



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), mayo-junio 2026,
Volumen 10, Número 3.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i3

USO DE LÓGICA DIFUSA PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE EN LA CIUDAD DE MÉXICO MEDIANTE INFERENCIA MAMDANI

**USE OF FUZZY LOGIC TO DETERMINE THE AIR QUALITY
INDEX IN MEXICO CITY USING MAMDANI INFERENCE**

Wendy Bonilla Leyva

Universidad Autónoma del Estado de México

Dora María Calderón Nepamuceno

Universidad Autónoma del Estado de México

Dra. Patricia Delgadillo Gómez

Universidad Autónoma del Estado de México

Dra. Carmen Liliana Rodríguez Paez

Universidad Autónoma del Estado de México

Uso de lógica difusa para la determinación del índice de calidad del aire en la Ciudad de México mediante inferencia Mamdani

Wendy Bonilla Leyva¹

wendy080599@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0006-3592-837X>

Universidad Autónoma del Estado de México
México

Dora María Calderón Nepamuceno

dmcalderonn@uaemex.mx

<https://orcid.org/0000-0002-4296-4049>

Universidad Autónoma del Estado de México
Pais México

Dra. Patricia Delgadillo Gómez

pdelgadillo@uaemex.mx

<https://orcid.org/0000-0001-7871-4925>

Universidad Autónoma del Estado de México
México

Dra. Carmen Liliana Rodríguez Paez

clrodriguez@uaemex.mx

<https://orcid.org/0000-0002-3856-0797>

Universidad Autónoma del Estado de México
México

RESUMEN

La evaluación de la calidad del aire en entornos urbanos representa un reto importante debido a la complejidad de los contaminantes atmosféricos y su impacto en la salud pública. En la Ciudad de México, el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) proporciona información técnica que resulta difícil de interpretar para la población general. En este trabajo se presenta el diseño e implementación de un sistema basado en lógica difusa para determinar el nivel de riesgo asociado a la calidad del aire utilizando como variables de entrada las concentraciones de ozono (O₃) y monóxido de carbono (CO). El modelo utiliza funciones de pertenencia trapezoidales y un sistema de inferencia tipo Mamdani para generar una clasificación lingüística del riesgo ambiental. Los resultados obtenidos muestran que el sistema permite traducir valores cuantitativos en interpretaciones cualitativas comprensibles, facilitando la toma de decisiones relacionadas con actividades al aire libre. Este enfoque demuestra la viabilidad de la lógica difusa como herramienta de apoyo en sistemas inteligentes de monitoreo ambiental.

Palabras clave: lógica difusa, calidad del aire, IMECA, Mamdani, sistemas inteligentes ambientales.

¹ Autor principal

Correspondencia: wendy080599@gmail.com

Use of Fuzzy Logic to Determine the Air Quality Index in Mexico City Using Mamdani Inference

ABSTRACT

Air quality assessment in urban environments represents a major challenge due to the complexity of atmospheric pollutants and their impact on public health. In Mexico City, the Metropolitan Air Quality Index (IMECA) provides technical information that is often difficult for the general population to interpret. This paper presents the design and implementation of a fuzzy logic-based system to determine the risk level associated with air quality using ozone (O₃) and carbon monoxide (CO) concentrations as input variables. The model uses trapezoidal membership functions and a Mamdani inference system to generate a linguistic classification of environmental risk. Results show that the system translates quantitative values into qualitative interpretations understandable by users, facilitating decision-making regarding outdoor activities. This approach demonstrates the feasibility of fuzzy logic as a support tool in intelligent environmental monitoring systems.

Keywords: fuzzy logic, air quality index, Mamdani inference, intelligent systems, environmental monitoring.

*Artículo recibido 25 abril 2026
Aceptado para publicación: 25 mayo 2026*



1. INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica constituye uno de los principales problemas ambientales en zonas metropolitanas de alta densidad poblacional como la Ciudad de México. La exposición prolongada a contaminantes como el ozono (O_3) y el monóxido de carbono (CO) (Molina & Molina, 2002) representa un riesgo significativo para la salud humana, especialmente en grupos vulnerables.

Actualmente, la evaluación de la calidad del aire se realiza mediante el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) (García-Reynoso et al., 2009), el cual proporciona valores cuantitativos basados en mediciones horarias obtenidas mediante estaciones de monitoreo ambiental. Sin embargo, la interpretación de estos valores suele resultar compleja para usuarios no especializados.

Ante esta problemática, la lógica difusa representa una alternativa eficiente para modelar información incierta mediante variables lingüísticas similares al razonamiento humano. En este contexto, el presente trabajo propone el desarrollo de un sistema basado en inferencia difusa tipo Mamdani para determinar el nivel de riesgo asociado a la calidad del aire en función de contaminantes atmosféricos relevantes.

