



Ingeniería

ISSN: 0121-750X

revista_ing@udistrital.edu.co

Universidad Distrital Francisco José de
Caldas
Colombia

Riveros Varela, Carlos Alberto; Melgarejo Rey, Miguel Alberto; Riveros Varela, Andrea;
Alvarado Nieto, Luz Deicy

Sistema Difuso Evolutivo para la Predicción del Nivel de Contaminación del Aire por
Material Particulado: Caso Puente Aranda (Bogotá)

Ingeniería, vol. 17, núm. 2, 2012, pp. 55-62

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=498850175006>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Sistema Difuso Evolutivo para la Predicción del Nivel de Contaminación del Aire por Material Particulado: Caso Puente Aranda (Bogotá)

Genetic Fuzzy System for the prediction of air pollution level by Particulate Matter – Case study: Bogotá

**Carlos Alberto
Riveros Varela**

Universidad Distrital
Francisco José de Caldas
Ingeniería de Sistemas
carlosriveros@ieee.org

**Miguel Alberto
Melgarejo Rey**

Universidad Distrital
Francisco José de Caldas
mmelgarejo@ieee.org

**Andrea
Riveros Varela**

Universidad Nacional
Abierta y a Distancia
Ingeniería Ambiental
sariverosv@unadvirtual.
edu.co

**Luz Deicy
Alvarado Nieto**

Universidad Distrital
Francisco José de Caldas
lalvarado@udistrital.edu.co

Resumen

En este artículo se propone la utilización de un Sistema Difuso Evolutivo para realizar la predicción a corto plazo de niveles de contaminación del Aire. Se presenta la aplicación sobre un caso puntual en Bogotá, Colombia, para predecir el nivel de contaminación por Material Particulado (PM10) para el día siguiente, a partir de las mediciones de temperatura, velocidad y dirección del viento, lluvia y nivel de PM10 del día actual.

Los resultados obtenidos muestran que es posible predecir de manera satisfactoria el nivel de contaminación por PM10 utilizando un Sistema Difuso Evolutivo con un número reducido de reglas, lo que permitiría su fácil interpretación.

Palabras clave: Aire, Algoritmo Genético, Niveles de Contaminación, Predicción, Sistema Difuso Evolutivo.

Abstract

This paper proposes the application of a Genetic Fuzzy System for prediction of air pollution levels in the short term. The method is validated for the specific case of Bogotá, Colombia, where the pollution level of particulate matter (PM10) for the next day is predicted from several variables such as temperature, speed and direction of wind, rain and level of PM10 of the current day.

The results show that it is possible to obtain a satisfactory prediction of the level of contamination by PM10 using a Genetic Fuzzy System with a small number of rules, which would yield an easy human interpretation.

Key words: Air, Genetic Algorithm, Genetic Fuzzy System, Pollution level, Prediction.

1. Introducción

La contaminación ambiental ha tenido creciente interés por repercusiones en la salud de los habitantes de regiones afectadas por este fenómeno.

En la ciudad de Bogotá la contaminación atmosférica se ha constituido en uno de los principales problemas ambientales. El deterioro de la calidad del aire en la ciudad ha propiciado el incremento de efectos negativos en la salud, siendo causante del incremento de casos por Enfermedad Respiratoria

Aguda (ERA) (conjunto de morbilidades que afectan al sistema respiratorio), causa muy frecuente de mortalidad en niños y niñas menores de cinco años [1] [2].

En Bogotá, en el año 1967 se instalaron las primeras redes para el monitoreo de la calidad del aire [3]. Desde el año 1997 la ciudad cuenta con una Red de Monitoreo de la Calidad del Aire (RMCAB) que se encarga de hacer seguimiento en tiempo real de las concentraciones de Material Particulado en sus fracciones respirable (PM10), fina (PM2.5) y total (PST), gases contaminantes como dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), monóxido de carbono (CO) y ozono (O₃) y las variables meteorológicas de precipitación, viento, temperatura, radiación solar y humedad relativa [4] [2].

