciones que se muestran a continuación, donde X corresponde a la concentración equivalente a nivel del mar y condiciones normales en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y el valor calculado ( $\text{O}_3\text{n}$  o  $\text{PM}_{10\text{n}}$ ) es el índice normalizado correspondiente para cada contaminante.

**Tabla 3** Correspondencia entre las concentraciones de la norma colombiana y los valores del índice (individual) normalizado de calidad de aire para ozono y  $\text{PM}_{10}$ . Las concentraciones se expresan en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  equivalente a condiciones normales a nivel del mar

<b>Decreto 610 de 2006</b>	<b>Norma largo plazo</b>	<b>Norma corto plazo</b>	<b>Punto intermedio</b>	<b>Prevención</b>	<b>Alerta</b>	<b>Emergencia</b>	<b>Extensión</b>
Concentración $\text{O}_3$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	(8 h)	(1 h)	(1 h)	(1 h)	(1 h)	(1 h)	(1 h)
	80	120	235	350	700	1000	1300
Concentración $\text{PM}_{10}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	(anual)	(24 h)	(24 h)	(24 h)	(24 h)	(24 h)	(24 h)
	70	150	225	300	400	500	600
Índice normalizado	50	100	150	200	300	400	500

**Ecuaciones para  $\text{O}_3$**

$$O_{31} = \frac{50}{80}(X); \quad X < 80$$

$$O_{32} = \frac{(100 - 50)}{(120 - 80)}(X - 80) + 50; \quad 80 < X \leq 120$$

$$O_{33} = \frac{(150 - 100)}{(235 - 120)}(X - 120) + 100; \quad 120 < X \leq 235$$

$$O_{34} = \frac{(200 - 150)}{(350 - 235)}(X - 235) + 150; \quad 235 < X \leq 350$$

$$O_{35} = \frac{(300 - 200)}{(700 - 350)}(X - 350) + 200; \quad 350 < X \leq 700$$

$$O_3 6 = \frac{(400 - 300)}{(1000 - 700)}(X - 700) + 300; \quad 700 < X \leq 1300$$

$$O_3 7 = 500; \quad X > 1300$$

### Ecuaciones para $PM_{10}$

$$PM_{10} 1 = \frac{50}{70}(X); \quad X < 70$$

$$PM_{10} 2 = \frac{(100 - 50)}{(150 - 70)}(X - 70) + 50; \quad 70 < X \leq 150$$

$$PM_{10} 3 = \frac{(150 - 100)}{(225 - 150)}(X - 150) + 100; \quad 150 < X \leq 225$$

$$PM_{10} 4 = \frac{(200 - 150)}{(300 - 225)}(X - 225) + 150; \quad 225 < X \leq 300$$

$$PM_{10} 5 = \frac{(300 - 200)}{(400 - 300)}(X - 300) + 200; \quad 300 < X \leq 400$$

$$PM_{10} 6 = \frac{(400 - 300)}{(500 - 400)}(X - 400) + 300; \quad 400 < X \leq 600$$

$$PM_{10} 7 = 500; \quad X > 600$$

En la escala normalizada, las concentraciones de los diferentes contaminantes se pueden comparar. Por ejemplo, un valor por encima de 100 significa una concentración por encima de la máxima permitida. De hecho, esta escala constituye el índice individual más utilizado en la actualidad, que es también el adoptado por la agencia norteamericana EPA [9]. La interpretación de los rangos individuales en esta escala en cuanto a los efectos en la salud humana es la siguiente:

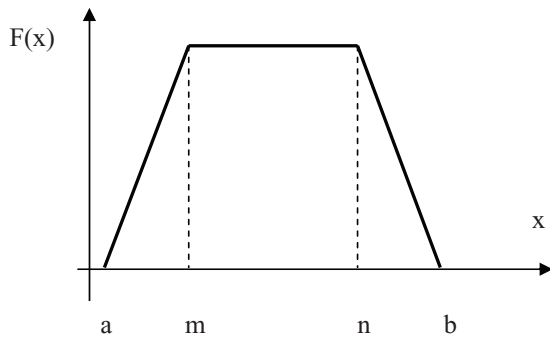
- 0 - 50: Bueno (B)
- 50 - 100: Moderado (M)
- 100 - 150: Desfavorable para grupos sensibles (DGS)
- 150 - 200: Desfavorable (D)

