VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

CFD Simulation Project: Los Ángeles Tunnel, Guanajuato

Proyecto de Simulación CFD: Túnel de los Ángeles, Guanajuato

Alfonso Muñoz M., Alegandro De La Peña T
División de Ingenierías, Departamento de Ingenierías Civil y Ambiental. Campus Guanajuato. Universidad de Guanajuato. AV. Juárez #77; Zona centro; Guanajuato, CP 36000.
a.munozmunoz@ugto.mx[1]. a.delapena@ugto.mx[2].

Resumen

El estudio tiene como objetivo aplicar la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para analizar el comportamiento del flujo de aire y su relación con la distribución de monóxido de carbono (CO) en el Túnel Los Ángeles, Guanajuato. Se elaboró un modelo tridimensional en Autodesk Inventor, se generó la malla computacional y se ejecutaron simulaciones en OpenFOAM, utilizando las ecuaciones de continuidad, Navier-Stokes, transporte de especies y el modelo de turbulencia k-ω SST, procesando los resultados en ParaView y contrastándolos cualitativamente con mediciones experimentales. El túnel tiene 1 126 m de longitud, 7 m de alto y 4 m de ancho, con una salida a los 5 m, una intersección en T a los 200 m y respiraderos a lo largo de su recorrido. Los resultados muestran que la velocidad es baja y uniforme en tramos rectos, aumentando solo en cambios de geometría; la temperatura se mantiene entre 31 y 32 °C, con un incremento localizado hasta 37 °C en la intersección; y la presión disminuye en zonas de mayor velocidad según el principio de Bernoulli. La concentración de CO alcanza un máximo de 36 ppm a los 1 072,40 m y desciende a 23 ppm en la salida, ajustándose a los patrones de circulación del aire. Se concluye que la geometría es el factor determinante en la dinámica del flujo y la acumulación de contaminantes, validando la metodología como herramienta útil para la evaluación y mejora de la seguridad ambiental en túneles.

Palabras clave: **Dinámica de Fluidos Computacional (CFD); Túnel Los Ángeles; Calidad del aire; Monóxido de carbono;** Modelado numérico; OpenFOAM.

Abstract

AThe aim of this study is to apply Computational Fluid Dynamics (CFD) to analyse airflow behaviour and its relationship with the distribution of carbon monoxide (CO) in the Los Ángeles Tunnel, Guanajuato. A three-dimensional model was created in Autodesk Inventor, a computational mesh was generated, and simulations were run in OpenFOAM, using the equations of continuity, Navier–Stokes, species transport and the k-ω SST turbulence model. The results were processed in ParaView and compared qualitatively with experimental measurements. The tunnel is 1 126 m long, 7 m high and 4 m wide, with an exit at 5 m, a T-junction at 200 m and ventilation shafts along its length. The results show that the velocity is low and uniform in straight sections, increasing only at changes in geometry; the temperature remains between 31 and 32 °C, with a localised increase to 37 °C at the junction; and the pressure decreases in areas of higher velocity in accordance with Bernoulli's principle. The CO concentration reaches a maximum of 36 ppm at 1 072.40 m and drops to 23 ppm at the exit, in line with air circulation patterns. It is concluded that geometry is the determining factor in flow dynamics and the accumulation of pollutants, validating the methodology as a useful tool for assessing and improving environmental safety in tunnels.

Introducción

La movilidad en áreas topográficamente complejas, como la ciudad de Guanajuato, se ve significativamente influenciada por la presencia de túneles viales. Estas estructuras, aunque favorecen la fluidez del tránsito, actúan como espacios confinados que propician la acumulación de contaminantes emanados por los vehículos. [8,15,25] Se estima que alrededor del 80 % de las emisiones de gases de combustión en vías urbanas provienen del tránsito vehicular. Entre estos contaminantes se encuentra el monóxido de carbono (CO), un gas tóxico que representa un riesgo para la salud humana. [2,13,23,28] Entre estos contaminantes se encuentra el monóxido de carbono (CO), un gas tóxico que representa riesgos para la salud humana al reducir la capacidad de

transporte de oxígeno en la sangre. [4,7,26] Como se evidencia en los registros obtenidos en el presente estudio, las concentraciones pueden acercarse o superar los umbrales recomendados internacionalmente.