Actualmente la RMCAB cuenta con 15 Estaciones entre las que se encuentran Escuela, Corpas, Bosque, Carrefour, Santo Tomas, IDRD, MAVDT, Fontibón, Puente Aranda, Kennedy, Vitelma, Sony, Cazuca y Tunal.

Un análisis realizado en [4] utilizando los registros contenidos en la RMCAB muestra que contaminantes como óxidos de azufre, de nitrógeno y de monóxido de carbono, no representan en la actualidad para Bogotá un problema significativo de contaminación del aire. Sin embargo, concentraciones atmosféricas de PM10 tienden a encontrarse por encima de los niveles sugeridos por las normas de calidad del aire [5].

Un estudio realizado por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial en el año 2010, muestra que para todas las estaciones de monitoreo de calidad del aire de Bogotá, la que presenta niveles más altos de PM10 es la ubicada en la localidad de Puente Aranda, como se aprecia en la Figura 1. Esto junto con las estadísticas mostradas en [1] y [2] acerca de los efectos que tiene el nivel de PM10 en enfermedades respiratorias sobre la población, y la ausencia, a nuestro conocimiento, de modelos de predicción del nivel de este contaminante para cualquier intervalo de tiempo, en Colombia y específicamente para la ciudad de Bogotá, ameritan la necesidad de diseñar un sistema de predicción diario de PM10 para esta zona.

Alrededor de este problema se han desarrollado investigaciones utilizando distintas herramientas y algoritmos. En uno de ellos [6], se realiza una comparación entre un modelo de Red Neuronal con función de activación tipo sigmoide con el algoritmo Backpropagation y un modelo lineal, para pronosticar el nivel de PM10 máximo del día siguiente y posteriormente ser clasificado como bueno, malo o crítico. En otro [7], se diseña un sistema de tiempo real utilizando una Red Neuronal tipo Feed Forward con el algoritmo Backpropagation, siete entradas y diez neuronas en la capa oculta, para predecir los niveles de SO₂, PM10 y CO de los tres días siguientes. Finalmente en [8] emplean el método de Análisis de Componentes Principales y Redes Neuronales para predecir los niveles de PM10 y PM2.5 en Thessaloniki y Helsinki.

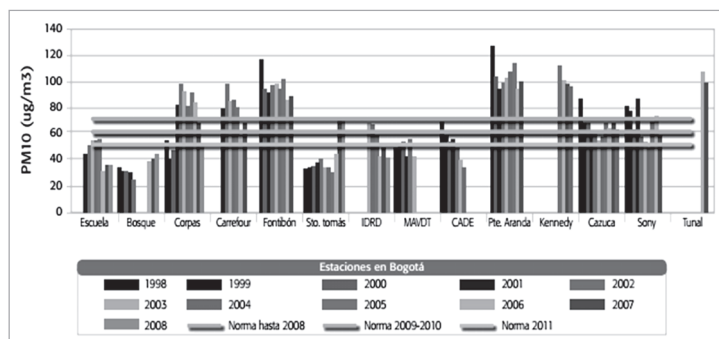


Figura 1. Evolución anual desde el año 1998 hasta el 2008 del nivel de PM10 en las diferentes estaciones de monitoreo de la calidad del aire de Bogotá. Tomado de [2].

En este artículo se propone la utilización de un Sistema Difuso Evolutivo para realizar la predicción de niveles de contaminación del aire. Se presenta la aplicación sobre el caso puntual de Puente Aranda en Bogotá, para predecir el nivel de contaminación por PM10



del día siguiente, a partir de las mediciones de temperatura, lluvia, velocidad y dirección del viento y PM10 del día actual. Este tipo de sistema podría generar alertas que permitan poner en marcha planes de contingencia por niveles de riesgo de PM10 en este sector.

