

Fuzzy expert system for health risk characterization due to air pollution

Stefanía Franco, BS, Danny Múnera, Ph.D.
Universidad de Antioquia, Colombia
stefania.franco@udea.edu.co, danny.munera@udea.edu.co

Resumen– Los sistemas de alerta para contaminantes aéreos son actualmente una necesidad en las grandes urbes del mundo. Estos sistemas permiten a los ciudadanos identificar los riesgos por contaminación a los que están expuestos al realizar sus actividades diarias. Al revisar la literatura encontramos que la mayoría de sistemas de alerta para la calidad del aire no se encuentran adaptados a las condiciones particulares de los ciudadanos, condiciones como su rango de edad, el tipo de actividad física que suele realizar o sus comorbilidades. Esta información es esencial para determinar los cuidados que deben tener los ciudadanos ante los niveles de contaminación en la ciudad. Por ejemplo, ante un mismo nivel de contaminación una persona con comorbilidades debería tener un nivel de alerta mayor a una persona sana. Este artículo propone entonces el desarrollo de un sistema experto difuso (SED) para la generación de alertas personalizadas y georeferenciadas por contaminación del aire. El SED utiliza el estado de salud de una persona y el nivel de contaminación del aire en un punto geográfico determinado, para dar a conocer el nivel de riesgo que la persona puede tener al realizar una actividad física. Este sistema de inferencia difusa fue embebido en una aplicación WEB la cual facilita el ingreso de la información por parte del usuario y la visualización de los estados de alerta personalizados. También se presenta una validación funcional del sistema a través de la simulación de múltiples usuarios con diferentes niveles de riesgo, donde se muestra que nuestro sistema efectivamente genera alertas personalizadas, permitiendo a los usuarios conocer el riesgo relativo por contaminación de acuerdo a sus características particulares.

Keywords-- Air Pollution, Alert System, Fuzzy Expert System.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.662>
ISBN: 978-958-52071-8-9 ISSN: 2414-6390

Sistema experto difuso para la caracterización del riesgo en salud por contaminación de aire

Stefanía Franco, BS, Danny Múnera, Ph.D.
Universidad de Antioquia, Colombia
stefania.franco@udea.edu.co, danny.munera@udea.edu.co

Resumen– Los sistemas de alerta para contaminantes aéreos son actualmente una necesidad en las grandes urbes del mundo. Estos sistemas permiten a los ciudadanos identificar los riesgos por contaminación a los que están expuestos al realizar sus actividades diarias. Al revisar la literatura encontramos que la mayoría de sistemas de alerta para la calidad del aire no se encuentran adaptados a las condiciones particulares de los ciudadanos, condiciones como su rango de edad, el tipo de actividad física que suele realizar o sus comorbilidades. Esta información es esencial para determinar los cuidados que deben tener los ciudadanos ante los niveles de contaminación en la ciudad. Por ejemplo, ante un mismo nivel de contaminación una persona con comorbilidades debería tener un nivel de alerta mayor a una persona sana. Este artículo propone entonces el desarrollo de un sistema experto difuso (SED) para la generación de alertas personalizadas y georeferenciadas por contaminación del aire. El SED utiliza el estado de salud de una persona y el nivel de contaminación del aire en un punto geográfico determinado, para dar a conocer el nivel de riesgo que la persona puede tener al realizar una actividad física. Este sistema de inferencia difusa fue embebido en una aplicación WEB la cual facilita el ingreso de la información por parte del usuario y la visualización de los estados de alerta personalizados. También se presenta una validación funcional del sistema a través de la simulación de múltiples usuarios con diferentes niveles de riesgo, donde se muestra que nuestro sistema efectivamente genera alertas personalizadas, permitiendo a los usuarios conocer el riesgo relativo por contaminación de acuerdo a sus características particulares.

Keywords-- Contaminación aérea, Sistema de alerta, Sistema experto difuso.

I. INTRODUCCIÓN

Según la Organización Mundial de la Salud, las fuentes de contaminación del aire representan uno de los mayores riesgos ambientales para la salud humana a nivel global [1]. Las personas, al respirar cerca de 10.000 litros de aire al día, reciben altas dosis de aire contaminado [2], por lo que se han observado últimamente estadísticas preocupantes de muertes derivadas por esta problemática. En 2015, por ejemplo, la contaminación aérea fue responsable de 6.4 millones de muertes a nivel mundial, 24% por enfermedad isquémica del corazón, 19% por enfermedades cardiovasculares, 21% por accidentes cerebrovasculares y 23% por cáncer de pulmón [3]. Varios estudios han concluido que el empeoramiento de los síntomas en personas asmáticas, así como la aparición de

nuevos casos en esta población se debe a la exposición a largo plazo en un ambiente contaminado [4].