Tabla 1. *Valor sobre el monóxido de carbono en interiores recomendado por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2010).*

CONTAMINANTE	TIEMPO PROMEDIO	VALOR LÍMITE OMS (ppm)	COMENTARIOS
CO (Monóxido de carbono)	15 minutos	87	Las excursiones a este nivel no deben realizarse más de una vez al día.
CO (Monóxido de carbono)	1 hora	35	Las excursiones a este nivel no deben realizarse más de una vez al día.
CO (Monóxido de carbono)	8 horas	10	Concentración media aritmética Ejercicio ligero a moderado
CO (Monóxido de carbono)	24 horas	7	Concentración media aritmética Ejercicio ligero a moderado

Tabla 2*. Valores de diseño y operación establecidos por la Asociación Mundial de carreteras (PIARC, 2019).*

CONTAMINANTE	CONDICIÓN PIARC	DESCRIPCIÓN	VALOR PIARC (ppm)
CO (Monóxido de carbono)	Mantenimiento con tráfico	Límite para la protección de trabajadores que realicen mantenimiento dentro del túnel	20
CO (Monóxido de carbono)	Operación Normal	Límite para la operación normal del túnel: tráfico diario, congestionamiento en horas pico y embotellamientos excepcionales	< 100
CO (Monóxido de carbono)	Cierre del túnel	Umbral que amerita el inmediato cierre del túnel	200

Tradicionalmente, la evaluación de la calidad del aire en tales contextos se ha fundamentado en mediciones puntuales. No obstante, dichas mediciones no facilitan la descripción exhaustiva del comportamiento del flujo de aire ni la identificación de las zonas críticas donde se produce una mayor retención de contaminantes. En la actualidad, la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se ha consolidado como una herramienta confiable para complementar el trabajo experimental, permitiendo analizar la influencia de la geometría y las condiciones de operación sobre la ventilación y la dispersión de sustancias nocivas. Según (3,5,22) Se trata de análisis de estudios que contribuyen a mejorar y potenciar el uso de las herramientas de CFD (Computational Fluid Dynamics) como herramientas más útiles.

En el ámbito internacional y nacional, múltiples investigaciones han demostrado la utilidad de la CFD para estudiar el flujo de aire y la dispersión de contaminantes en infraestructuras subterráneas. El uso de modelos de turbulencia como el k-ω SST y herramientas de código abierto como OpenFOAM ha permitido obtener resultados consistentes con mediciones de campo, destacando que la forma del túnel, las intersecciones y las aberturas son los factores determinantes en la renovación del aire. [6,9,24,27] En la presente investigación, se aborda la descripción de diversos estudios en los que se implementaron tales códigos y herramientas de simulación.

A pesar de los avances, en el estado de Guanajuato son escasos los estudios que integren el modelado tridimensional detallado con la contrastación cualitativa de datos experimentales en infraestructuras viales locales. El Túnel Los Ángeles, con una longitud de 1,126 m, una intersección en T a los 200 m y salidas y respiraderos distribuidos a lo largo de su recorrido representa un caso de estudio relevante, ya que su diseño influye directamente en la circulación del aire y, por ende, en la calidad del ambiente interior. [11,12,14,17,21] En este estudio se aborda la evaluación de la calidad y el flujo del viento en túneles y otras CFD (Computational Fluid Dynamics).

Ante este panorama, el presente trabajo tiene como objetivo desarrollar una simulación CFD del Túnel Los Ángeles para evaluar el comportamiento del flujo de aire en función de su geometría y establecer su relación cualitativa con la distribución de concentraciones de monóxido de carbono obtenidas en mediciones experimentales. Se describe el proceso de modelado en Autodesk Inventor, la generación de mallas y la configuración numérica en OpenFOAM, así como el procesamiento de resultados en ParaView. Posteriormente se analizan los campos de velocidad, temperatura y presión, y se contrastan con los registros de contaminantes, finalizando con las conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio. [1,10,16,18,19,20] En el presente estudio se aborda la descripción de la presencia de la geometría, así como de las concentraciones de CO en el ambiente.