- 200 - 300: Muy desfavorable (MD)
- 300 - 400: Peligroso (P)
- 400 - 500: Daños significativos (DS)

### Fuzificación

Los niveles normalizados de  $O_3$  y  $PM_{10}$  a partir de mediciones simultáneas en una estación de monitoreo dada, constituyen las variables de entrada que son entonces combinadas utilizando lógica difusa para obtener el índice integrado. La idea general es que si uno de los contaminantes está en un nivel significativamente más elevado que el otro, el índice integrado se determina por el primero, pero si ambos están en niveles elevados, el estado de la calidad del aire corresponde a una categoría peor que la de los niveles individuales. Como este proceso no es una simple adición o promedio, se utiliza lógica difusa para obtener la variable de salida, que es el índice integrado.

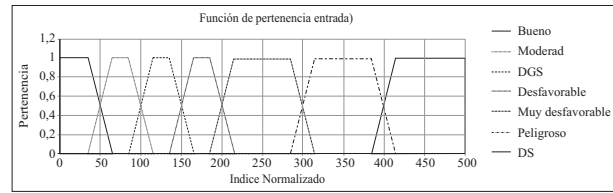
Para la implementación se utilizó el programa MATLAB a través de su *toolbox Fuzzy Logic* [10]. En ella se debe seleccionar la función de pertenencia, la cual permite la incorporación de los datos individuales normalizados a la estructura de lógica difusa, indicando el grado de pertenencia del dato (x) al conjunto difuso F. Su valor se representa por cero cuando el dato no pertenece al conjunto F; el valor de uno indica pertenencia absoluta y cualquier otro valor comprendido en el intervalo (0,1) significa pertenencia difusa. Entre las diferentes funciones de pertenencia se encuentran la de tipo triangular, trapezoidal, S, S invertida, pi, entre otras. En este caso se seleccionó la función trapezoidal con un intervalo de  $\pm 15$  unidades normalizadas alrededor del valor de la norma ambiental colombiana como se muestra en la tabla 4, incorporando de forma simple una incertidumbre experimental del 15% en las mediciones de los contaminantes individuales. La función trapezoidal se representa de acuerdo a la Figura 1 y expresiones siguientes:



**Figura 1** Función de pertenencia trapezoidal

**Tabla 4** Parámetros de la función pertenencia de entrada

<b>Categoría</b>	<b>A</b>	<b>m</b>	<b>n</b>	<b>b</b>
Bueno	0	0	35	65
Moderado	35	65	85	115
Desfavorable grupos sensitivos	85	115	135	165
Desfavorable	135	165	185	215
Muy desfavorable	185	215	285	315
Peligroso	285	315	385	415
Daños Significativos	385	415	500	500



**Figura 2** Función de pertenencia (entrada)

### Reglas de decisión

Las reglas de decisión tienen como entrada los niveles individuales de cada contaminante y establecen, mediante su relación, la salida cualificada de la calidad del aire, de tal modo que se determinan los conjuntos de salida de cada regla de acuerdo a los conjuntos de entrada. La construcción de las funciones de pertenencia se muestra en la figura 2, donde a partir del índice normalizado y el grado de pertenencia se establecen las diferentes categorías. Los conjuntos de salida o categorías definidos para la calidad del aire son: bueno, admisible, regular, malo, muy malo, pésimo y tóxico. Estas categorías agrupan los efectos sobre la salud causados por los diferentes niveles de concentración en el aire de ozono y material particulado, tal como se presentan en la tabla 5.