Ciudades con amplio crecimiento económico, social e industrial son propensas a generar altos índices de contaminación aérea. En Colombia, el Valle de Aburrá es una zona donde se encuentra la segunda ciudad más grande del país, la cual es una región ampliamente industrializada y en desarrollo continuo, con una alta urbanización. Esta zona presenta una orografía y unas condiciones meteorológicas particulares, las cuales propician una estabilidad atmosférica con poca ventilación de los contaminantes, generando episodios de alta contaminación perjudiciales para la salud, al superarse los máximos permisibles diarios según la normativa colombiana.

Para la disminución a corto, mediano y largo plazo de esta problemática, el gobierno del Valle de Aburrá ha generado diferentes estrategias como el Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire en el Valle de Aburrá [5], el Plan Operacional para Enfrentar Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica [6] o el Sistema de Alertas Tempranas de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA) [7].

A pesar de las estrategias planteadas a nivel regional, el análisis de la información realizada por los entes de control es genérica y no se encuentra adaptada a las condiciones particulares de las personas que habitan la zona como lo son su rango de edad, el tipo de actividad física que suele realizar o sus comorbilidades. La inclusión de estos datos en un sistema personalizado de alertas por contaminación permitiría identificar los diferentes niveles de riesgo que diferentes ciudadanos pueden tener ante un determinado nivel de contaminación.

En este artículo se describe el desarrollo de un sistema experto difuso que infiere el nivel de riesgo (bajo, medio o alto) de una persona, utilizando como información de entrada el nivel de concentración de un contaminante, la intensidad de una actividad física a desarrollar y el estado de salud de la persona. Una aplicación web se diseñó para la adquisición y muestra de la información.

En lo que resta de este artículo se presenta una revisión del trabajo relacionado en la Sección II. Luego se muestra el diseño del sistema experto difuso para la generación de alertas en la Sección III. La Sección IV presenta el desarrollo de la aplicación web que facilita la utilización del sistema de

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

alertas. Por último se presentan conclusiones y trabajo futuro en la Sección V.

II. TRABAJOS RELACIONADOS

Los sistemas de alerta para el control de la calidad del aire han sido ampliamente utilizados a nivel mundial. Desde la década de los 90s, cuando los sistemas de información a través de la Internet empezaron a masificarse, se pueden rastrear algunas propuestas con el fin de alertar a la población sobre altos niveles de Smog o contaminación atmosférica en general [8], [9].

El Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) ha propiciado la proliferación de sistemas de monitoreo, basados en sensores de bajo costo, los cuales permiten a los ciudadanos estar al tanto de los niveles de contaminación en el ambiente [10]. Por ejemplo, en [11] se presenta un sistema basado en tecnologías del IoT, el cual permite monitorear niveles de ruido y contaminación del aire usando una plataforma de computación simple (ESP8266). El sistema propuesto permite enviar una alerta a las autoridades cuando se exceden los niveles preestablecidos. Otro caso relevante, el cual también se apoya en tecnologías del IoT, es el presentado en [12]. Este trabajo presenta el desarrollo de un sistema de monitoreo a través de nodos móviles los cuales recogen información del ambiente. Cuando se detecta un evento de alto nivel de contaminación, el sistema envía una alerta, vía correo electrónico, a los usuarios registrados en el sistema.

Algunos trabajos han mostrado que el nivel de afectación que tienen los niveles de contaminación del aire en los habitantes, depende del estado de salud de cada persona [13]–[15]. A pesar de ello, no hemos encontrado ningún sistema de alerta que tenga en cuenta esta información como insumo para la generación de alertas personalizadas. En [16] y [17] se presentan sistemas expertos que permiten estimar el nivel de riesgo de los pacientes (riesgo respiratorio y de cáncer pulmonar), basados en variables fisiológicas y en información sobre el estado de salud de los individuos. Sin embargo, en [16] el sistema experto no tiene en cuenta información de la contaminación del aire y, aunque en [17] si se tiene en cuenta los niveles de contaminación, el sistema no ha sido diseñado para generar alertas en tiempo real. En [18] se presenta un sistema experto difuso que permite crear un valor de índice de calidad del aire, sin embargo el sistema no está diseñado para generar alertas personalizadas a la población.

En este artículo se propone el desarrollo de un sistema para la generación de alertas personalizadas, el cual tiene en cuenta los niveles de contaminación del aire y el estado de salud de los usuarios. El sistema propuesto usa un mecanismo de inferencia basado en un sistema experto difuso el cual permite procesar de manera conjunta la información recolectada y generar un nivel de alerta personalizado para el usuario.

III. SISTEMA EXPERTO DIFUSO

En esta sección se muestra de manera detallada el proceso de diseño del Sistema Experto Difuso (SED), para lo cual se presenta inicialmente información general sobre el funcionamiento de este tipo de sistemas [19] y luego se procede a mostrar los elementos particulares necesarios para utilizar un SED en la generación de alertas en un sistema de monitoreo de calidad del aire.

A. Definición

Un Sistema Experto Difuso permite imitar la toma de decisiones de los humanos, la cual usualmente involucra todas las posibilidades intermedias entre los valores exactos de SÍ y NO. El sistema produce una salida definida en respuesta a una entrada incompleta, ambigua, distorsionada o inexacta. Se identifican cuatro partes en un SED tradicional: el módulo de fusificación, las reglas condicionales difusas, el motor de inferencia y el módulo defusificador. A continuación se realiza una breve descripción de cada módulo.