Objetivo general

El objetivo general del trabajo es desarrollar una simulación mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) del Túnel Los Ángeles, en Guanajuato, para evaluar el comportamiento del flujo de aire en función de su geometría y establecer su relación cualitativa con la distribución de concentraciones de monóxido de carbono obtenidas mediante mediciones experimentales.

Objetivo especifico

Elaborar el modelo tridimensional de la infraestructura en Autodesk Inventor, considerando sus dimensiones totales y características particulares como la salida a los 5 m, la intersección en T a los 200 m y los respiraderos distribuidos en su recorrido.

Preparar el dominio computacional mediante la conversión del modelo al formato STL y la generación de la malla adecuada para la simulación en OpenFOAM.

Configurar el entorno de trabajo en sistema operativo Ubuntu e implementar el modelo numérico, estableciendo las ecuaciones de gobierno, modelos de turbulencia y condiciones de frontera correspondientes.

Obtener y analizar los campos de velocidad, temperatura y presión para identificar cómo la geometría modifica la circulación del aire.

Procesar los resultados en ParaView y contrastarlos cualitativamente con los registros de concentración de monóxido de carbono, para establecer la correspondencia entre la dinámica del flujo y los patrones de acumulación del contaminante.

Metodología

El diseño de la geometría del túnel de Los Ángeles, ubicado en Guanajuato (México), implicó la elaboración de un modelo tridimensional utilizando el software Autodesk Inventor. Para ello, se desarrolló una malla computacional mediante el uso de bloques mesh. El diseño del túnel se inició con la identificación de sus intersecciones, incluyendo una salida a los 5 m, una intersección en T a los 200 m y los respiraderos ubicados a lo largo del túnel. Las dimensiones del túnel son de 1,126 m de longitud, 7 m de alto, 4 m de ancho. Una vez completado el proceso en el programa, se generó la malla utilizando la geometría del túnel para la simulación.

Posteriormente, se procedió a la programación del sistema operativo Windows mediante la implementación de la virtualización de WCL 2. Una vez completada esta etapa, se procedió a la instalación de Ubuntu en el sistema operativo Windows. Una vez instalado el software Ubuntu, se requirió el uso de código abierto, en el cual se introdujeron los códigos de comandos necesarios para llevar a cabo la simulación. Además, se descargó OpenFome, la versión más reciente.

En el proceso de configuración de los modelos se implementaron las ecuaciones de Navier-Stokes, el modelo de turbulencia (k-k-SST), y la ecuación de transporte de especies, estableciéndose simultáneamente las condiciones de frontera e iniciales.

Ecuación de Continuidad (Conservación de Masa)

Para flujos incompresibles con densidad variable:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho u) = 0$$

Donde: ρ = densidad del fluido [kg/m³], u = vector velocidad [m/s], t = tiempo [s].

Ecuación de Navier-Stokes (Conservación de Momento)

Para flujos incompresibles con densidad variable:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla \rho + \mu \nabla^2 \mathrm{u} - \frac{2}{3} \mu \nabla (\nabla \cdot \mathrm{u}) + \rho \mathrm{g}$$

Donde: p = presión [Pa], μ = viscosidad dinámica [kg/(m·s)], g = aceleración gravitacional [m/s²].

Ecuación de Transporte de Especies (Contaminantes)

La ecuación de transporte de fracción másica del contaminante:

$$\frac{\partial (\rho S)}{\partial \mathrm{t}} + \nabla \cdot (\rho \mathrm{Su}) = \nabla \cdot (\rho \mathrm{Ds} \nabla \mathrm{S}) + \mathrm{qs}$$

Donde: S = fracción másica del contaminante [adimensional], DS = coeficiente de difusión del contaminante [m²/s], qS = término fuente de contaminante [kg/(m³·s)].