**Tabla 5** Efectos sobre la salud según los valores del índice integrado

<b>Categoría</b>	<b>Rango</b>	<b>Efectos sobre la salud</b>
Bueno	9-10	Corresponde a valores de concentración en el aire inferiores a los máximos permisibles para contaminantes PM <sub>10</sub> y O <sub>3</sub> establecidos en la norma. No ofrece riesgo a la salud
Admisible	8-9	Ocurre cuando al menos uno de los valores concentración de los contaminantes considerados incumple levemente la norma. Afecta grupos sensitivos con problemas respiratorios
Regular	7-8	En este escenario la población comienza a experimentar efectos en la salud y los grupos sensibles presentan efectos a la salud más severos.
Malo	6-7	Se incrementa la probabilidad de ocurrencia de síntomas y molestias respiratorias en niños activos, adultos y personas con enfermedades respiratorias.
Muy malo	4-6	Incremento de los síntomas respiratorios y recrudecimiento de las enfermedades pulmonares, efectos respiratorios en la población en general.
Pésimo	2-4	Síntomas cada vez más severos y respiración deteriorada, aumento de la gravedad de las enfermedades pulmonares. Pueden registrarse episodios críticos en la población.
Toxico	0-2	Efectos respiratorios severos, daños respiratorios en niños activos, adultos y personas con enfermedades respiratorias.

El conjunto de reglas de decisión se establece bajo los siguientes criterios y se representan en la tabla 6: **Regla 1:** Si  $O_3$  es Bueno y  $PM_{10}$  es Bueno, entonces la calidad del aire se considera BUENA. **Regla 2:** Si  $O_3$  es Moderado y  $PM_{10}$  es Moderado, entonces la calidad del aire se considera ADMISIBLE. **Regla 3:** Si  $O_3$  y  $PM_{10}$  pre-

sentan el mismo nivel (exceptuando las reglas 1 y 2), entonces la calidad del aire se cualifica en el nivel siguiente de la escala. **Regla 4:** Si  $O_3$  y  $PM_{10}$  presentan niveles diferentes, entonces la calidad del aire se cualifica en el nivel de peor impacto en la salud que se encuentre entre los dos.

**Tabla 6** Reglas para la asignación de niveles en el índice integrado a partir de los niveles individuales normalizados de los dos contaminantes considerados

Categoría			$PM_{10}$						
			B	M	DGS	D	MD	P	DS
Bueno	$O_3$	<b>B</b>	Bueno	Admisible	Regular	Malo	Muy Malo	Pésimo	Tóxico
Moderado		<b>M</b>	Admisible	Admisible	Regular	Malo	Muy Malo	Pésimo	Tóxico
Desfavorable Grupos Sensibles		<b>DGS</b>	Regular	Regular	Malo	Malo	Muy Malo	Pésimo	Tóxico
Desfavorable		<b>D</b>	Malo	Malo	Malo	Muy Malo	Muy Malo	Pésimo	Tóxico
Muy Desfavorable		<b>MD</b>	Muy Malo	Muy Malo	Muy Malo	Muy Malo	Pésimo	Pésimo	Tóxico
Peligroso		<b>P</b>	Pésimo	Pésimo	Pésimo	Pésimo	Pésimo	Tóxico	Tóxico
Daños Significativos		<b>DS</b>	Tóxico	Tóxico	Tóxico	Tóxico	Tóxico	Tóxico	Tóxico

**Desfuzificación y estandarización de la información de salida**

Los datos particulares de cada contaminante se ingresan como entrada al sistema de lógica difusa y de acuerdo a las reglas de decisión y los conjuntos difusos de salida, generan un único valor del índice integrado en una escala de 10 a 0. Esta transformación se denomina desfuzificación. Los valores correspondientes a los parámetros de la función de pertenencia de salida se muestran en

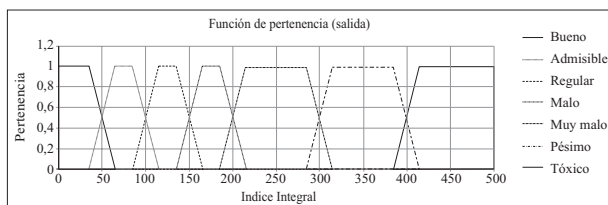
tabla 7. Nótese que en el índice integrado el valor aumenta cuando aumenta la calidad del aire, a la inversa de lo que sucede con los indicadores tradicionales que son en realidad índices de contaminación y no de calidad del aire. También se escogió muy diferente la escala de 10 a 0 para el índice integrado vs. 0 a 500 para los índices normalizados, resaltando la diferencia fundamental entre los dos índices que no son comparables, ni es el índice integrado una simple combinación lineal de los índices individuales