2. ESTADO DEL ARTE

La lógica difusa ha sido ampliamente utilizada en aplicaciones relacionadas con control ambiental, monitoreo atmosférico y sistemas inteligentes de soporte a la toma de decisiones (Carrasco et al., 2012). Desde su introducción por Zadeh (1965), esta técnica ha permitido representar fenómenos complejos mediante reglas lingüísticas interpretables.

Diversos estudios han demostrado la efectividad de los sistemas difusos en la evaluación de la calidad del aire debido a su capacidad para integrar múltiples variables contaminantes en modelos interpretativos robustos (Kaufmann & Gupta, 1991). Particularmente, los modelos basados en inferencia Mamdani han mostrado resultados satisfactorios en aplicaciones ambientales debido a su simplicidad y facilidad de implementación (Mamdani & Assilian, 1975).

En el contexto mexicano, el uso del índice IMECA constituye una herramienta fundamental para evaluar la exposición a contaminantes atmosféricos; sin embargo, existen oportunidades para mejorar su interpretación mediante técnicas de inteligencia computacional.

3. METODOLOGÍA

El sistema propuesto se basa en un modelo de inferencia difusa tipo Mamdani compuesto por cuatro etapas:

- fuzzificación
- base de conocimiento
- inferencia difusa
- defuzzificación

Se definieron como variables de entrada:

- ozono (O_3)
- monóxido de carbono (CO)

y como variable de salida:

- nivel de riesgo por calidad del aire

De acuerdo con la Norma Ambiental NADF-009-AIRE-2017(NOM-020-SSA1-2014), se tomaron los siguientes valores lingüísticos. Las variables lingüísticas utilizadas fueron:

- Buena
- Regular
- Mala
- Muy malaExtremadamente mala

Los valores oscilan entre 0 a 500 IMECAS por las partículas de ozono, y de 0 a 5000 por las partículas de Monóxido de carbono. (SEMARNAT, 2017) como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1 Entrada: Valores para el conjunto difuso (Elaboración propia. 2026).

| Valor lingüístico | Ozono | Monóxido de carbono |
|---------------------|-----------|---------------------|
| Baja | 0 - 50 | 0 - 500 |
| Moderado | 51 - 100 | 501 - 1000 |
| Alto | 101 - 150 | 1001 - 1500 |
| Muy alto | 151 - 200 | 1501 - 2000 |
| Extremadamente alto | 201 - 500 | 2001 - 5000 |

Entrada

Salida

Los valores lingüísticos para la salida se desarrollaron tomando en cuenta la Norma Ambiental NADF-009-AIRE-2017 y representan si el aire representa un riesgo a la salud de la población como se muestra en la table 2:

- Riesgo Bajo (B)
- Riesgo Moderado (M)
- Riesgo Alto (A)
- Riesgo Muy Alto (MA)

Tabla 2 Índice para la calidad del aire (Elaboración propia, 2026)

| Índice | Valor lingüístico | Mensaje sobre la salud para población susceptible |
|--------|-------------------|--|
| 1-3 | Riesgo bajo | Disfruta de tus actividades normales al aire libre |
| 4-6 | Riesgo moderado | Considera reducir o reprogramar las actividades que requieran esfuerzo físico del aire libre si presenta síntomas. |
| 7-10 | Riesgo alto | Reduce o vuelve a reprogramar las actividades que requieran esfuerzo físico al aire libre si presenta síntomas o mantente en interiores. |
| 10+ | Riesgo muy alto | Evita realizar actividades al aire libre. |

Se emplearon funciones de pertenencia trapezoidales debido a su eficiencia computacional y facilidad de interpretación en sistemas difusos aplicados a monitoreo ambiental (Pedrycz & Gomide, 2007).

La base de conocimiento del sistema está compuesta por 25 reglas difusas del tipo:

SI Ozono es buena Y CO es buena

ENTONCES riesgo es bajo

Estas reglas permiten modelar la interacción entre contaminantes atmosféricos dentro del sistema de inferencia (Klir & Yuan, 1995) .



| | | CO (Monóxido de carbono) | | | | |
|-------------------|-------------------|---------------------------------|----------------|-------------|-----------------|-------------------|
| O3 (Ozono) | | Buena | Regular | Mala | Muy mala | Extr. mala |
| | Buena | RB | RM | RA | RMA | REA |
| | Regular | RM | RM | RA | RMA | REA |
| | Mala | RA | RA | RA | RMA | REA |
| | Muy mala | RMA | RMA | RMA | RMA | REA |
| | Extr. mala | REA | REA | REA | REA | REA |

4. Implementación del sistema difuso

El sistema fue implementado utilizando el lenguaje de programación Java en el entorno NetBeans, permitiendo modelar las funciones de pertenencia, las variables lingüísticas y la base de reglas difusas (Acampora & Loia, 2005).