Ecuación de Transporte de Escalar Pasivo (OpenFOAM)

En OpenFOAM, el solver scalarTransportFoam resuelve la siguiente ecuación de

convección-difusión:

$$\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{t}} + \nabla \cdot (\mathrm{uT}) - \nabla \cdot (\mathrm{D} \tau \nabla \mathrm{T}) = 0$$

Donde: T = escalar transportado (concentración) [adimensional], u = campo de velocidad del fluido [m/s], DT = coeficiente de difusión [m²/s].

Una vez determinado el solver pertinente, se procedió a la definición de parámetros numéricos y esquemas de discretización. Posteriormente, se configuraron los tiempos mediante los cuales se ejecutaría la simulación en nuestro programa. En la sección subsiguiente, se presentan los parámetros numéricos y esquemas utilizados,

Modelo k- (k-epsilon)

Es el modelo de turbulencia de dos ecuaciones más popular. Resuelve dos ecuaciones

de transporte:

Ecuación de Energía Cinética Turbulenta (k):

$$\frac{\partial (\rho \mathrm{k})}{\partial \mathrm{t}} + \nabla \cdot (\rho \mathrm{uk}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu \mathrm{t}}{\sigma \mathrm{k}} \right) + \mathrm{Pk} - \rho \epsilon$$

Ecuación de Tasa de Disipación ():

$$\frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial \mathrm{t}} + \nabla \cdot (\rho \mathrm{u} \epsilon) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu \mathrm{t}}{\sigma \epsilon} \nabla \epsilon \right) + \mathrm{C1} \frac{\epsilon}{\mathrm{k}} \mathrm{Pk} - \mathrm{C2} \rho \frac{\epsilon^2}{\mathrm{k}}$$

Viscosidad Turbulenta:

$$\mu t = \rho C \mu \frac{K^2}{\epsilon}$$

Coeficientes del modelo k- estándar:

Cμ = 0,09

C1 = 1,44

C2 = 1,92

σk = 1,0

σε = 1,3

Una vez recabados todos los datos pertinentes, se procedió a la ejecución del procedimiento. Con anterioridad al OpenFoam, se llevó a cabo la descarga de paraView en los equipos informáticos, donde se inició la simulación para verificar la ausencia de errores.

El propósito de este estudio es examinar la metodología empleada en la visualización de los resultados obtenidos por el programa informático paraView. Dichos resultados se han analizado a lo largo del tiempo previamente programado, con el objetivo de observar el momento en el que se producen las alteraciones en las variables de interés, tales como la velocidad, la temperatura y la presión.



Figura 3. Diagrama de flujo de la simulación de CFD del Túnel los Ángeles, Guanajuato.

Resultados

En los resultados de la simulación se evidencia que la figura 4 de velocidad, el flujo se mantiene bajo y uniforme en la mayor parte del tramo recto del túnel. Los valores más elevados se manifiestan de manera localizada en los puntos de cambio de geometría, tales como la primera salida, la intersección en forma de T y las inmediaciones de los respiraderos. Este fenómeno se explica por la reducción temporal del área efectiva de paso en dichas zonas. De acuerdo con el principio de conservación de la masa, la velocidad aumenta para

mantener constante el caudal que circula. A esto se suma el efecto de las aperturas hacia el exterior, que generan diferencias de presión que impulsan el movimiento del aire. Al alejarse de estas zonas, el flujo recupera su estabilidad y la velocidad vuelve a sus valores habituales, reduciéndose por efecto de la fricción contra las paredes.