1) *Módulo de fusificación*: Este módulo asigna un conjunto difuso apropiado a una entrada no difusa. En este proceso se usan funciones de pertenencia que para un conjunto difuso A se definen como $\mu_A: X \rightarrow [0,1]$, donde a cada elemento X se le asigna un valor entre 0 y 1, o grado de pertenencia al conjunto difuso A. Dos de las funciones de pertenencia más comunes son la triangular, definida por la Ecuación (1) y la trapezoidal, definida por la Ecuación (2).

$$\mu_A(X) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a}, & a < x \leq m \\ \frac{b-x}{b-m}, & m < x < b \\ 0, & x \geq b \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_A(X) = \begin{cases} 0, & (x < a)|(x > b) \\ \frac{x-a}{m-a}, & a \leq x \leq m \\ 1, & m \leq x \leq n \\ \frac{b-x}{b-n}, & n \leq x \leq b \end{cases} \quad (2)$$

2) *Reglas condicionales difusas*: Son reglas con estructura de “Si...Entonces...” definidas por expertos.

3) *Motor de inferencia*: Simula el proceso de razonamiento humano.

4) *Módulo de defusificador*: Este módulo transforma la salida difusa obtenida por el motor de inferencia en un valor nítido. Varios métodos de defusificación se han planteado como el de membresía máxima, centroide, promedio ponderado y medio máximo [20]. El método más popular es la técnica del centroide (COG, siglas en inglés), donde las salidas difusas del sistema se unen y las coordenadas del COG de la curva obtenida dan el valor final.

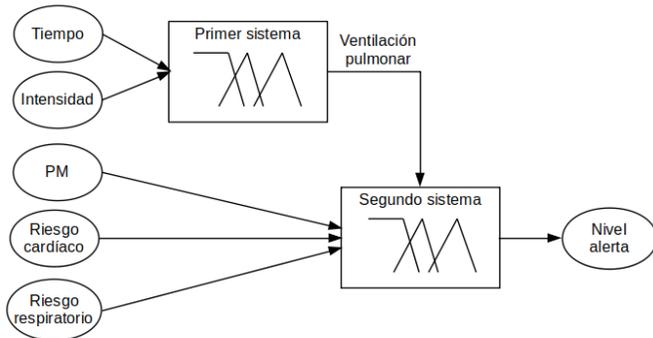


Fig. 1. Descripción general del Sistema Experto Difuso utilizado para la generación de alertas.

B. Aplicación en la calidad del aire

Para el desarrollo de nuestro sistema de alertas se utilizó un SED, el cual permite procesar información proveniente de diversas variables, tanto de calidad del aire, como el estado de salud del usuario. El SED permite obtener el nivel de riesgo que una persona puede tener en el momento en que se dispone a realizar una actividad física, basándose en su estado de salud, la intensidad y el tiempo de la actividad a realizar, y la contaminación aérea en la ubicación geográfica de la persona.

El SED planteado consta de dos etapas como se observa en la Fig. 1. La primera etapa permite inferir como salida la ventilación pulmonar (vlm) a partir del tiempo y la intensidad de la actividad física que se desea realizar. La ventilación pulmonar informa cómo el aire entra y se intercambia en los pulmones y, al estar asociada con el buen rendimiento deportivo, se tiene en cuenta para el desarrollo de este trabajo. Para esta etapa se define para cada variable tres conjuntos de pertenencia (bajo, moderado y alto), con funciones de pertenencia triangulares y trapezoidales. Las reglas definidas para esta primera etapa del sistema se pueden observar en la Fig. 2, donde se visualiza la definición de los conjuntos difusos para las entradas y salidas del sistema. La superficie de control para esta etapa se puede observar en la Fig. 3.

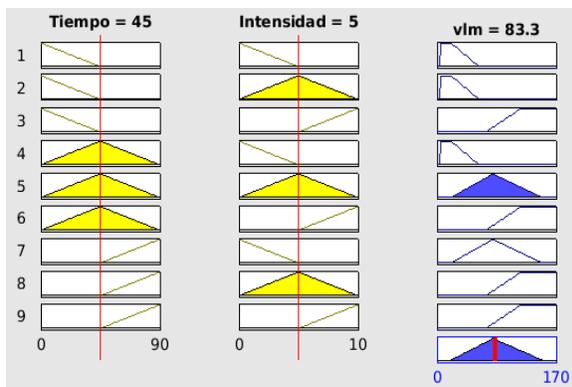


Fig. 2 Reglas condicionales primera etapa del sistema experto.