**Tabla 7** Salida: Parámetros de la función de pertenencia de salida

INDICE	a	m	n	b
Bueno	10	10	9,3	8,7
Admisible	9,3	8,7	8,3	7,7
Regular	8,3	7,7	7,3	6,7
Malo	7,3	6,7	6,3	5,7
Muy malo	6,3	5,7	4,3	3,7
Pésimo	4,3	3,7	2,3	1,7
Toxico	2,3	1,7	0	0

La figura 3 presenta el índice integrado con la distribución de los diferentes escenarios y su calificación cuantitativa.

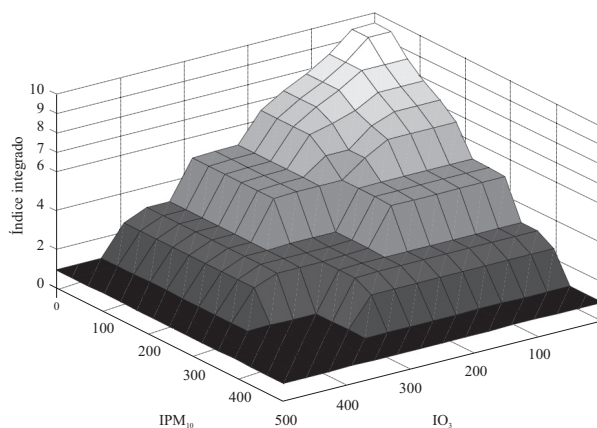


**Figura 3** Función de pertenencia (salida)

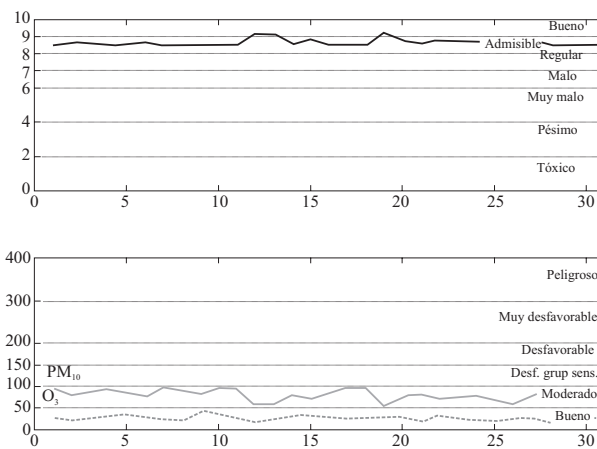
La implementación del cálculo del índice integrado se llevó a cabo utilizando el “Fuzzy Logic Toolbox” de MATLAB 7, con el método del centroide para generar un valor entre 0 y 10 (0: Tóxico, 10: Bueno). Las sinergias, producto de las combinaciones entre los niveles ozono y  $PM_{10}$  generan variaciones en el índice integrado tal como se observa en la figura 4.

### Resultados

Con el fin de validar los resultados obtenidos se realizó un análisis de las bases de datos, valores históricos y reportes de concentraciones de ozono y material particulado disponibles en los centros de documentación de los departamentos administrativos de gestión de medio ambiente de algunas ciudades colombianas (Bucaramanga y Cali) se construyó el índice integrado para estos dos municipios. Los resultados aparecen ilustrados en las figuras 5 y 6.



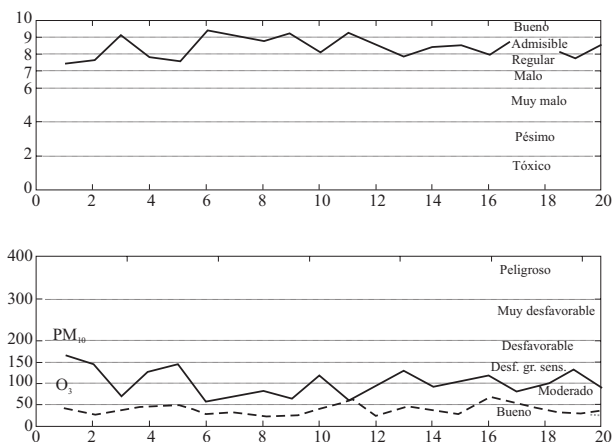
**Figura 4** Índice integrado como función de los niveles normalizados de  $O_3$  y  $PM_{10}$