Figura 4 del punto máximo de velocidad dentro del túnel

Se observa en la figura 5 la temperatura se mantiene notablemente constante a lo largo de la mayor parte del trayecto, oscilando en valores cercanos a los 31 y 32 °C en los segmentos rectos que no experimentan variaciones. Se evidencia un incremento localizado que alcanza casi los 37 °C en la zona de la intersección en T y los respiraderos, para posteriormente reducirse y estabilizarse al avanzar hacia el final. Esta variación no es aleatoria, sino que se produce como resultado de la interacción entre dos fluidos en movimiento. Durante el proceso de cruce, el flujo experimenta un cambio de dirección, lo que resulta en una división de este. Esta división genera una mayor turbulencia, lo que a su vez provoca una disipación de parte de la energía del movimiento en forma de calor. Asimismo, se evidencia la influencia del intercambio térmico con el exterior a través de las salidas, lo que conlleva a que la variación se restrinja exclusivamente a esta área y no altere las condiciones del resto del túnel.

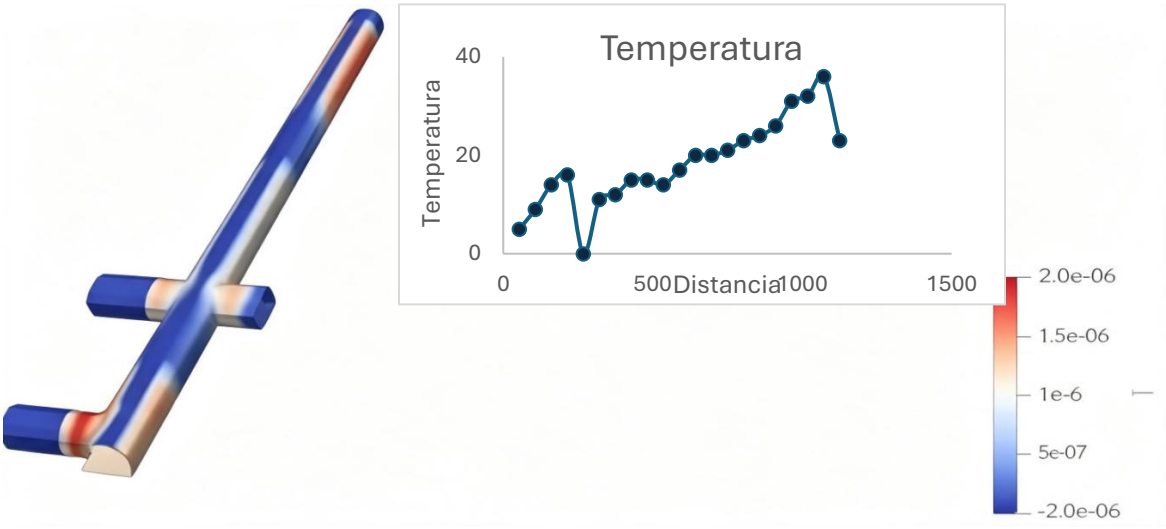


Figura 5 que muestra el máximo la temperatura dentro del túnel.

La figura 6 muestra que la presión se mantiene prácticamente constante en todo el tramo principal del túnel, donde el flujo circula sin grandes perturbaciones. Las reducciones de la presión se manifiestan exclusivamente en las ramas laterales, en las salidas y, de manera notable, en la zona de la intersección en T. Este fenómeno, descrito por el principio de Bernoulli, implica que en áreas donde se aumenta la velocidad del aire, la presión atmosférica experimenta un descenso proporcional. Además, al estar estas zonas conectadas con el ambiente exterior, la presión tiende a igualarse con la del exterior, lo que acentúa esta caída. Estos hallazgos respaldan la hipótesis de que las variaciones de presión son predominantemente causadas por la geometría del trayecto y las aperturas del túnel.