En la sección 2 de este artículo se presentan los preliminares, donde se incluye la descripción del área de estudio e información acerca de la calidad del aire y del Material Particulado. En la sección 3 se expone el diseño de la solución propuesta y las características del Sistema Difuso Evolutivo. En la sección 4 se presenta la descripción de los datos y variables empleadas en este trabajo junto con sus gráficas. En la sección 5 se muestran los resultados de las pruebas realizadas y se analizan. Finalmente, en la sección 6 se presentan las conclusiones y se generan recomendaciones sobre trabajos futuros.

2. Preliminares

2.1. Localidad de Puente Aranda

La localidad de Puente Aranda cuenta con una superficie de 1,731.1 hectáreas (ha) y se encuentra situada en el sector central de Bogotá. Es el epicentro de la actividad industrial de la capital y de gran importancia a nivel nacional. Las principales industrias están relacionadas con la elaboración y procesamiento de plásticos, textiles, químicos, metalmecánica, gaseosas, tabaco, concentrados e industrias alimenticias [9].

2.2. Material Particulado

El Material Particulado lo producen los motores de ciclo diesel y la combustión incompleta de combustibles sólidos como la madera y el carbón [10]. Está constituido por partículas sólidas y líquidas suspendidas en el aire que tienen una composición química diversa y su tamaño varía de $0.005 \mu\text{m}$ a $100 \mu\text{m}$ de diámetro aerodinámico.

Las que más afectan la salud son aquellas que constituyen la fracción respirable, con diámetro menor a $10 \mu\text{m}$ (PM10) y todavía en mayor grado las menores a $2.5 \mu\text{m}$ (PM2.5). El deterioro de la calidad del aire se constituye en un determinante de afectación a la salud, específicamente en las etapas de ciclo vital infancia y vejez. Trae enfermedades de origen respiratorio y cardiovascular principalmente, y otras de tipo nervioso y dermatológico con evidencia menos fuerte [11].

La gráfica de los niveles de PM10 de la localidad de Puente Aranda, extraídos del sitio web de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá [18], en el intervalo del primero de Enero hasta el 22 de Noviembre del año 2012, se muestra en la Figura 2.

2.3. Calidad del Aire

La calidad del aire es un factor determinante en la calidad de vida de la población, especialmente en las grandes urbes, debido a los efectos que tiene sobre la salud humana [9].

Tabla I. Características del Algoritmo Genético

Característica	Valor
Número de experimentos	100
Número de generaciones	1000, 3000
Tamaño de población	30, 60
Número de individuos intermedios	60, 120
Probabilidad de cruce	0.7
Probabilidad de mutación	0.01
Criterio de parada	Número de generaciones
Función de desempeño	Raíz del Error Medio Cuadrático

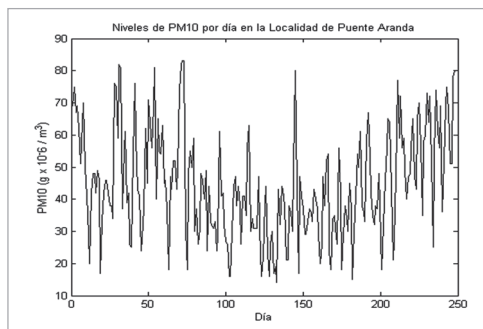


Figura 2. Niveles de PM10 en μm^3 de la localidad de Puente Aranda para cada uno de los días, en el intervalo del primero de Enero hasta el 22 de Noviembre del año 2012. Datos extraídos de [18].

Una de las problemáticas de la localidad de Puente Aranda es la mala calidad del aire asociada con altas concentraciones de PM10 y gases, como consecuencia de las emisiones atmosféricas de las industrias y los vehículos de transporte pesado y público colectivo que circulan por la zona [11].

