

# INDICADORES DE CALIDAD DE AIRE EN MANIZALES: IMPLEMENTACIÓN Y REPRESENTACIÓN

## AIR QUALITY INDEXES IN MANIZALES: IMPLEMENTATION AND REPRESENTATION

**Jade Alexandra Li Ramírez**

Ingeniera Química, Estudiante de Maestría en Ingeniería Química, Grupo de trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, [jalir@unal.edu.co](mailto:jalir@unal.edu.co)

**Ángela María Pérez Zapata**

Estudiante de Administración de Sistemas Informáticos, Grupo de trabajo en Ambientes Inteligentes Adaptativos, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, [amperezz@unal.edu.co](mailto:amperezz@unal.edu.co)

**Néstor Darío Duque Méndez**

Doctor en Ingeniería, Docente del departamento de Informática y Computación, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, [ndduqueme@unal.edu.co](mailto:ndduqueme@unal.edu.co)

**Beatriz Helena Aristizábal Zuluaga**

Doctora en Ciencias Químicas, Docente Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, [bharistizabalz@unal.edu.co](mailto:bharistizabalz@unal.edu.co)

**Resumen:** Los índices de calidad del aire permiten a la población la comprensión oportuna y clara de la información relacionada con la calidad del aire y sus efectos sobre la salud, en una zona y tiempo determinados [1]. Para el dominio de Manizales se analizaron e interpretaron las concentraciones de cinco contaminantes atmosféricos de alta importancia al ser considerados como contaminantes criterio: (Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), Ozono (O<sub>3</sub>), Material particulado (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>)). Este análisis se realizó mostrando resultados de Índices de Calidad del Aire (ICA), siguiendo la metodología de la EPA, y excedencia de los límites normados de acuerdo con la normatividad colombiana (Resolución 610 del 2010 del MAVDT). La implementación de los indicadores se proyecta desde la aplicación de una bodega de datos, útil para evaluar y mostrar la evolución de los indicadores de manera permanente.

**Palabras clave:** Bodega de datos, Contaminación atmosférica, Índice de calidad del aire, Manizales.

**Abstract:** Air quality indexes allows people a clear and easy understanding of air quality information and its possible health effects [1]. Concentrations of five air pollutants with high importance in air quality (Carbon Monoxide (CO), Sulfur Dioxide (SO<sub>2</sub>), Ozone (O<sub>3</sub>), particulate matter (PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>)) were analyzed and interpreted in the urban area of Manizales. The analysis was done showing results of Air Quality Indexes (AQI), following EPA methodology. Besides, the exceedance limits regulated in accordance with Colombian law (Resolution 610 from 2010 of MAVDT) were evaluated. The implementation of indicators is projected since a data warehouse application, a useful tool for evaluating and showing the indicators evolution permanently.

**Keywords:** Air pollution, Air quality indexes, Data warehouse, Manizales.

### 1. INTRODUCCIÓN

El aire es una mezcla de gases que constituye la atmósfera y es un factor indispensable para la vida [2]. La creciente presencia de sustancias contaminantes en la atmósfera producto de diferentes procesos naturales y antropogénicos, en especial aquellos denominados como criterio, están asociados con efectos negativos en el entorno y principalmente en la salud humana. Se les llamó contaminantes criterio, con el objetivo de establecer niveles permisibles que protegieran el medio ambiente y el bienestar de la población [3]. Según estudios citados por el CONPES, cada año ocurren cerca de 6.000 muertes por causa de la contaminación del aire ambiente en Colombia [4].

Ante esta situación, tomar medidas correctivas para hacer cumplir la normativa no es suficiente. 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 encaminadas al sostenimiento ambiental [1].

Estas mediciones se realizan mediante un Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA) que consta de una red de estaciones de monitoreo que puede entregar cientos de datos diarios correspondientes a las concentraciones medidas de contaminantes criterio [5]. Como complemento a los SVCA se estiman los inventarios de emisiones por diferentes fuentes que también generan gran cantidad de información. El almacenamiento y procesamiento de este conjunto de datos de forma manual o por métodos convencionales, se convierte en un acto extenuante y que puede generar cierto grado de incertidumbre [6].

Teniendo en cuenta lo anterior, se buscan alternativas para el procesamiento de los datos. La bodega de datos, data warehouse, está orientada al manejo de grandes volúmenes de datos, provenientes de diversas fuentes, y que cubren largos periodos de tiempo. Además, brinda mejores formas de administrar la información, donde se disminuye redundancia, es decir, replicas innecesarias de la información y agiliza la localización de estos datos. Las bases de datos están compuestas o permiten la creación de tablas, vectores o contenedores de datos para almacenar la información necesaria. La estructura de las tablas son definidas de acuerdo al propósito de los datos a almacenar, y se pueden relacionar entre sí como lo determine el diseñador o administrador de la base de datos.