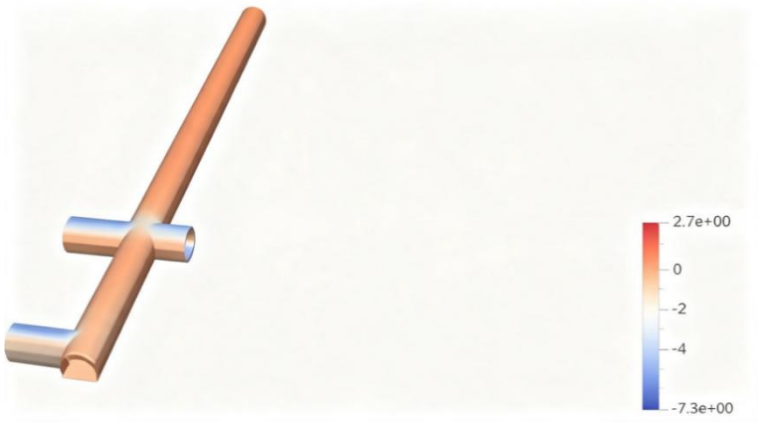
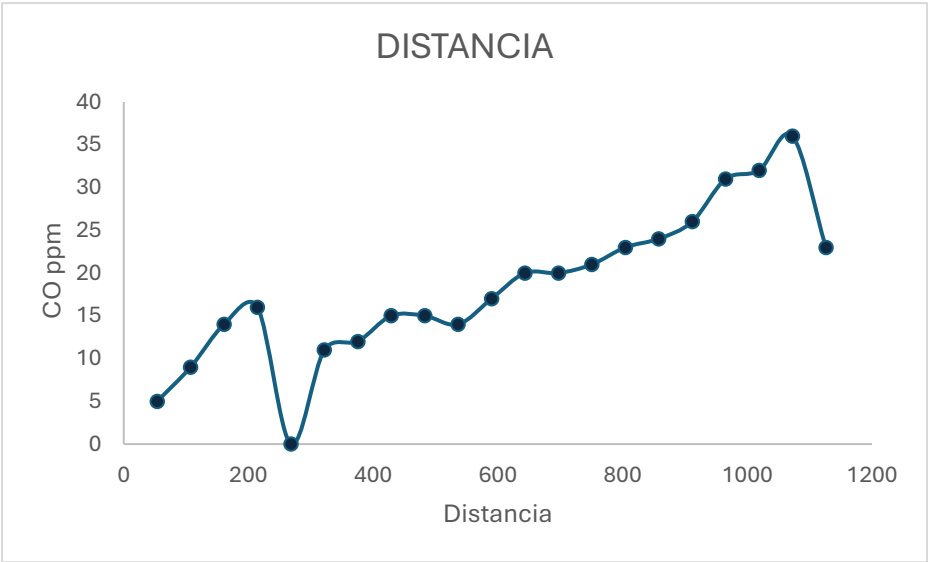


Figura 6 en la que se muestra el punto máximo de la presión en el túnel.



La figura 7 muestra la variación de la concentración de CO a lo largo del túnel Los Ángeles. Para la obtención de los datos, se realizaron mediciones con una frecuencia de 53,62 m desde el punto de entrada hasta el punto de salida del túnel.

El análisis de los datos permite observar una tendencia general de incremento de la concentración a medida que se incrementa la distancia, alcanzando el valor máximo de 36 ppm en el punto ubicado a 1,072,40 m. En el punto final de 1,126,02 m, la concentración disminuye a 23 ppm, lo que puede estar relacionado con una mayor

renovación del aire en la zona de salida del túnel. El valor de 0 ppm registrado en el punto a 268,10 m se considera un posible dato atípico.

Conclusión:

El presente estudio demuestra la viabilidad y utilidad de la Dinámica de Fluidos Computacional como herramienta complementaria para evaluar el comportamiento aerodinámico y la distribución de contaminantes en infraestructuras viales subterráneas, tomando como caso de estudio el Túnel Los Ángeles, ubicado en el estado de Guanajuato. La metodología aplicada que comprendió el modelado geométrico tridimensional, la generación de mallas computacionales, la implementación de modelos físicos basados en las ecuaciones de continuidad, Navier-Stokes, transporte de especies y el modelo de turbulencia k-ω SST, así como la contrastación cualitativa con mediciones experimentales permitió reproducir de manera consistente los patrones de flujo y las variaciones de las variables termodinámicas asociadas a las características geométricas de la obra.