Durante la etapa de fuzzificación, los valores de entrada son transformados en grados de pertenencia dentro del intervalo [0,1]. Posteriormente, el sistema de inferencia Mamdani evalúa las reglas activadas mediante operadores lógicos AND utilizando el operador mínimo (Saini et al., 2020).

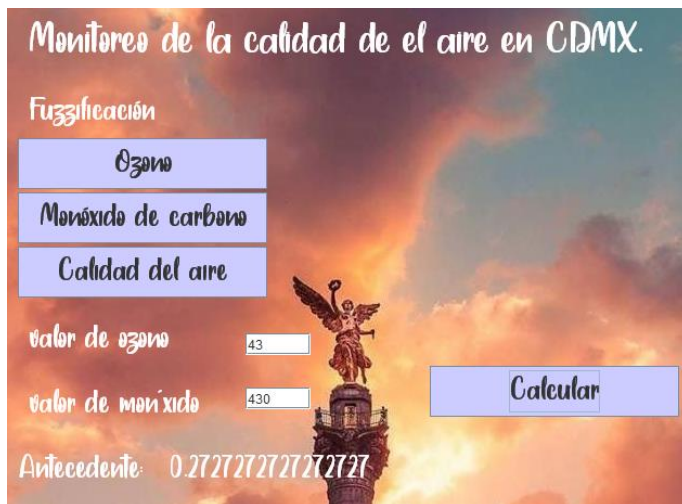
Finalmente, la etapa de defuzzificación utiliza el método del centroide para obtener un valor numérico representativo del nivel de riesgo ambiental (Ross, 2010).

5. Resultados experimentales

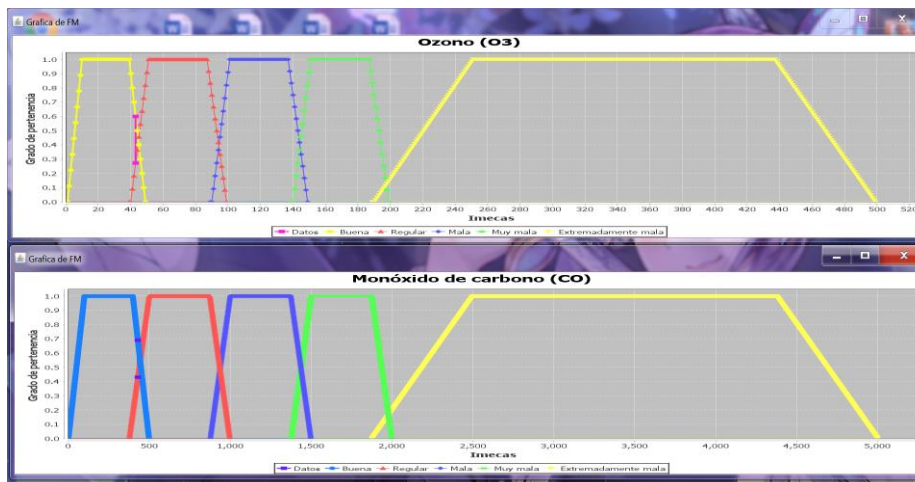
Para validar el funcionamiento del sistema se utilizaron los siguientes valores de entrada:

Ozono = 43 IMECAS

CO = 430 IMECAS

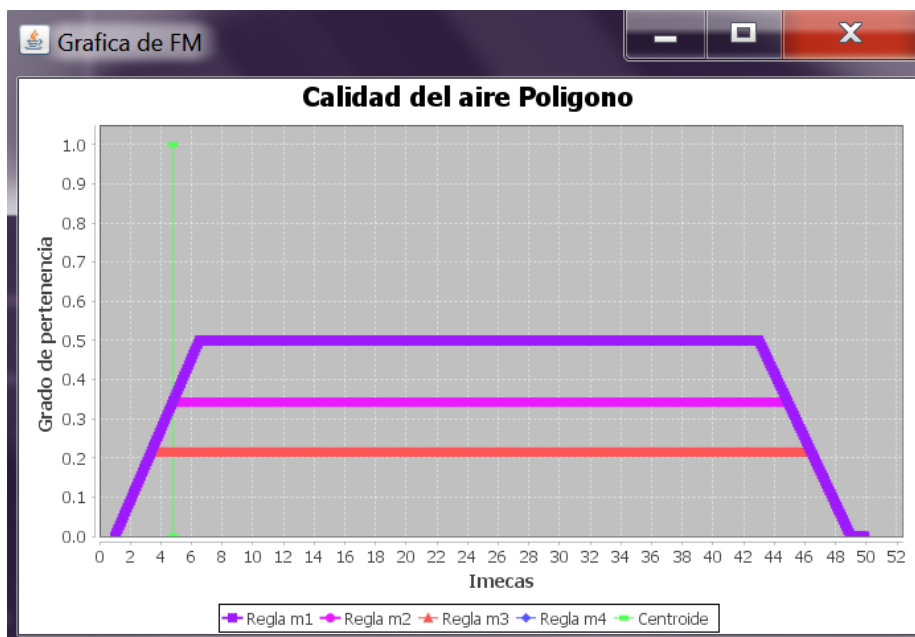


Durante la etapa de fuzzificación se obtuvieron grados de pertenencia simultáneos en las categorías “buena” y “regular” para ambas variables.