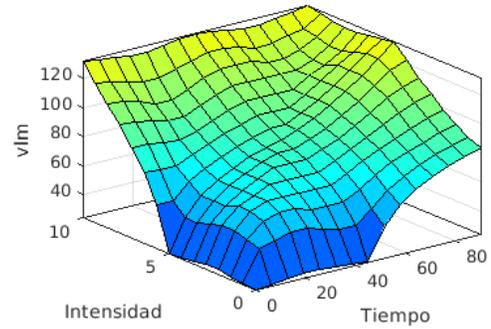


Fig. 3 Superficie de control del sistema experto difuso. Entradas: Intensidad y tiempo de la actividad física. Salida: Ventilación pulmonar (vlm).

Para la segunda etapa se toma como entradas la salida de la primera etapa (vlm), el nivel de contaminación del aire y el riesgo cardíaco (R_C) y respiratorio (R_R). Teniendo en cuenta estudios desarrollados en [4], [14], [21]–[23] se pudo concluir que uno de los contaminantes que genera mayores consecuencias negativas en la salud de una persona es el material particulado (PM, por sus siglas en inglés), por lo que para esta implementación consideró solo este contaminante.

Para determinar el nivel de PM se identificaron dos bases de datos en la región: el sistema SIATA y la red de Ciudadanos Científicos. El sistema SIATA es una red de monitoreo estatal que consta de 32 estaciones robustas oficiales. La red de Ciudadanos Científicos es un sistema de monitoreo basado en sensores de bajo costo los cuales están desplegados en cerca de 240 puntos en la zona de interés.

Para las entradas de riesgo cardíaco (R_C) y respiratorio (R_R) se plantea la estimación del nivel de riesgo, utilizando un formulario para obtener información del usuario. La información recolectada permite calcular valores numéricos que representan los niveles de riesgo del individuo. A partir del análisis de los artículos previamente citados se identificaron las principales variables que pueden afectar la salud de una persona en un ambiente contaminado y se resumieron en diferentes secciones del cuestionario como, la información general de la persona, su historia familiar y personal relacionada con enfermedades cardíacas y respiratorias, y también su estilo de vida. La salida del SED es una variable numérica que representa el nivel de riesgo total de la persona (N_R) ante el nivel de contaminación por PM.

Solo para el PM se definen dos conjuntos de pertenencia (bajo y alto), para las otras variables se definen tres (bajo, moderado y alto). Al igual que en la anterior etapa, se utilizan funciones de pertenencia triangulares y trapezoidales. La Fig. 4 muestra el nivel de riesgo (N_R) calculado por el SED al variar el nivel de contaminante (PM) y la ventilación pulmonar. La Fig. 5 muestra la misma salida (N_R) pero ahora variando el contaminante (PM) y el riesgo respiratorio (R_R). Finalmente la Fig. 6 muestra nuevamente la salida (N_R) pero ahora variando el contaminante (PM) y el riesgo cardíaco (R_C). La Fig. 7 presenta las 26 reglas definidas para la segunda etapa del SED.

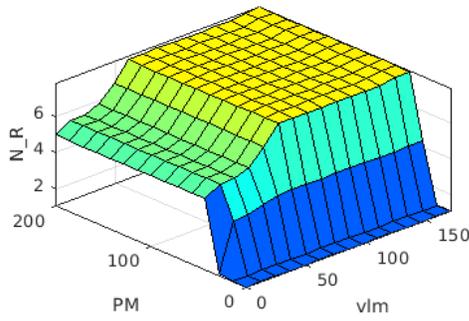


Fig. 4 Superficie de control del sistema experto difuso. Entradas: nivel de PM y ventilación pulmonar. Salida: Nivel de riesgo (N_R).

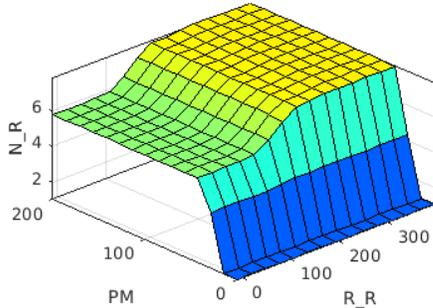


Fig. 5. Superficie de control del sistema experto difuso. Entradas: nivel de PM y riesgo respiratorio (R_R). Salida: Nivel de riesgo (N_R).

IV. APLICACIÓN WEB

El SED desarrollado en la sección III requiere información de contexto para poder determinar la generación de la alerta, por ejemplo, el tipo de actividad física a desarrollar, el estado de salud y la posición geográfica del usuario, y el nivel de contaminación en el área de interés.

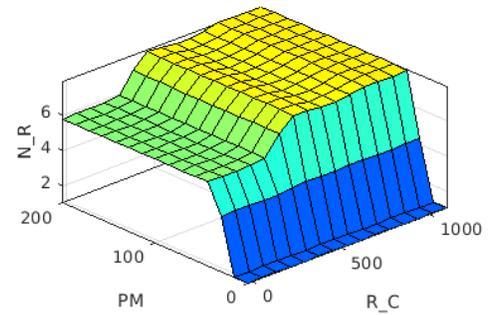


Fig. 6. Superficie de control del sistema experto difuso. Entradas: nivel de PM y riesgo respiratorio (R_R). Salida: Nivel de riesgo (N_R).