Los resultados obtenidos indican que la configuración estructural del túnel constituye el factor determinante en el comportamiento del aire: la velocidad se mantiene baja y uniforme en los tramos rectos, aumentando solo de forma localizada en zonas de reducción de área útil o presencia de aperturas como la salida a los 5 m, la intersección en T y los respiraderos, en concordancia con el principio de conservación de la masa. Por su parte, la temperatura se conserva estable entre 31 y 32 °C en la mayor parte del recorrido, registrando un incremento circunscrito a la zona de la intersección como consecuencia de la mayor disipación de energía por turbulencia y el intercambio térmico con el exterior. Asimismo, las variaciones de presión obedecen al principio de Bernoulli, presentando descensos proporcionales a los aumentos de velocidad en las zonas de cambio de geometría y conexión con el ambiente exterior.

La comparación cualitativa con los registros experimentales de monóxido de carbono evidencia una correspondencia entre los patrones de circulación del fluido y la distribución del contaminante: el incremento progresivo de la concentración hasta alcanzar un valor máximo de 36 ppm a los 1072,40 m coincide con los tramos de flujo más estable y renovación de aire limitada, mientras que la disminución final a 23 ppm responde a las condiciones de mayor intercambio ventilatorio en la zona de salida. Se confirma así que la acumulación de agentes contaminantes no responde a factores aleatorios, sino que está directamente ligada a las características aerodinámicas impuestas por la geometría de la infraestructura.

En términos generales, se valida la metodología empleada para la evaluación de la calidad del aire en túneles urbanos, constituyendo una base técnica útil para la optimización de sistemas de ventilación y la toma de decisiones orientadas a la mitigación de riesgos asociados a la exposición de usuarios a contaminantes atmosféricos. Se recomienda para futuros trabajos ampliar el alcance mediante la incorporación de datos de tráfico real, la calibración cuantitativa de los modelos y la evaluación de escenarios operativos diversos.

Bibliografía/Referencias

[1] Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). (2020). Air quality and indoor air pollutants. Recuperado de https://www.epa.gov/

[2] Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas, A.C. (AMITOS). (2013). Los túneles de Guanajuato. Obras Subterráneas, 1(2). Recuperado de https://www.amitos.org/wp-content/uploads/2020/05/os2.pdf

[3] Balbastro, G. C., & Sonzogni, V. E. (2007). Simulación de un ensayo en túnel de viento aplicando CFD. Mecánica Computacional, (44), 3779-3787

[4] Bravo, J., Sánchez, L., Coello, E., & Peñafiel, A. (2022). Contaminación del Medio Ambiente por parte del Ingenio Valdez. Universidad y Sociedad, 55(14), 79–86. Recuperado de https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/3273

[5] Cevallos Álava, D. W., & Fajardo Vergara, S. M. (2025). Análisis y simulación del flujo de aire en un túnel de viento para pruebas aerodinámicas en la carrera de Electromecánica en la ULEAM Extensión El Carmen

[6] Contreras, C., & Winckler, P. (2023). Modelación de oleaje en un canal bidimensional mediante OpenFOAM. Obras y Proyectos, (34), 6-17

[7] Cornejo-Vásconez, D., Rodríguez-Espinosa, F., & Guasumba, A. (2022). Efectos contrastivos de la evaluación de la contaminación ambiental en dos zonas del Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador. Revista La Granja, 36(2). https://doi.org/10.17163/lgr.n36.2022.08

[8] Davies, R., Buss, D. C., & Routledge, P. A. (2000). Monóxido de Carbono. En E. Mencías y L. M. Mayero (Eds.), Manual de Toxicología Básica (pp. 593-595). Editorial Díaz de Santos

[9] Dávila Clavijo, R. F., & Paredes Alvarado, R. (2021). Evaluación numérica de la influencia del modelo de turbulencia en la caracterización hidrodinámica de una hélice marina usando OpenFOAM. ESPOL, FIMCM: Naval

[10] Epalza, I. (2019). Monitoreo continuo de monóxido de carbono en centros comerciales: Aplicaciones en ventilación subterránea. Revista de Ingeniería y Tecnología, 123-130