3. Método

El modelo solución que se propone consiste en un Sistema Difuso Evolutivo compuesto por un Algoritmo Genético encargado de sintonizar los parámetros (centros, medias y desviaciones estándar) de un Sistema Difuso. Los Algoritmos Genéticos han demostrado ser una herramienta poderosa para la generación de reglas difusas. En muchos trabajos acerca de la generación de reglas para Sistemas Difusos a través de Algoritmos Genéticos se reportan mejores resultados cuando se compara con otros métodos [12].

3.1. Sistema Difuso

Una Expansión de Funciones de Base Difusa (EFBD) es una forma de representar un Sistema Difuso, donde un vector de entrada se relaciona con una salida puntual como se muestra en la Ecuación (1). Esta ecuación representa de manera compacta el proceso de inferencia en un Sistema Difuso y la función resultante es un estimador universal [13] [14].

Las características del Sistema Difuso empleado en este trabajo son las siguientes y están representadas por las ecuaciones (1), (2) y (3):

- Fuzificación tipo singleton¹.
- Motor de inferencia producto.
- Defuzificación por promedio de centros.
- T-norma definida como el producto.
- Funciones de pertenencia Gaussianas.

$$y(x) = f(x) = \sum_{i=1}^M y_i \phi_i(x) \quad (1)$$

$$\phi_i(x) = \frac{\prod_{j=1}^N \mu_{A_j}^l(x_j)}{\sum_{i=1}^M \prod_{j=1}^N \mu_{A_j}^l(x_j)} \quad (2)$$

$$\mu_{A_j}^l(x_j) = e^{-\frac{(x_j - c_j^l)^2}{2(\sigma_j^l)^2}} \quad (3)$$

Donde el índice l hace referencia a la l -ésima regla, siendo M el total de reglas. El índice i hace referencia a la i -ésima variable de entrada y N al total de las mismas.

Teniendo en cuenta que se tienen N entradas y M reglas, y que cada regla tiene dos parámetros del conjunto antecedente (media y desviación estándar) y un centro en el consecuente, la cantidad de parámetros que definen el Sistema Difuso se define por la Ecuación (4).

$$P = 2MN + M \quad (4)$$

Para el Sistema Difuso se seleccionan como número de reglas los valores 4 y 8 con el objetivo de realizar experimentos cuyos resultados permitan concluir el mejor número de reglas para el modelo propuesto, y además, ser un número reducido que permita su interpretabilidad, que es la principal ventaja que presentan los Sistemas Difusos. Como cantidad de datos de entrada (N)

¹ En términos computacionales es el fusificador más sencillo de todos.



se encuentran 5 atributos que se describirán en la sección 4. Para el caso de 4 reglas se tienen 44 parámetros a encontrar ($P = 2 \cdot 4 \cdot 5 + 4$) para el Sistema Difuso y para el de 8 reglas se tienen 88, según la Ecuación (4). En la Tabla II se presenta el resumen de las características del Sistema Difuso.

Tabla II. Características del Sistema Difuso

Característica	Valor
Número de reglas	4, 8
Número de entradas	5

3.2. Algoritmos Genéticos

Los Algoritmos Genéticos son una de las ramas de la Computación Evolutiva que se desarrolló a finales de los años 60. Estos algoritmos, basados en la teoría Darwiniana de la evolución natural de las especies [15], fueron introducidos por John Holland y son ampliamente usados en el desarrollo de problemas de optimización y de aprendizaje computacional.

El principio biológico de la evolución planteado por Darwin, es utilizado para realizar una búsqueda aleatoria dentro del espacio solución de un problema a través de individuos (también llamados cromosomas), que conforman una población, y sobre los cuales se realizan las siguientes operaciones [16]:

- Mutación
- Recombinación
- Selección

Cada uno de los individuos o cromosomas es un candidato solución del problema. Estos son formados por genes cuya codificación puede ser de tipo binaria, entera, de valores reales, entre otros; siendo la más común la de tipo binaria. Para este caso específico la codificación utilizada es de valores reales positivos.