Para facilitar el uso de este sistema se propone el desarrollo de una aplicación WEB que permite recolectar los datos necesarios para la generación de la alerta y presentarla de una manera conveniente al usuario. A continuación se presenta el proceso de diseño e implementación de esta aplicación.

A. Arquitectura

Para el diseño de la aplicación WEB se realizó un levantamiento de requisitos con historias de usuario las cuales permiten definir la arquitectura base de la aplicación de la Fig. 8. En esta arquitectura se pueden observar tres módulos principales: el módulo de captura de datos ambientales, el módulo de generación de alertas y el módulo de notificaciones.

1) *Módulo de captura de datos ambientales (Módulo de acceso):* Este módulo permite obtener la información de las bases de datos del SIATA y de la plataforma de ciudadanos científicos, filtrando los valores correspondientes de la concentración del PM2.5. Para determinar el valor de contaminación en una zona determinada se realiza un promedio ponderado del valor de la estación SIATA y el nodo de ciudadanos científicos más cercanos, asignado un peso mayor al dato del SIATA por ser un dato de mayor confianza.

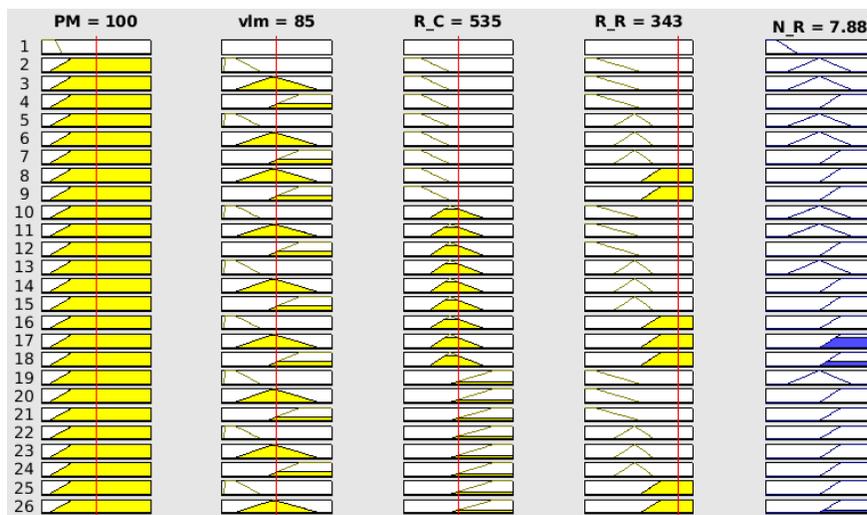


Fig. 7 Reglas condicionales para la segunda etapa del sistema experto difuso.

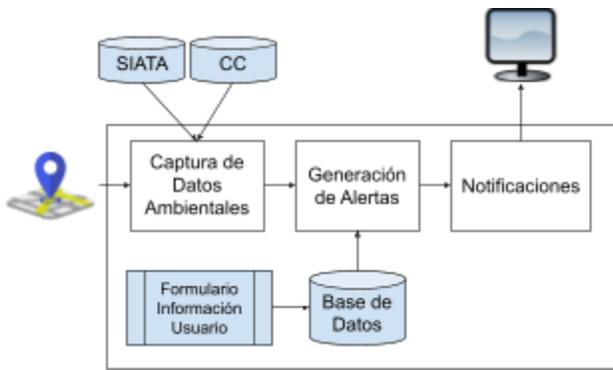


Fig. 8. Arquitectura de la aplicación.

2) *Módulo de generación de alertas*: Este módulo implementa el sistema experto difuso, recibe la información del nivel de contaminantes en la zona y los datos personales del usuario. Con estos datos el SED calcula un nivel de alerta.

3) *Módulo de Notificaciones*: Este módulo interpreta el valor obtenido obtenido por el sistema de generación de alertas y determina si es necesario notificar al usuario ante la existencia de un riesgo en su salud.

Para el desarrollo del Backend se utilizó el framework Flask, el cual permite manejar las conexiones de la aplicación con la Base de Datos (BD). Para almacenar la información de cada usuario registrado en la aplicación, se utilizó un motor de base de datos relacional, llamado MariaDB.

B. Frontend

Para obtener y mostrar información al usuario, se desarrolló un frontend utilizando el framework React JS, en el cual se desarrollaron diferentes interfaces asociadas a los siguientes componentes:

1) *Componente principal de bienvenida*: introduce a los usuarios la aplicación y el objetivo de esta.

2) *Componente de consejos*: permite dar recomendaciones y sugerencias al usuario para mitigar el daño que la contaminación puede tener en su salud.

3) *Componente de login*: permite al usuario su ingreso a su cuenta personal. Para este componente es necesario el uso del backend, con el fin de verificar los datos ingresados por el usuario con la información almacenada en la BD.

4) *Componente de registro*: un usuario nuevo digita un formulario con las diferentes secciones del cuestionario para conocer su estado de salud. Una sección adicional se introduce para la creación del usuario y la contraseña. Al final del registro se conecta con la BD para persistir la información relevante del formulario.