El objetivo de esta investigación se basa en generar indicadores de calidad de aire para Manizales, mediante estos analizar la calidad del aire de la ciudad y los posibles efectos sobre la población [7]. Por último se pretende representar los indicadores mediante una herramienta sistemática de cálculo (bodega de datos) que permita el almacenamiento, procesamiento y actualización constante de los datos. Además que permita graficar y obtener tendencias actualizadas según el indicador y el periodo de interés. Este trabajo en cooperación con CORPOCALDAS, pretende sistematizar la información como base para la generación de políticas, estrategias y planes de prevención y regularización de los contaminantes atmosféricos.

## 2. DESARROLLO DEL ARTÍCULO

### 2.1 Contaminantes a analizar e indicadores seleccionados

La selección de contaminantes para la elaboración de los índices fue basada en la cantidad de información disponible y en su relevancia para el área de estudio. Las concentraciones se conocieron a partir de los registros provenientes de las estaciones de monitoreo operadas entre CORPOCALDAS y la Universidad Nacional de Colombia [8]. En la Tabla I se presenta el contaminante medido, el propietario y la localización de la estación y por último la escala temporal para la que se calcularon los indicadores. Con la información proporcionada en la Tabla I se definen los indicadores a calcular: Índice de Calidad del Aire (ICA) y Excedencia de los Límites Normados (ELN) para los contaminantes  $O_3$ ,  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$ .

**TABLA I**  
**CONTAMINANTES MEDIDOS E INFORMACIÓN RELEVANTE DE SUS VARIABLES.**

Contaminante medido	Propietario	Localización espacial	Tiempo de los datos
Ozono ( $O_3$ )	Universidad Nacional	Estación Gobernación	01/07/2014-20/01/2015
Dióxido de azufre ( $SO_2$ )	Universidad Nacional	Estación Gobernación	16/07/2014-07/01/2015
Material particulado menor a 10 micras ( $PM_{10}$ )	CORPOCALDAS Universidad Nacional Universidad Nacional CORPOCALDAS CORPOCALDAS	Estación Gobernación Estación Palogrande Estación Nubia Estación Liceo Estación Milán	22/04/2009-30/12/2014 01/09/2009-14/01/2015 24/10/2009-17/01/2015 06/01/2010-12/12/2014 31/10/2012-30/12/2014
Material particulado menor a 2.5 micras ( $PM_{2.5}$ )	CORPOCALDAS	Estación Gobernación	03/06/2009-30/12/2014

## 2.2 Índices de calidad del aire (ICA)

Para el cálculo e interpretación de los ICA, se utilizó la metodología descrita en el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire publicado en 2010 por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y el Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire [9], basado en los límites mostrados en la Tabla II, establecidos por la United States Environmental Protection Agency (EPA). Estos estándares permiten establecer el estado de la calidad del aire de una región específica de acuerdo a un rango establecido para cada contaminante y a un código de colores [10].

**TABLA II**  
**PUNTOS DE CORTE ICA. TOMADA DE [9].**

ICA	COLOR	CLASIFICACION	O <sub>3</sub> 8h ppm	O <sub>3</sub> 1h ppm (1)	PM <sub>10</sub> 24h µg/m <sup>3</sup>	PM <sub>2.5</sub> 24h µg/m <sup>3</sup>	CO 8h ppm	SO <sub>2</sub> 24h ppm	NO <sub>2</sub> 1h ppm
0-50	Verde	Buena	0.000 0.059	---	0 54	0.0 15.4	0.0 4.4	0.000 0.034	(2)
51-100	Amarillo	Moderada	0.060 0.075	---	55 154	15.5 40.4	4.5 9.4	0.053 0.144	(2)
101-150	Naranja	Dañina a la salud para grupos sensibles	0.076 0.095	0.125 0.164	155 254	40.5 65.4	9.5 12.4	0.145 0.224	(2)
151-200	Rojo	Dañina a la salud	0.096 0.115	0.165 0.204	255 354	65.5 150.4	12.5 15.4	0.225 0.304	(2)
201-300	Púrpura	Muy dañina a la salud	0.116 0.373 (0.155 0.404) (4)	0.205 0.404	355 424	150.5 250.4	15.5 30.4	0.305 0.604	0.65 1.24
301-500	Marrón	Peligrosa	(3)	0.405 0.604	425 604	250.5 500.4	30.5 50.4	0.605 1.004	1.25 2.04

La metodología emplea (1) para el cálculo de los ICA:

$$I_{\text{cont}} = \frac{I_{\text{Hi}} - I_{\text{Lo}}}{BP_{\text{Hi}} - BP_{\text{Lo}}} (C_{\text{cont}} - BP_{\text{Lo}}) + I_{\text{Lo}} \quad (1)$$

Donde:

$I_{\text{cont}}$  = Índice para el contaminante

$C_{\text{cont}}$  = Concentración medida para el contaminante

$BP_{\text{Hi}}$  = Punto de corte mayor o igual a  $C_{\text{cont}}$

$BP_{\text{Lo}}$  = Punto de corte menor o igual a  $C_{\text{cont}}$

$I_{\text{Hi}}$  = Valor del Índice de Calidad del Aire correspondiente a  $BP_{\text{Hi}}$

$I_{\text{Lo}}$  = Valor del Índice de Calidad del Aire correspondiente a  $BP_{\text{Lo}}$

## 2.3 Excedencia de los límites normados (ELN)

La ELN se realiza calculando promedios aritméticos con las concentraciones medidas por las estaciones de monitoreo entre los intervalos de tiempos definidos en la Tabla III y comparando sus resultados con el nivel máximo legalmente permisible presentado en esta misma. Esta tabla es tomada de la resolución 610 del 2010 del MAVDT [11] que establece la norma de calidad del aire o nivel de inmisión para todo el territorio Colombiano a condiciones de referencia para contaminantes criterio [12].

**TABLA III**  
**NIVELES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA CONTAMINANTES CRITERIO. TOMADA DE (MAVDT 2010)**

Contaminante	Nivel Máximo Permisible (µg/m <sup>3</sup> )	Tiempo de Exposición
PST	100	Anual
	300	24 horas
PM <sub>10</sub>	50	Anual
	100	24 horas
PM <sub>2.5</sub>	25	Anual

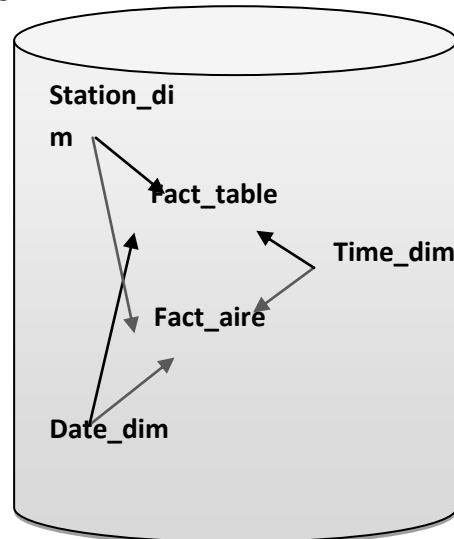
	50	24 horas
SO <sub>2</sub>	80	Anual
	250	24 horas
	750	3 horas
	100	Anual
NO <sub>2</sub>	150	24 horas
	200	1 hora
	80	8 horas
O <sub>3</sub>	120	1 hora
	10000	8 horas
CO	40000	1 hora

## 2.4 Bodega de datos

La bodega de datos, tiene una estructura llamada “Estrella Descentralizada” como se muestra en la Fig. 1, en ésta hay dos tablas denominadas como tablas de hechos y hay 3 tablas conocidas como tablas de dimensiones. Este conjunto permite realizar búsquedas de los datos desde varios enfoques o bajo diferentes características, a lo que se le denomina granularidad de las búsquedas.

Por medio de la bodega de datos, la información de calidad del aire podrá cruzarse con las variables meteorológicas que también se almacenan en esta y que se requiere para el cálculo de los indicadores a condiciones de referencia. La implementación de un plantilla de cálculo, permitió la validación de los indicadores desde la bodega de datos.

Fig. 1. ESTRUCTURA DE LA BODEGA DE DATOS



Fuente: autores

## 2.5 Visualización de los indicadores

Los indicadores se representan en tablas y en gráficas utilizando como plataforma la bodega de datos. Adicionalmente se utilizó el software R [13] junto con la librería Openair [14] para mostrar más información de los indicadores.

Con el software R, se realizaron gráficas que incorporaran de la manera más representativa los dos indicadores propuestos, ICA y ELN para cada contaminante.

Para realizar esto, se estandarizaron los valores para que ambos indicadores quedaran en la misma escala. Es decir, se tomaron las concentraciones máximas permisibles de ELN que se encuentran en µg/m<sup>3</sup> y se convirtieron a valores de ICA utilizando (1), tal como se muestra en la Tabla IV.

**TABLA IV**  
**CONVERSIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE ELN A ICA**

Contaminante	Nivel Máximo Permissible ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Tiempo de Exposición	Conversión (ppm)	Categoría equivalente al ICA	ICA
PM <sub>10</sub>	100	24 horas	---	Moderada	73
PM <sub>2.5</sub>	50	24 horas	---	Dañina a la salud para grupos sensibles	120
SO <sub>2</sub>	250	24 horas	0.096	Moderada	78
O <sub>3</sub>	80	8 horas	0.041	Buena	35

Se realizaron gráficas de: calendarios, tendencias generales y tendencias por niveles. Cada contaminante se representa por una gráfica diferente de acuerdo a su información.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Bodega de datos

En la Fig. 2 se puede ver la plataforma de generación de indicadores desde la bodega de datos donde se selecciona el contaminante, la estación de monitoreo y el rango de los años a los que se les desea calcular el indicador.