3.2.1. Mutación

Consiste en modificar aleatoriamente el valor de uno de los genes de un individuo dentro de una población. El objetivo es permitir la exploración por el espacio de búsqueda, evitando la obtención únicamente de óptimos locales. Para este caso específico se modifica el valor de uno de los genes (parámetros) seleccionado aleatoriamente dentro del cromosoma por otro valor, igualmente aleatorio.

3.2.2. Recombinación

Radica en la selección aleatoria dentro de la población de dos individuos (progenitores), para generar dos nuevos descendientes. En este caso, los descendientes son formados por el promedio aritmético de sus progenitores.

3.2.3. Selección

Se basa en la elección de los mejores individuos que conforman una población para conformar la siguiente generación, a través de una función de aptitud (*fitness*) y un algoritmo. Los individuos con mejor aptitud tienen una probabilidad mayor de ser seleccionados por el algoritmo empleado, donde el más común es el de selección por ruleta [17].

En este caso de estudio la inicialización de los individuos es aleatoria con codificación de valores reales positivos, la operación de selección usada es el algoritmo de selección por ruleta, y como función de aptitud se emplea el criterio de la Raíz del Error Medio Cuadrático (RMSE) calculada entre la salida proporcionada por el Sistema Difuso Evolutivo y el valor esperado (5).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - y_i)^2} \quad (5)$$

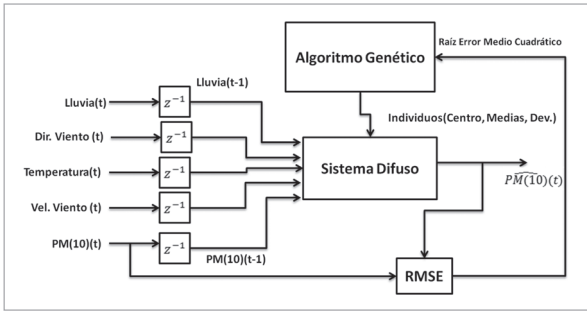


Figura 3. Modelo solución propuesto para la predicción de los niveles de PM10.

Otras características como tamaño de población, probabilidad de cruce y de mutación del Algoritmo Genético se muestran en la Tabla I.

Con el modelo solución propuesto que se muestra en la Figura 3, se ejecutan 100 experimentos: primero para 1000 generaciones con 30 y 60 individuos y posteriormente para 3000, ambos casos con 4 y 8 reglas para el Sistema Difuso.

4. Experimentos

4.1. Datos

Estos abarcan desde el primero de Enero hasta el 22 de Noviembre del año 2012, son de libre acceso y fueron extraídos del sitio web de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá [18], con una frecuencia de 24 horas (debido a la resolución número 610 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial que rige los niveles máximos permisibles para contaminantes criterio por un tiempo de exposición de 24 horas [2]), es decir un total de 325 registros.

De los registros se descartan aquellos donde existe algún valor faltante para alguna las variables, resultando un total de 255 registros; además se descartan valores por encima o por debajo de $\mu \pm 2\sigma$ para cualquiera de las variables (donde μ representa la media y σ la desviación estándar de la respectiva variable), resultando un total de 248 registros.

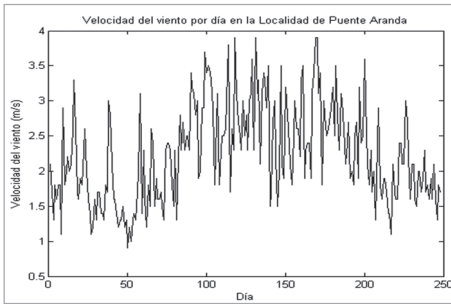


Figura 4. Velocidad del viento en m/s, para la localidad de Puente Aranda en el intervalo del primero de Enero hasta el 22 de Noviembre del año 2012.