5) *Componente de notificaciones*: permite al usuario conocer su nivel de riesgo cuando va a realizar una actividad física. Al entrar en este componente, el sistema determina la posición geográfica de la persona (Fig. 9).

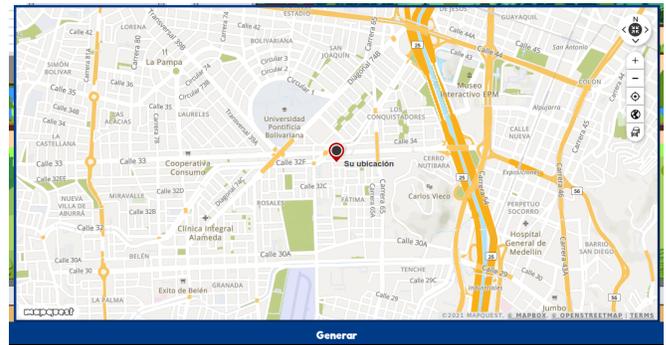


Fig. 9 Interfaz con ubicación del usuario.

C. Funcionalidad del sistema

Los usuarios del sistema crean una cuenta en la aplicación WEB ingresando la información pertinente para poder evaluar sus niveles de riesgo. Cuando el usuario desea realizar una actividad física en algún lugar del área metropolitana, ingresa al sistema y presiona el botón iniciar. Al presionar un botón, primero se le pregunta al usuario por la actividad física a realizar, luego por la intensidad con la que realizará esta y por último el tiempo que le llevará ejecutarla. Al final, para obtener el nivel de riesgo para ese usuario bajo las condiciones que ingresó, el sistema ejecuta los siguientes pasos (ver Fig. 10): 1) el sistema determina la posición del usuario y la envía al backend, 2) consulta los servicios web para obtener los niveles de contaminación (PM2.5), 3) consulta en la base de datos los niveles de riesgo cardiovascular y respiratorio del usuario, 4) obtiene el valor promedio del contaminante, 5) envía la información al SED para determinar el nivel de riesgo, 6) calculando primero la ventilación pulmonar y luego 7) el nivel de alerta, 8) este valor es retornando a la aplicación del backend, y luego 9) al frontend envía, el cual determina cual alerta visual mostrar en pantalla al usuario (10 y 11). El tipo de alerta observada por el usuario depende del valor del nivel de riesgo (N_R) obtenido, para lo cual nosotros definimos, después de un proceso manual de ajuste, los siguiente rangos:

- Alerta baja: $0 \leq N_R \leq 3$
- Alerta media: $3 < N_R \leq 6.5$
- Alerta alta: $N_R > 6.5$

V. VALIDACIÓN DEL SISTEMA

Para validar el funcionamiento de la aplicación se crearon tres usuarios que simularán las características de ser una persona sana (riesgo cardíaco y respiratorio bajo), una persona con mayores comorbilidades (riesgo cardíaco moderado) y una persona con altas comorbilidades (riesgo cardíaco alto y riesgo respiratorio moderado).

Para cada usuario se realizó la consulta de su nivel de riesgo con tres tipos de intensidad (baja, moderada y alta), un tiempo de ejecución fijo de 60 min y tres condiciones ambientales que se pueden presentar en la ciudad de Medellín:

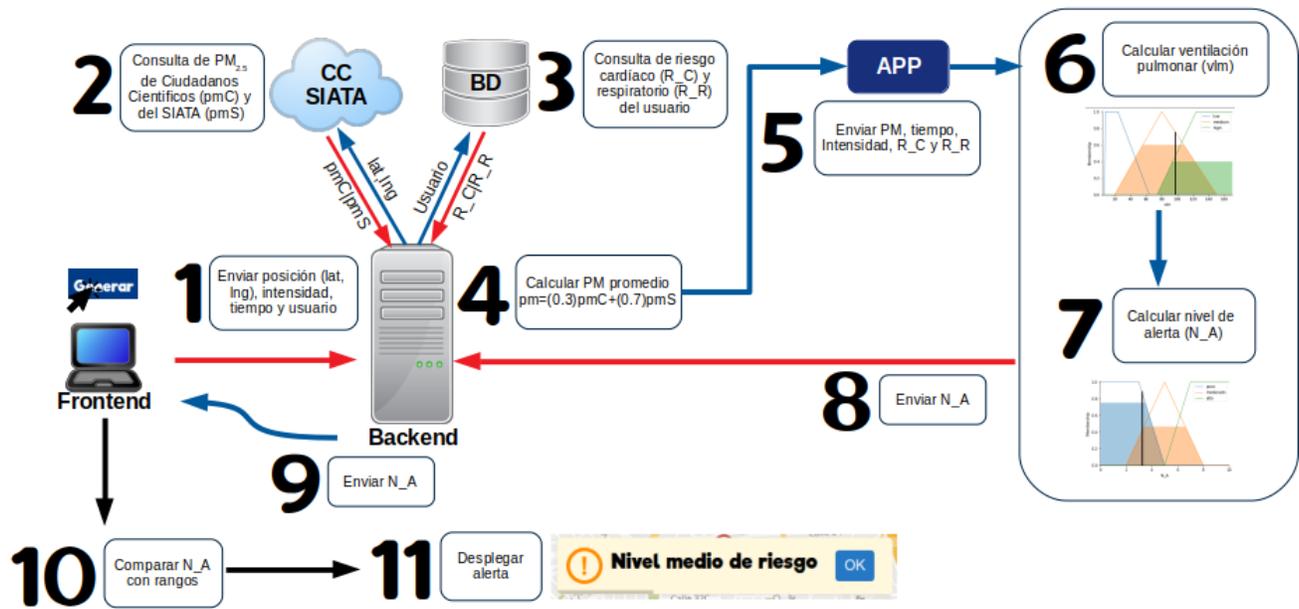


Fig. 10. Flujo de trabajo para componente de notificaciones.

1) *Concentración baja* ($PM_{2.5} = 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$), usual en las zonas de bajo tránsito vehicular.

2) *Concentración moderada* ($PM_{2.5} = 40 \mu\text{g}/\text{m}^3$), común en varias zonas de la ciudad durante los picos de flujo automotor. Este valor supera el límite permitido por la normatividad colombiana de $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como también el de la OMS de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

3) *Concentración alta* ($PM_{2.5} = 90 \mu\text{g}/\text{m}^3$), siendo un valor crítico, como los presentados durante los periodos de máxima contaminación en la región, en el cual por lo cambios meteorológicos, se da una retención de los contaminantes, aumentando la concentración de éstos en el aire.

TABLA I
SIMULACIÓN DE NIVELES DE RIESGO

Intensidad: baja			
PM _{2.5}	Caso 1	Caso 2	Caso 3
20	2.7	2.7	2.7
40	5.8	6.0	7.2
90	5.7	6.0	7.2
Intensidad: moderada			
PM _{2.5}	Caso 1	Caso 2	Caso 3
20	2.7	2.7	2.7
40	6.4	6.4	7.2
90	6.3	6.4	7.2
Intensidad: alta			
PM _{2.5}	Caso 1	Caso 2	Caso 3
20	2.7	2.7	2.7
40	6.8	6.6	7.2
90	7.2	6.6	7.2

La Tabla I presenta los resultados del proceso de simulación para cada uno de los casos. El valor retornado por

el SED es mostrado en la tabla, también se ha utilizado un código de colores para mostrar el tipo de alerta generada por la aplicación WEB (verde para alerta baja, amarillo para alerta media y rojo para alerta alta).

Estos resultados muestran que, como era de esperarse, el nivel de alerta aumenta cuando la intensidad del ejercicio o el nivel de contaminación aumenta. Sin embargo, se puede evidenciar que se presentan mayores niveles de riesgo por contaminación en caso de que la persona tenga mayores niveles de riesgo cardíaco y/o respiratorio.

VI. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó el diseño e implementación de un sistema experto difuso para caracterizar el riesgo de una persona debido a los niveles de contaminación ambiental. Este sistema experto es usado como motor de inferencia para una aplicación WEB, la cual permite generar alertas de niveles de contaminación personalizadas, teniendo en cuenta los niveles de riesgo del usuario y la actividad física a realizar.

A partir de un análisis de la literatura se pudo identificar los principales riesgos de los usuarios respecto a la contaminación del aire, se identificó también una forma de estimar este riesgo y utilizar esta información como entrada para el sistema experto difuso.

La validación del sistema mostró que el sistema experto difuso permite generar alertas, que no solo tienen en cuenta los niveles de contaminación del aire -lo que es usual para este tipo de sistemas-, sino que además permite que dichas alertas tengan en cuenta el estado de salud del usuario, evitando posibles complicaciones de su estado de salud.

Los resultados se pueden mejorar en un futuro considerando otro tipo de comorbilidades de los usuarios, como el uso de datos clínicos o mediciones de sensores

biomédicos (temperatura corporal, frecuencia cardíaca, nivel de azúcar), mejorando el cálculo de los niveles de riesgo cardíaco y respiratorio. Otro aspecto que se planea a futuro es del desarrollo de un modelo espacio-temporal que fusione los datos del sistema SIATA y de la plataforma de ciudadanos científicos permitiendo obtener información más precisa y detallada de los niveles de concentración del PM 2.5 y de otros contaminantes en diferentes puntos geográficos de la ciudad de Medellín y el valle de Aburrá.