**Fig. 2. PANTALLA DE GENERACIÓN DE INDICADORES DE CALIDAD DEL AIRE DESDE LA BODEGA DE DATOS.**

Fuente: autores

El resultado de la consulta anterior presenta una tabla como la que se visualiza en la Fig. 3 donde se muestran los resultados del indicador, su clasificación, un análisis de confianza basado en el número de datos con el que se calcula y la desviación estándar con respecto al promedio de la concentración. Esta tabla se puede descargar en formato .csv.

También se puede generar la respectiva gráfica, tal como se muestra en la Fig. 4, que en este caso representa los ICA de PM<sub>10</sub> para la estación Liceo durante el año 2011, se observa que también se visualizan en escala de colores como la metodología lo sugiere.

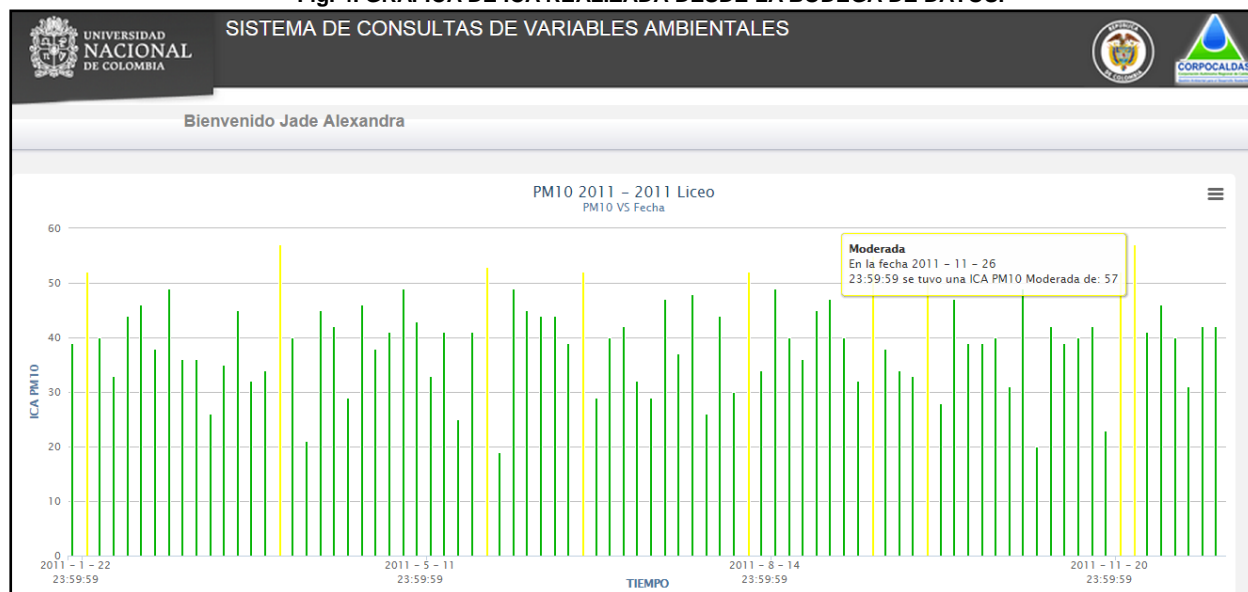
Una vez se valide la información los indicadores quedarán disponibles de forma libre para la población que requiera su consulta.

**Fig. 3. TABLA DE RESULTADOS DEL ICA CALCULADOS DESDE LA BODEGA DE DATOS**



Fuente: autores

Fig. 4. GRAFICA DE ICA REALIZADA DESDE LA BODEGA DE DATOS.



Fuente: autores

### 3.2 Análisis gráfico por contaminante

Una de las variables que se tuvo en cuenta a la hora de realizar las gráficas en el software R junto con la librería Openair fue el tiempo promedio en el que se calculan ambos indicadores, tanto el ICA como la ELN. A continuación se presenta cada contaminante con el análisis gráfico que más se adecuaba:

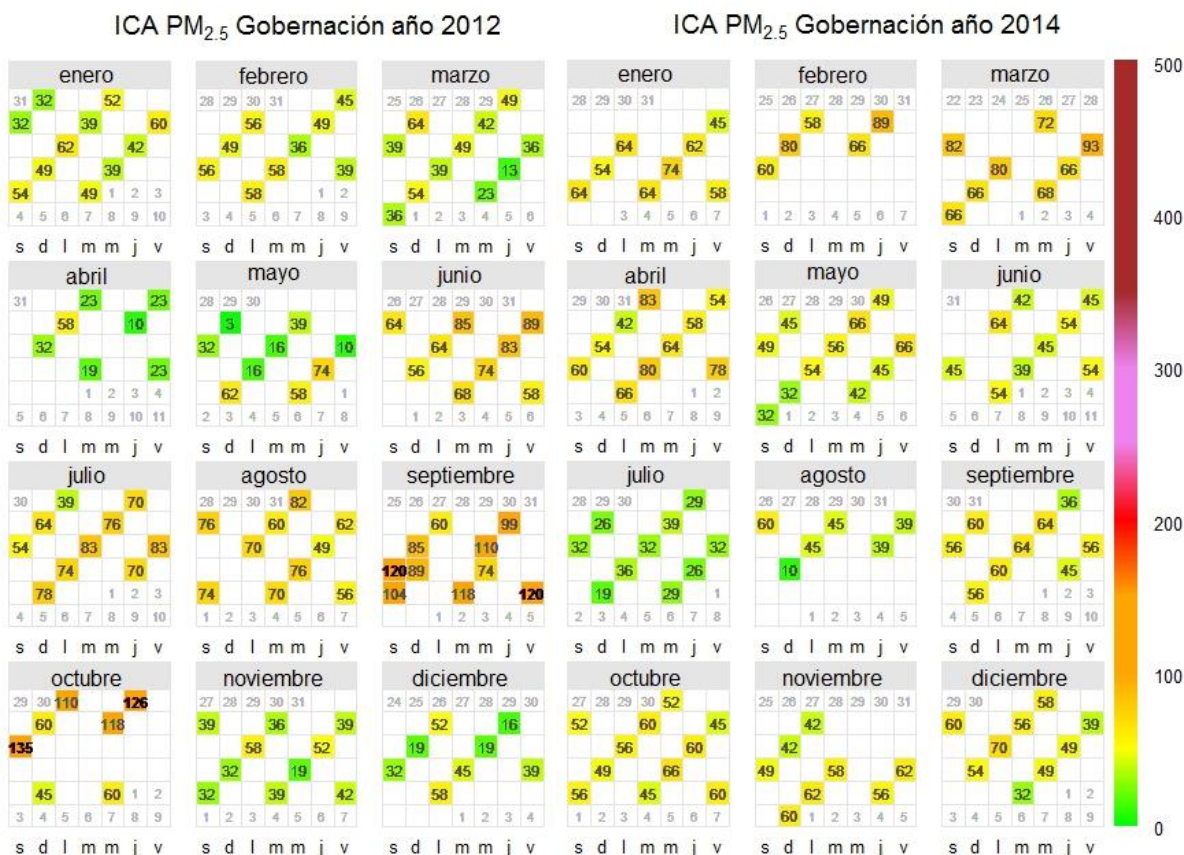
#### 3.2.1 $PM_{2.5}$

Para representar el material particulado menor a 2.5 micras se realizaron calendarios para todos los años de los que se tienen datos. En la Fig. 5 se muestran los calendarios de los años 2012 y 2014, como se puede ver, estos cuentan con una barra lateral derecha que constituye los rangos y la escala de colores que define la metodología y muestra al interior de cada día, el valor correspondiente en ICA.

Los datos resaltados son aquellos que igualan o sobrepasan los límites permisibles de la norma colombiana, en el año 2012 este suceso se repite 4 veces entre los meses octubre y septiembre, esto puede asociarse al aumento de la actividad volcánica del Nevado del Ruiz en estas fechas.

Los valores de ICA para  $PM_{2.5}$  en condiciones normales oscilan entre 30 y 60 equivalentes a las clasificaciones Buena y Moderada respectivamente, estas clasificaciones sugieren que el aire no causa efectos secundarios sobre la salud de la población que lo respira.