El sistema activó cuatro reglas difusas correspondientes a condiciones de riesgo bajo. Posteriormente, mediante el método del centroide se obtuvo el valor:

$$x = 4.79$$



Este resultado corresponde a un nivel de riesgo bajo dentro de la escala definida por el sistema difuso. Los resultados obtenidos demuestran la consistencia del modelo propuesto para representar condiciones reales de calidad del aire.

6. DISCUSIÓN

Los sistemas basados en lógica difusa permiten representar información ambiental compleja mediante reglas interpretables por humanos. Esto representa una ventaja significativa frente a modelos determinísticos tradicionales. Para proyectar el modelo hacia entornos de Ciudades Inteligentes e IoT (Marques et al., 2019)

El modelo propuesto permite integrar múltiples contaminantes en una sola métrica interpretable, lo que facilita la toma de decisiones relacionadas con actividades al aire libre y estrategias de prevención en salud pública. Para correlacionar el índice cualitativo con la prevención médica activa (Pope et al., 2002)

Además, el sistema puede adaptarse fácilmente a otras ciudades siempre que exista disponibilidad de datos provenientes de estaciones de monitoreo ambiental.

7. CONCLUSIONES

Se desarrolló un sistema basado en lógica difusa tipo Mamdani capaz de determinar el nivel de riesgo asociado a la calidad del aire utilizando concentraciones de ozono y monóxido de carbono como variables de entrada.

El modelo permite traducir valores técnicos del índice IMECA en interpretaciones comprensibles para la población general, facilitando la toma de decisiones relacionadas con la exposición a contaminantes atmosféricos.

Los resultados obtenidos confirman la viabilidad del uso de lógica difusa como herramienta de apoyo en sistemas inteligentes de monitoreo ambiental urbano.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*.

Luna, G. M. (2002). *Introducción a la lógica difusa*. CINVESTAV.

Lee, C. C. (1990). *Fuzzy logic in control systems*.

SEMARNAT (2017). *Índice Metropolitano de la Calidad del Aire*.

Vallejo et al. (2003). Efectos de la contaminación atmosférica en la salud. *Gaceta Médica de México*.

Acampora, G., & Loia, V. (2005). Fuzzy control interoperability and Java technology. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 1(4), 252-265.

Borrego, C., Saavedra, S., Costa, A. M., Torres, J. A., & Martins, H. (2006). Optimization of air quality monitoring networks in urban areas. *Atmospheric Environment*, 40(28), 5460-5471.

Carrasco, E., Figueroa, I., & Salgado, R. (2012). Assessment and prediction of air quality using fuzzy logic and autoregressive models in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 60, 411-420.

Dunea, D., Iordache, S., & Liu, H. Y. (2011). Fuzzy inference systems for estimation of Air Quality Index. *Romanian Journal of Meteorology*, 13(1-2), 45-56.

García-Reynoso, J. A., Grutter, M., & Ruiz-Suárez, L. G. (2009). Evaluación del Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) y su percepción pública. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 25(3), 175-189.

Kaufmann, A., & Gupta, M. M. (1991). *Introduction to fuzzy arithmetic: Theory and applications*. Van Nostrand Reinhold.

Klir, G. J., & Yuan, B. (1995). *Fuzzy sets and fuzzy logic: Theory and applications*. Prentice Hall.

Mamdani, E. H., & Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1), 1-13.



- Marques, G., Ferreira, C. R., & Pitarma, R. (2019). Indoor air quality assessment using a fuzzy inference system. *IEEE Access*, 7, 126659-126668.
- Molina, L. T., & Molina, M. J. (Eds.). (2002). *Air quality in the Mexico megacity: An integrated assessment*. Kluwer Academic Publishers.
- Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2014. Salud ambiental. Valor límite permisible para la concentración de ozono (O₃) en el aire ambiente y criterios para su evaluación. Secretaría de Salud.
- Pedrycz, W., & Gomide, F. (2007). *Fuzzy systems engineering: Toward human-centric computing*. John Wiley & Sons.
- Pope, C. A., Burnett, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K., & Thurston, G. D. (2002). Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA*, 287(9), 1132-1141.
- Ross, T. J. (2010). *Fuzzy logic with engineering applications* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Saini, R., Kumar, M., & Singh, R. (2020). Air quality index assessment using fuzzy Mamdani inference system: A case study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(8), 512.