REFERENCIAS

- [1] Copenhagen: WHO Regional Office for Europe., *Evolution of WHO air quality guidelines: past, present and future*. 2017.
- [2] G. Pershagen, «Air pollution and cancer», *IARC Sci. Publ.*, n.º 104, pp. 240-251, 1990, [En línea]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/2228122>.
- [3] P. J. Landrigan, «Air pollution and health», *The Lancet. Public health*, vol. 2, n.º 1, pp. e4-e5, ene. 2017, doi: 10.1016/S2468-2667(16)30023-8.
- [4] M. Guarnieri y J. R. Balmes, «Outdoor air pollution and asthma», *Lancet*, vol. 383, n.º 9928, pp. 1581-1592, may 2014, doi: 10.1016/S0140-6736(14)60617-6.
- [5] Área Metropolitana del Valle de Aburrá, «Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (PIGECA 2017-2030)». URL, 2017.
- [6] J. M. del Á. M. del V. de Aburrá, «Acuerdo Metropolitano No. 4», 2018.
- [7] «SIATA - Sistema de Alertas Tempranas del Valle de Aburrá», *SIATA*. https://siata.gov.co/siata_nuevo/ (accedido abr. 20, 2021).
- [8] R. L. Maynard, «Smog Alert: Managing Urban Air Quality», *Occup. Environ. Med.*, vol. 54, n.º 2, p. 143, feb. 1997, Accedido: may 14, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1128670/>.
- [9] A. C. Comrie, «Atmospheric Pollution: A Global Problem». JSTOR, 1994, [En línea]. Disponible en: <https://www.jstor.org/stable/2563402>.
- [10] D. Múnera, D. P. Tobon V., J. Aguirre, y N. Gómez Gaviria, «IoT-based air quality monitoring systems for smart cities: A systematic mapping study», *Int. J. Elect. Computer Syst. Eng.*, vol. 11, n.º 4, pp. 3470-3482, 2021, doi: 10.11591/ijece.v11i4.pp3470-3482.
- [11] D. A. Janeera., H. Poovizhi., S. S. Sheik Haseena., y S. Nivetha., «Smart Embedded Framework using Arduino and IoT for Real-Time Noise and Air Pollution Monitoring and Alert system», en *2021 International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS)*, mar. 2021, pp. 1416-1420, doi: 10.1109/ICAIS50930.2021.9396041.
- [12] L. A. Muñoz y D. A. Pizarro, «Environmental monitoring and warning system at strategic points in the city», en *2019 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, nov. 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/CHILECON47746.2019.8988103.
- [13] B. Brunekreef y S. T. Holgate, «Air pollution and health», *Lancet*, vol. 360, n.º 9341, pp. 1233-1242, oct. 2002, doi: 10.1016/S0140-6736(02)11274-8.
- [14] D. E. Newby *et al.*, «Expert position paper on air pollution and cardiovascular disease», *Eur. Heart J.*, vol. 36, n.º 2, pp. 83-93b, ene. 2015, doi: 10.1093/eurheartj/ehu458.
- [15] Q. Di *et al.*, «Air Pollution and Mortality in the Medicare Population», *N. Engl. J. Med.*, vol. 376, n.º 26, pp. 2513-2522, jun. 2017, doi: 10.1056/NEJMoal702747.
- [16] N. Jariwala y R. A. Christian, «Fuzzy rule based system approach for the prediction of respiratory abnormalities in solid waste workers», *J. Life Sci. Biotech. Pharm. Res.*, vol. 4, pp. 62-65, 2015, [En línea]. Disponible en: <http://www.ijlbpr.com/uploadfile/2015/0423/20150423094157555.pdf>.
- [17] A. S. Ahmad y A. M. Mayya, «A new tool to predict lung cancer based on risk factors», *Heliyon*, vol. 6, n.º 2, p. e03402, feb. 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03402.
- [18] A. Javid, A. A. Hamedian, H. Gharibi, y M. H. Sowlat, «Towards the Application of Fuzzy Logic for Developing a Novel Indoor Air Quality Index (FIAQI)», *Iran. J. Public Health*, vol. 45, n.º 2, pp. 203-213, feb. 2016, [En línea]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27114985>.
- [19] R. Czabanski, M. Jezewski, y J. Leski, «Introduction to fuzzy systems», en *Theory and Applications of Ordered Fuzzy Numbers*, Springer, Cham, 2017, pp. 23-43.
- [20] Z. Dragan, Saletic, D. M. Velasevic, y N. E. Mastorakis, «Analysis of Basic Defuzzification Techniques», ene. 2002, Accedido: jun. 15, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/>.
- [21] F. Qin *et al.*, «Exercise and air pollutants exposure: A systematic review and meta-analysis», *Life Sci.*, vol. 218, pp. 153-164, feb. 2019, doi: 10.1016/j.lfs.2018.12.036.
- [22] A. Ghorani-Azam, B. Riahi-Zanjani, y M. Balali-Mood, «Effects of air pollution on human health and practical measures for prevention in Iran», *J. Res. Med. Sci.*, vol. 21, n.º 1, p. 65, sep. 2016, doi: 10.4103/1735-1995.189646.
- [23] L. A. Pasqua *et al.*, «Exercising in the urban center: Inflammatory and cardiovascular effects of prolonged exercise under air pollution», *Chemosphere*, vol. 254, p. 126817, sep. 2020, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126817.