Fig. 5. CALENDARIOS DE INDICADORES DE CALIDAD DEL AIRE PARA  $PM_{2.5}$



Fuente: autores

### 3.2.2 $PM_{10}$

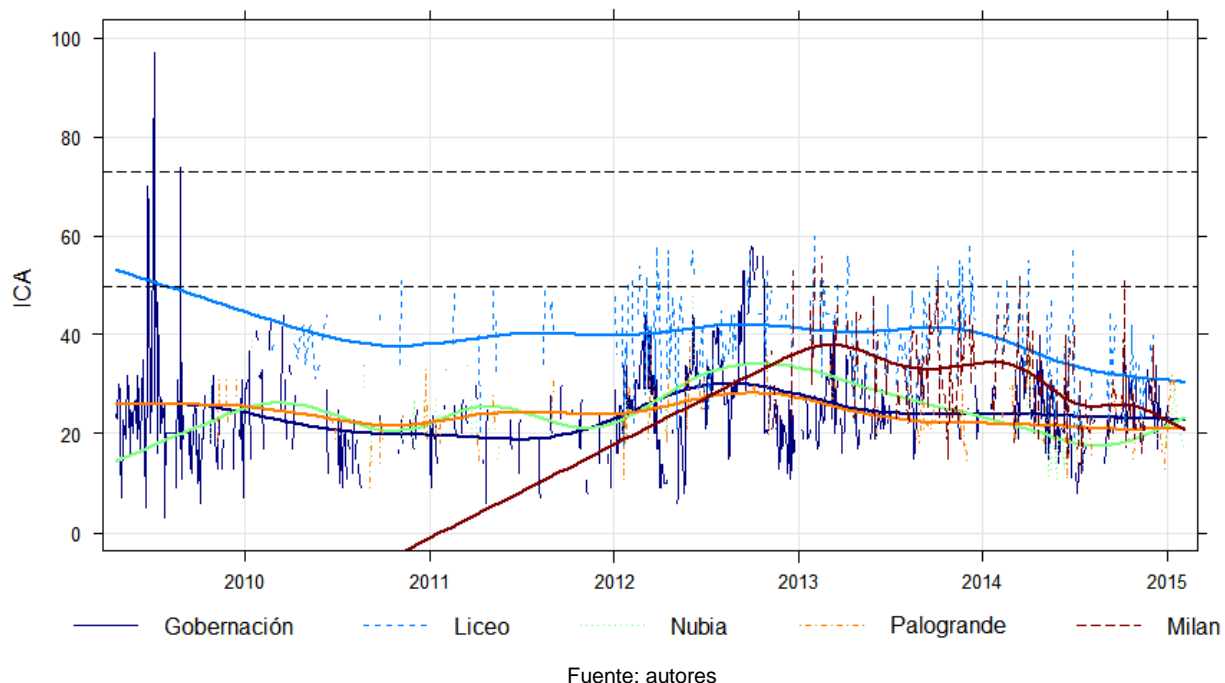
El monitoreo de material particulado menor a 10 micras se realiza en cinco puntos de la ciudad, la Fig. 6 muestra la tendencia del indicador de  $PM_{10}$  en las 5 estaciones junto con los límites que alcanzan el ICA y el límite normado colombiano.

La línea verde que cruza el eje “y” representa la categoría Buena del ICA y la línea roja representa el límite máximo permisible de la ELN.

En la gráfica es notable que la estación Liceo mantiene los valores más altos de ICA alrededor de 40 y que Nubia, Palogrande y Gobernación tienen ICAs similares durante toda la tendencia, conservando valores entre 20 y 32. Esta tendencia puede deberse a que la estación Liceo se encuentra expuesta a mayor flujo vehicular que las otras estaciones. Por otra parte, datos de las estaciones que se encuentran en el centro histórico de la ciudad (Gobernación y Liceo) sobrepasan el límite de la clasificación Buena llegando a Moderada aunque no exceden el límite máximo permisible de la normatividad colombiana.

Fig. 6. TENDENCIA DE ICA PARA  $PM_{10}$





### 3.2.3 $O_3$

Los indicadores de ozono tanto para calcular el ICA como para determinar la excedencia de los límites normados se realizan principalmente con promedios de concentración de ocho horas.

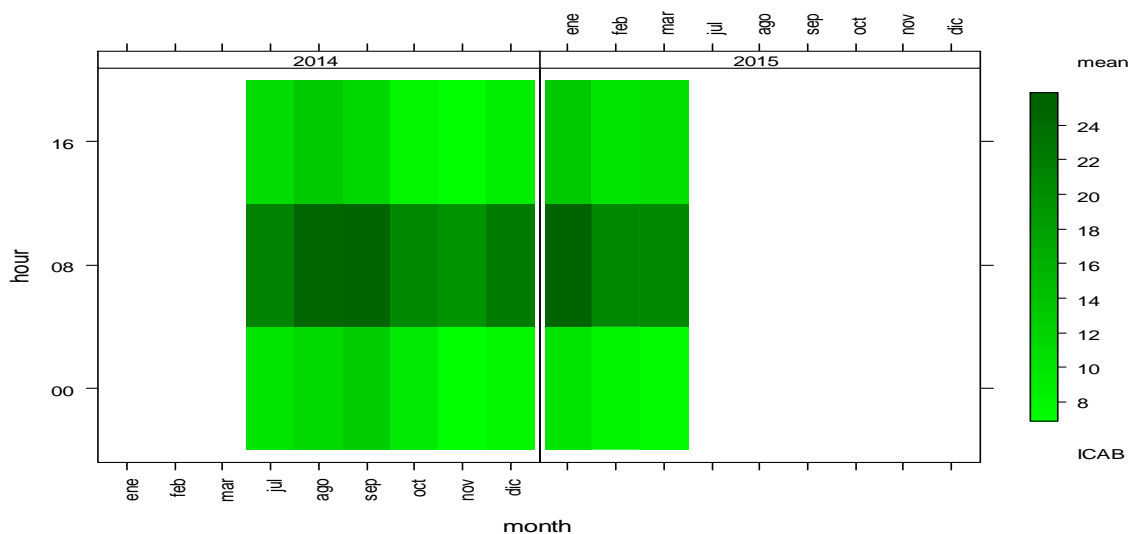
La Fig. 7 representa mediante escalas de colores los valores de ICA siendo mayores aquellos que se encuentran más aproximados a la paleta de colores roja, se puede ver que en la zona central de la gráfica, es decir entre las 8:00 y las 16:00 horas del día se concentran los valores más altos.