**Figura 5** Índice integrado de calidad de aire para Bucaramanga correspondiente a la estación Centro, diciembre de 2006 vs. índices normalizados para  $PM_{10}$  y  $O_3$  por separado

En la parte superior de las figuras 5 y 6 se muestra el índice integrado según la metodología descrita en este trabajo. En la parte inferior se grafican los índices normalizados tradicionales para  $O_3$  y  $PM_{10}$  por separado. Puede apreciarse que, aunque evidentemente hay más información en los dos índices normalizados individuales, el índice integrado muestra las variaciones de la calidad del aire que provienen de los dos contaminantes. Cuando uno de los dos contaminantes se encuentra significativamente más elevado que el otro el

índice integrado está dominado por el primero, según las reglas de asignación. Nótese que las dos escalas son inversas: el índice integrado es mayor para una mejor calidad del aire, mientras que los índices individuales son indicadores normalizados del nivel de cada contaminante y aumentan cuando empeora la calidad del aire.



**Figura 6** Índice integrado de calidad de aire para Cali correspondiente a la estación Polideportivo El Diamante, marzo de 2006 vs. índices normalizados para  $PM_{10}$  y  $O_3$  por separado

### Conclusiones

El Índice integrado de calidad de aire puede ofrecer información clara y de fácil comprensión para la comunidad facilitando que la población tome acciones preventivas respecto a los efectos sinérgicos de alto impacto del ozono y material particulado generados por las condiciones de contaminación ambiental. La presentación del índice propuesto se da en una escala cuantitativa ascendente de 0 (Tóxico) a 10 (Bueno) y una categorización cualitativa expresada en colores de fácil interpretación. El indicador presenta ventajas sobre los usuales debido a su carácter integral al

incluir la evaluación conjunta del impacto sobre la salud de ozono y  $PM_{10}$ . El procesamiento de datos utilizado en este trabajo puede ser posible para cualquier ciudad colombiana que disponga de una red de monitoreo de aire, dado que permite adaptar en los cálculos las condiciones de altitud y presión particulares. El índice de calidad de aire permitirá a las autoridades ambientales tomar decisiones conducentes al mejoramiento ambiental y podrá generar una cultura de reducción de contaminación a efectos de prevenir futuros episodios críticos.

### Referencias

1. J. A. Rosales-Catillo, U. V. M. Torres-Meza, G. Oláis Fernández, V. H. Borja-Aburto. "Los efectos agudos de la contaminación del aire en la salud de la población: Evidencias de estudios epidemiológicos". *Salud Pública*. Vol. 43. 2001. pp. 544-555.
2. EPA. Environmental Protection Agency. *60018-841020cF*. U.S. 1992.
3. <http://epa.gov/ttn/atw/nata/ta1con.html>. Consultada el 6 de noviembre de 2007.
4. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Decreto Número (979). 03 de Abril de 2006.
5. <http://www.jccm.es/medioambiente/rvca/ica.htm>. Consultada el 12 de mayo de 2008.
6. T. Ross. *Fuzzy logic with engineering application*. Ed. Wiley. Nuevo México. 2004. pp. 90-111
7. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Decreto Número (601). Abril de 2006.
8. EPA, *Guideline for reporting of daily air quality - Air Quality Index (AQI)*, EPA-454/R-99-010. Office of Air Quality. Research Triangle Park. NC (USA). 1999. pp. 14
9. [http://www.epa.gov/airnow//aqi\\_cl.pdf](http://www.epa.gov/airnow//aqi_cl.pdf). Consultada el 11 de diciembre de 2007.
10. [http://som.yale.edu /unix /research\\_computing /pdf\\_doc /fuzzy /fuzzy\\_tb.pdf](http://som.yale.edu /unix /research_computing /pdf_doc /fuzzy /fuzzy_tb.pdf). Consultada el 14 de mayo de 2008.