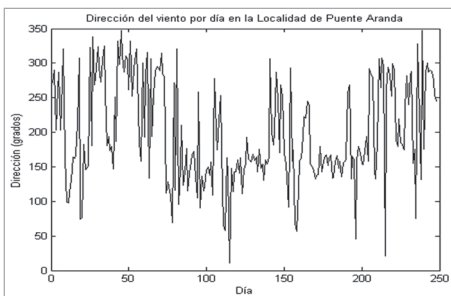


Figura 5. Dirección del viento en grados, para la localidad de Puente Aranda del primero de Enero hasta el 22 de Noviembre del año 2012.

Las variables consideradas son: Velocidad del viento que se presenta en la Figura 4, dirección del viento mostrada en la Figura 5, temperatura en la Figura 6 y lluvia en la Figura 7. A estas variables se adiciona la serie de tiempo del PM10, como entradas del Sistema Difuso Evolutivo como se expone también en [6] [7] [8], obteniendo un total de 5 entradas.

Para la etapa de entrenamiento se utiliza el 70% de los datos disponibles, es decir 174, y para la validación el 30% restante.

5. Resultados

Los resultados de la Raíz del Error Medio Cuadrático (RMSE) máximo, mínimo, promedio y desviación estándar de los experimentos realizados se muestran en la Tabla III. La unidad de medida del RMSE es $\mu g / m^3$. El mejor resultado se encuentra resaltado.

En la Figura 8 se presenta el resultado de entrenamiento (línea punteada) y de validación (puntos) utilizando 3000 generaciones, una población de 60 individuos y 8 reglas para el Sistema Difuso Evolutivo propuesto. Se observa que para

este caso, conservando la misma cantidad de generaciones y el mismo tamaño de población, el incremento en el número de reglas que componen el Sistema Difuso produce una disminución en el valor del RMSE. Cuando se incrementa el número de reglas de 4 a 8, con 3000 generaciones y una población de 60 individuos en ambos casos, el RMSE máximo disminuye un 70.94%, el RMSE promedio un 6.89% y la desviación estándar un 81.43%.

También se encuentra que el incremento en el tamaño de la población, conservando el mismo número de reglas y de generaciones, mejora en muy pocos casos los resultados de la propuesta.

Finalmente, en este trabajo, el incremento en el número de generaciones no es concluyente respecto a la disminución del RMSE.

6. Conclusiones

A diferencia de lo reportado en la literatura acerca de predicción de niveles de contaminación, donde la utilización de Redes Neuronales es la principal herramienta, en este trabajo se ha presentado una propuesta para la predicción del nivel de contaminación del aire por Material Particulado (PM10) empleando un Sistema Difuso Evolutivo con resultados satisfactorios.

Se presentó una aplicación específica para la Localidad de Puente Aranda (Bogotá, Colombia), empleando la propuesta expuesta, donde se obtuvo como mejor resultado un RMSE promedio de $14.23 \mu\text{g} / \text{m}^3$.

En este caso en particular, se encuentra que incrementando el número de reglas de 4 a 8 se obtiene un RMSE más pequeño, manteniendo una población de 60 individuos y 3000 generaciones. Se sugiere aumentar el número de reglas a 16 para observar si mejora el valor del RMSE, esto con el fin de no perder la interpretabilidad del sistema debido a un número muy grande de reglas.

Actualmente se está trabajando en la interpretabilidad de las reglas obtenidas para este caso de estudio y en la implementación de un software para dispositivos móviles que permita la predicción de niveles de PM10. Como recomendaciones para trabajos futuros se sugiere la implementación de la sintonización de parámetros del Sistema Difuso utilizando Evolución Diferencial para comparar los resultados de esta investigación, debido a que este método ha presentado buenos resultados en otros trabajos realizados anteriormente [19] [20].