Teniendo en cuenta que el ozono es un contaminante secundario que se forma a partir de reacciones químicas y que su mayoría son en presencia de luz [15], estos resultados son de esperarse ya que en este intervalo de tiempo se presentan la mayor radiación solar del día, también las mayores temperaturas que promueven la reactividad en la atmosfera.

La barra lateral muestra un ICA máximo de aproximadamente 26, lo que indica que durante el periodo monitoreado, no alcanza a sobrepasar ni la ELN ni el límite superior del ICA mostrando una buena calidad del aire en Manizales.

**Fig. 7. TENDENCIA POR NIVELES DE OCHO HORAS DEL ICA DE  $O_3$**





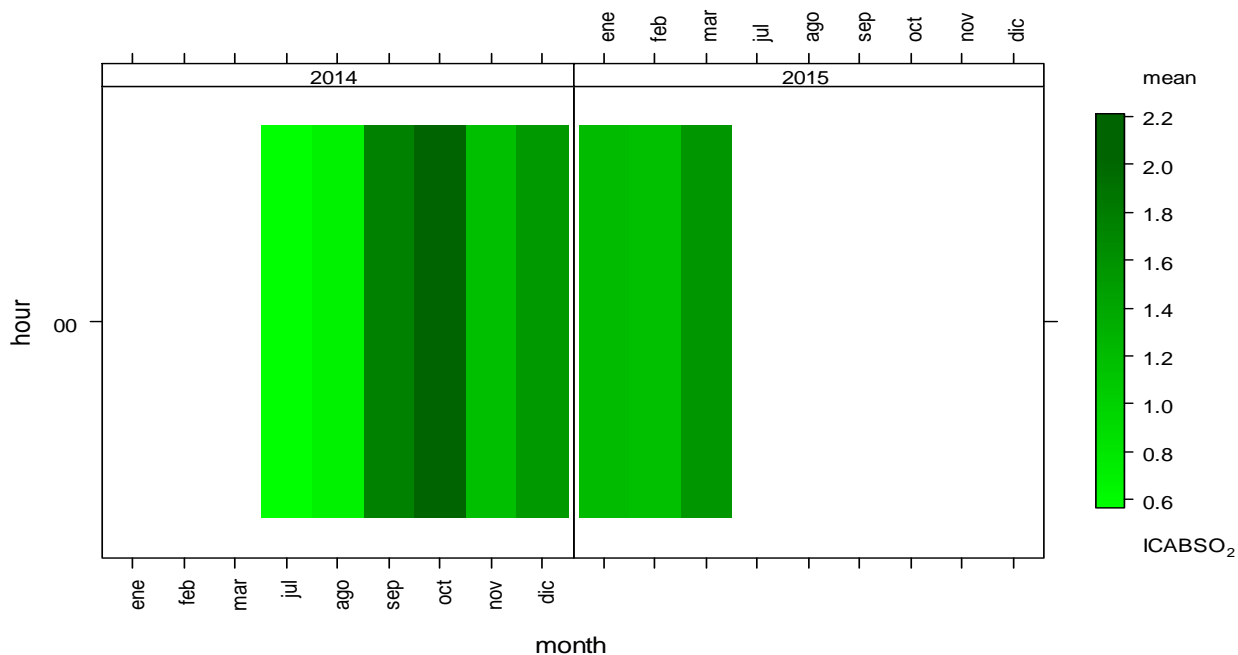
Fuente: autores

### 3.2.4 SO<sub>2</sub>

Los ICA para SO<sub>2</sub> presentan valores muy bajos como se puede observar en la barra lateral derecha de la Fig. 8 donde los promedios oscilan entre 0 y 2.2. Sabiendo esto, se entiende que el ICA permanece en una clasificación Buena y que las concentraciones son muy bajas como para sobrepasar el límite normado por la legislación colombiana. Estos bajos valores pueden obedecer posiblemente a la disminución en la concentración de azufre en el diesel, pasando de 500 ppm a solo 50 ppm a finales del 2012, así como a la implementación del pico y placa para vehículos de transporte público individual y colectivo, a principios del año 2012.

Se realizó la Fig. 8 para analizar mensualmente como varía el ICA y así conocer el comportamiento del contaminante, esta muestra claramente que el mayor valor es de 2.2 y se encuentra en el mes de octubre del año 2014. Este puede ser atribuido a actividad volcánica ocurrida en estas fechas.

Fig. 8. TENDENCIA POR NIVELES DIARIOS DEL ICA DE SO<sub>2</sub>



Fuente: autores

#### 4. CONCLUSIONES

Se implementaron los indicadores de calidad del aire ICA y ELN para los contaminantes O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y SO<sub>2</sub>. Estos se representaron por medio de diferentes tipos de gráficas realizadas utilizando el software R y por medio de una bodega de datos que aún se encuentra en construcción.