[11] Escobar, J. M., Magnou Gaudino, F. A., Diaz, F., Coppolecchia, N. G., & Caron, P. A. (2023). Mejora de calidad de flujo en túnel de viento. En VII Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica (CAIA 7). La Plata

[12] Escobar, J. M., Magnou Gaudino, F. A., Diaz, F., Coppolecchia, N. G., & Caron, P. A. (2023). Mejora de calidad de flujo en túnel de viento. En VII Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica (CAIA 7). La Plata

[13] Flores, D. J. C., Lemus, M. A. L., González, A. R. P., Molina, A. Z., & Alonso, O. C. (2025). Monitoreo de la concentración de partículas (PM2.5 y PM10) y CO en la subterránea de Guanajuato y riesgos a la salud. Jóvenes en la Ciencia, 37, 1-14

[14] Google Maps. (2026). Túnel El Barretero [Mapa]. Recuperado de https://www.google.com/maps/place/Túnel+El+Barretero,+Guanajuato/@21.0196408,101.2579873,3530m/

[15] Gómez, J., & Valcarce, F. (2003). Tóxicos detectados en muertes relacionadas con fuegos e intoxicaciones por monóxido de carbono. Revista de Toxicología, 20, 38-42

[16] Gómez, M. A. (2021). Aplicaciones de sensores para la detección de monóxido de carbono en sistemas de ventilación en sótanos. Universidad Técnica de Madrid

[17] Grosjean, D., & Grosjean, E. (2002). Airborne carbonyls from motor vehicle emissions en dos túneles de carretera. Informes de Investigación del Instituto de Efectos en la Salud, 107, 57-78

[18] Guanotasig Unaucho, A. F. (2025). Simulación numérica de la dispersión de contaminantes en el aire en una zona crítica de tráfico

[19] Justiniani Arohuanca, G. D., & Malpartida Vargas, A. G. (s.f.). Implementación de un sistema de extracción de monóxido de carbono y diseño de un módulo de sensado de calidad de aire para un estacionamiento subterráneo de dos niveles

[20] Machaca, D. M. Y. (2023). Evaluación espacio–temporal de la calidad del aire determinado por material particulado PM2.5 y monóxido de carbono mediante un monitor de medición en 6 principales tramos urbanos en Juliaca-2021. Universidad Nacional del Altiplano de Puno

[21] Magaña-Reyes, M., Palma-Jaimes, J. L., Páramo-Figueroa, V. H., Blanco-Jiménez, S., Martínez-Reyes, C. A., & Mugica-Álvarez, V. (2026). Perfiles de emisión de compuestos orgánicos volátiles de vehículos automotores en túneles de Monterrey y Guanajuato, México. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 42

[22] Oro, J. M. F. (2012). Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos. Reverté

[23] PIARC – Asociación Mundial de la Carretera. (2012). Túneles de carretera: Emisiones de vehículos y demanda de aire para ventilación (Informe n.º 2012R05EN)

[24] Ramírez Ruiz, C. G. (2018). Evaluación de modelos computacionales en CFD para la predicción del comportamiento del viento alrededor de edificios

[25] Téllez, J., & Rodríguez, A. (2006). Contaminación por monóxido de carbono: un problema de salud ambiental. Revista de Salud Pública, 8, 108-117

[26] Vásquez, D. I. C., Cortez, Z. A. C., Tobar, N. B. M., Cabrera, E. E. T., Real, L. Z. V., & Godoy, M. A. G. (2025). Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO_2) y sus Efectos en Enfermedades Respiratorias. SAGA: Revista Científica Multidisciplinar, 2(2)

[27] Vigne, G., Jönsson, J., & Rodríguez, F. H. (2015). Túneles con paramentos rugosos y con cavidades. Ingeniería Investigación y Desarrollo: I²+D, 15(1), 58-69

[28] Organización Mundial de la Salud. (2010). Directrices de la OMS sobre calidad del aire en interiores: contaminantes seleccionados. Recuperado de https://iris.who.int/handle/10665/260127