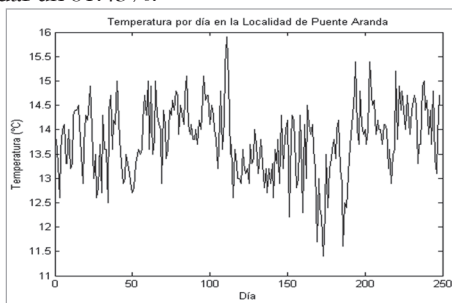


Figura 6. Temperatura en °C de la localidad de Puente Aranda, en el intervalo del primero de Enero hasta el 22 de Noviembre del año 2012.

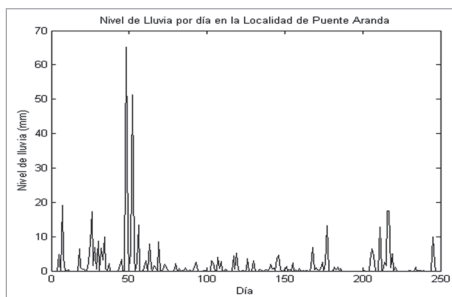


Figura 7. Nivel de lluvia en mm de la localidad de Puente Aranda del primero de Enero hasta el 22 de Noviembre del año 2012.

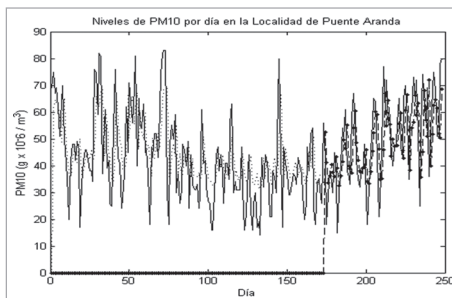


Figura 8. Resultado del entrenamiento (línea punteada) y validación (puntos) del Sistema Evolutivo Difuso formado por 8 reglas, 3000 generaciones y población de 60 individuos.

Tabla III. Resultados

Reglas	Generaciones	Población	RMSE	RMSE	RMSE	Desviación
			Máximo	Mínimo	Promedio	RMSE
4	1000	30	46.7813	13.599	15.6878	4.5450
		60	38.3504	12.9846	15.2315	3.0065
	3000	30	77.7424	13.3154	15.4067	6.9776
		60	84.5232	13.0982	15.2833	7.1690
8	1000	30	24.3339	13.3990	15.000	1.4903
		60	33.0174	13.5150	14.6345	1.9480
	3000	30	37.6613	13.2570	14.6530	2.7549
		60	24.5560	13.1744	14.2301	1.3312

Agradecimientos

A la Rama Estudiantil IEEE de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas por el préstamo de sus equipos de cómputo para realizar algunos de los experimentos encontrados en este trabajo y el de su sala de estudio donde fueron escritas muchas de estas líneas, a Jonathan Camilo Meneses Sánchez por sus aportes iniciales y a la Secretaría Distrital de Ambiente y la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá por la disponibilidad pública de los datos empleados.