La bodega de datos es una herramienta útil capaz de almacenar información y con esta realizar cálculos y gráficas sistemáticamente. Así disminuyendo tiempos de procesamiento y evitando errores por manipulación.

Tanto los resultados de indicadores de calidad del aire (ICA) como los de excedencia de los límites normados suministran información que ayuda a comprender la calidad del aire en la zona de estudiada de manera fácil y contundente.

Los indicadores para PM<sub>2.5</sub> muestran que la calidad del aire en Manizales se ha visto afectada en ocasiones por la actividad del volcán Nevado del Ruiz, unos eventos muy evidentes se presentaron en los meses agosto y septiembre del año 2012 que llevaron a sobrepasar cuatro días los niveles máximos permisibles por la legislación. Aunque estos eventos del volcán afectan la calidad del aire en Manizales con respecto a PM<sub>2.5</sub> en condiciones normales, se presentan ICAs entre 30 y 60 que no causan efectos negativos para la salud de la población.

Los indicadores de PM<sub>10</sub> revelan que las concentraciones de cada estación no varían significativamente. Sin embargo, la estación Liceo es la que tiene los ICAs más altos, esto es factible, ya que ésta es la estación con mayor concurrencia de automóviles, especialmente de buses.

El análisis de O<sub>3</sub> cada ocho horas demuestra que las mayores concentraciones se presentan entre las 8:00am y las 4:00pm donde la radiación solar es mayor, lo cual es de esperarse ya que este contaminante se forma por reacciones fotoquímicas.

#### AGRADECIMIENTOS

Proyecto: "Implementación de indicadores de línea base ambiental y construcción de una bodega de datos para apoyar la generación y análisis de los mismos como parte de la Fase III del proyecto de estructuración de la Línea Base Ambiental del Departamento de Caldas", Corporación autónoma de Caldas, CORPOCALDAS – Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

#### REFERENCIAS

- [1] M. Jaramillo, D. E. González, and M. E. Núñez, "Índice integrado de calidad del aire para ciudades colombianas," Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia, vol. 48, pp. 97–106, 2009.
- [2] C. N. de P. E. y S. (Conpes), "Lineamientos para la formulación de la política de prevención y control de la contaminación del aire," Bogotá D. C., Colombia, 2005.
- [3] INEEC & SEMARNAT, Contaminantes criterio. Available at: <http://www.inecc.gob.mx/calair-indicadores/523-calair-cont-criterio>, 2013. [citado: 23-06-2015].
- [4] E. Sánchez, K. Ahmed, and Y. Awe, Prioridades ambientales para la reducción de la pobreza en Colombia. Un análisis ambiental del país para Colombia. Bogotá D. C.: The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank, 2006, p. 23.
- [5] F. a. a. M. de Leeuw, "A set of emission indicators for long-range transboundary air pollution," Environ. Sci. Policy, vol. 5, no. 2, pp. 135–145, Apr. 2002.
- [6] S.-T. Li and L.-Y. Shue, "Data mining to aid policy making in air pollution management.pdf," Expert Syst. Appl., vol. 27, no. 3, pp. 331–340, 2004.
- [7] J. Clench-Aas, C. Guerreiro, and A. Bartonova, Air quality indicators. Kjeller- Norway: Norsk institutt for luftforskning, 1998.
- [8] B. H. Aristizabal, J. J. Vélez Upegui, J. D. L. P. Cortés Araujo, and C. M. Gonzales Duque, "Línea Base Ambiental de Caldas: indicadores de clima y aire," in Definición de los indicadores de la línea base ambiental de caldas, 1° ed., Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2014, pp. 57–68.
- [9] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire - Manual de diseño de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire. Bogotá, D.C., Colombia, 2010.
- [10] OPS/OMS, Protocolo para la vigilancia sanitaria y ambiental de los efectos en salud relacionados con la contaminación del aire en Colombia. Colombia, 2012, pp. 171–175.
- [11] Ministerio de Ambiente Vivienda y desarrollo Territorial (MAVDT), Resolución 610, no. 610. Colombia: Resolución 601 del 4 de abril del 2006, 2010, pp. 1–8.

- [12] IDEAM, "Documento soporte norma calidad del aire," Ley 610 del 2010, Bogotá, Colombia, 610, 2005.
- [13] R Core Team, R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2015. URL <http://www.R-project.org/>.
- [14] Carslaw, D.C. and K. Ropkins, openair an R package for air quality data analysis. *Environmental Modelling & Software*. Volume 27-28, 52-61, 2012.
- [15] D. W. Purves, J. P. Caspersen, P. R. Moorcroft, G. C. Hurtt, and S. W. Pacala, "Human-induced changes in US biogenic volatile organic compound emissions: evidence from long-term forest inventory data," *Glob. Chang. Biol.*, vol. 10, no. 10, pp. 1737–1755, Oct. 2004.