Referencias bibliográficas

- [1] Hospital del Sur E.S.E Observatorio de Salud Ambiental de Bogotá, *Boletín Epidemiológico Mensual de la Relación entre Calidad del Aire y Salud*, Enero 2012.
- [2] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, *Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire*, Bogotá D.C. 2010. 48 p.
- [3] Sánchez, E.; Herrera, C., "Contaminación Atmosférica", *La Contaminación Industrial en Colombia*. DNP. PNUD. Bogotá, 1994.
- [4] Gaitán, M.; Cancino, J.; Behrentz, E., "Análisis del estado de la calidad del aire en Bogotá", *Revista de ingeniería Universidad de los Andes*. Bogotá, Colombia, 2007.
- [5] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, *Resolución número 610*, 2010.
- [6] Perez, P.; Reyes, J., "An integrated neural network model for PM10 forecasting", *Atmospheric Environment* 40, 2006.
- [7] Kurt, A.; Gulbagci, B.; Karaca, F.; Alagha, O., "An online air pollution forecasting system using neural networks", *Environment International*, Volumen 34, 2008, pp. 592-598.
- [8] Voukantsis, D.; Karatzas, K.; Kukkonen, J.; Räsänen, T., "Intercom-parison of air quality data using principal component analysis, and forecasting of PM10 and PM2.5 concentrations using artificial neural networks", *Science of the Total Environment* 409, 2011.
- [9] Secretaría Distrital de Planeación, *21 monografías de las localidades: Localidad 16 Puente Aranda*, 2011.
- [10] Sbarato, D.; Sbarato, V., *Contaminación del aire*, Encuentro Grupo Editor. Argentina, 2009.
- [11] Álvarez, A., *Diagnostico ambiental local Puente Aranda*, Alcaldía Local De Puente Aranda Y Sistema Ambiental Local, 2012.
- [12] Castro, P.A.D.; Camargo, H.A., "Focusing on Interpretability and Accuracy of a Genetic Fuzzy System", *Fuzzy Systems, 2005. FUZZ '05. The 14th IEEE International Conference*, 2005, pp. 696-701.
- [13] Melgarejo, M.; Prieto, A.; Ruiz, C., "Modelado de Sistemas Difusos Basado en el Algoritmo Genético Compacto." *Proceedings Of The 2011 Argentine Symposium On Artificial Intelligence* pp. 180 - 191, 2011.
- [14] Wang L. X., *A course in fuzzy systems and control*, Prentice Hall, 1997.
- [15] Holland, J.A., *Adaptation in Natural and Artificial System*, Ann Arbor: The University of Michigan, 1975.
- [16] Mitchell, M., *An Introduction to Genetic Algorithms*, A Bradford Book The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1999.
- [17] Goldberg, D. E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison/Wesley, 1989.
- [18] Red de monitoreo de calidad del aire. Disponible online en: <http://201.245.192.253:81>
- [19] Villate, A.; Rincon, D. E.; Melgarejo, M. A., "Sintonización de sistemas difusos utilizando evolución diferencial," *IEEE XVIII International Congress of Electronic and Systems Engineering*, pp. 1 – 8, 2011.
- [20] Melgarejo, M.; Villate, A.; Rincon, D., "Evolución diferencial aplicada a la sintonización de clasificadores difusos para el reconocimiento del lenguaje de señas," *Ingeniería y Universidad*, volumen 16, pp. 397 – 413, 2012.

Carlos Alberto Riveros Varela

Estudiante de Ingeniería de Sistemas de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Vicepresidente de la Rama Estudiantil IEEE de la Universidad Distrital y Presidente del Capítulo Estudiantil de Inteligencia Computacional de la misma. Actualmente se encuentra realizando su trabajo de grado en el Grupo de Investigación LAMIC (Laboratorio de Automática e Inteligencia Computacional). e-mail: carlosriveros@ieee.org

Miguel Alberto Melgarejo Rey

Ingeniero Electrónico graduado con honores de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Magister en Ingeniería Electrónica y Computadores, graduado con honores, de la Universidad de los Andes, Bogotá - Colombia, en cooperación con la Ecolé Polytechnique Federale de Lausanne, Suiza. Actualmente es profesor asociado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, e investigador adjunto del Grupo de Investigación LAMIC (Laboratorio de Automática e Inteligencia Computacional) en la misma Universidad. Sus áreas de interés son: Sistemas complejos, inteligencia computacional y procesamiento de señales. e-mail: mmelgarejo@ieee.org

Andrea Riveros Varela

Estudiante de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, en Bogotá, Colombia. e-mail: sariverosv@unadvirtual.edu.co

Luz Deicy Alvarado Nieto

Ingeniera de Sistemas de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Magister en Ingeniería de Sistemas de la Universidad Nacional de Colombia. Doctorado en Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial, Universidad de Oviedo. Actualmente se desempeña como profesora de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital en el Proyecto Curricular de Ingeniería de Sistemas. e-mail: laalvarado@udistrital.edu.co