



## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE CONTAMINANTES DE LA CALLE SUBTERRÁNEA A TRAVÉS DE SIMULACIÓN CFD

Saraí Jezabel Barrientos Alejo <sup>a\*</sup>, Ramón Antonio Zárraga Núñez <sup>b</sup>, Gilberto Álvarez Guzmán <sup>b</sup>, Pablo Vizguerra Morales <sup>c</sup>, Luis Enrique Mendoza Puga <sup>d</sup>, César Felipe Carrillo Galván <sup>d</sup>, José Antonio Guerra Contreras <sup>b</sup>, Jorge A. Cervantes Jáuregui <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Licenciatura en Química, Departamento de Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Noria Alta s/n 36050, email: [sj.barrientosalejo@ugto.mx](mailto:sj.barrientosalejo@ugto.mx)

<sup>b</sup> Departamento de Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Noria Alta s/n 36050.

<sup>c</sup> Departamento de Minas, Metalurgia y Geología, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Avenida Juárez No. 77 Zona Centro, 36000.

<sup>d</sup> División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Avenida Juárez No. 77, Col. Centro, 36000.

### Resumen

Guanajuato es una ciudad considerada como Patrimonio Cultural de la Humanidad por la UNESCO cuenta con diferentes inmuebles de gran valor histórico y artístico, entre ellos resalta la gran calle Subterránea. Esta ha sido una importante vía de transporte terrestre, durante 60 años anexando a este tramo principal una serie de ramales subterráneo conformando así el sistema de comunicación vial de la ciudad. Sin embargo, estudios recientes demuestran que ha sufrido un gran deterioro debido al aumento del parque vehicular que transita, así como la falta de mantenimiento, originando que la combinación de agentes contaminantes provenientes del proceso de combustión de los automotores, la falta de un sistema de ventilación y otros factores aceleran el deterioro y se genera un sitio ideal para la proliferación de microorganismos los cuales pueden acrecentar este problema y afectar a los usuarios de la misma. Este trabajo presenta los resultados del análisis realizado mediante la simulación computacional de dinámica de fluido (CFD), utilizando los programas GAMBIT 2.4.6 y Fluent 16, se simularon ciertos segmentos de la calle, generando una comparativa entre los datos previos. Los valores obtenidos en este ensayo demuestran las altas concentraciones que contiene un segmento de la calle de monóxido de carbono.

*Palabras clave:* Fluent; Subterránea; CFD; Monóxido de Carbono.



## THE STUDY OF POLLUTANT BEHAVIOR IN SUBTERRANEA STREET ENVIRONMENTS THROUGH CFD SIMULATION

### Abstract

Guanajuato, a city considered a World Cultural Heritage Site by UNESCO, has several buildings of great historical and artistic value, among them the great Subterranean Street stands out. This has been an important land transportation route for 60 years, annexing to this main section a series of subway branches, thus forming the city's road communication system. However, recent studies show that it has suffered a great deterioration due to the increase in the number of vehicles that pass through it, as well as the lack of maintenance, causing the combination of pollutants from the combustion process of automobiles, the lack of a ventilation system and other factors to accelerate the deterioration and generate an ideal place for the proliferation of microorganisms which can increase this problem and affect the users of the road. This work presents the results of the analysis carried out by means of computational simulation of fluid dynamics (CFD), using the programs GAMBIT 2.4.6 and Fluent 16, certain segments of the street were simulated, generating a comparison between the previous data. The values obtained in this test demonstrate the high concentrations of carbon monoxide contained in a segment of the road.

*Keywords:* Fluent; Underground; CFD; Carbon monoxide.

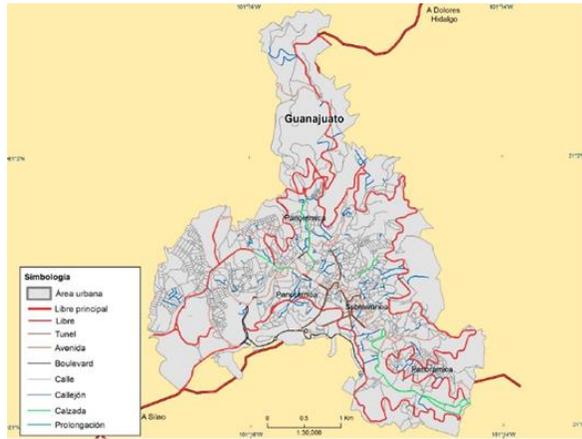
### 1. Introducción.

La ciudad de Guanajuato cuenta con un reconocimiento por la UNESCO nombrándole Patrimonio Cultural de la Humanidad en el año de 1988, debido a la presencia de diversos monumentos de gran valor histórico y arquitectónico (Ortiz y col., 2017). La ciudad también cuenta con una extensa red de túneles viales, cuya calle principal, la denominada calle Subterránea “Miguel Hidalgo” cuenta con una extensión

de 2,870 m (Mendoza y col., 2015). Dicha calle fue establecida gracias a un proyecto que tomó acción bajo el gobierno estatal de Juan José Torres Landa en 1963. El propósito de los trabajos de la construcción de la calle Subterránea inaugurada el 28 de septiembre de 1964, fue utilizar el cauce del río como una vialidad de crucial importancia para la ciudad, amén de su saneamiento, del incremento de los valores estéticos de la ciudad, y lo más importante el encapsulamiento del río Guanajuato desde el



ex-cuartel San Pedro y hasta la salida de la ciudad (conocida como Los Pastitos) cuya longitud alberga los 2,870 m. Contener el cauce del río Guanajuato fue de vital importancia porque desde la primera inundación registrada en 5 de julio de 1760 la cual fue generada por la inmensa cantidad de agua que escurrió de los cerros que rodean a ciudad hasta que desbordo el río (Carreón, 2007).



**Figura 1:** Mapa de vialidades de la ciudad de Guanajuato, México <sup>1</sup>

Hace más de treinta años se realizaron estudios sobre la calle subterránea, en la que un equipo de investigadores del posgrado en Restauración en Sitios y Monumentos de la Universidad de Guanajuato enfocó la investigación en el estado de conservación de la calle. Los resultados determinaron que la vialidad sufre un gran deterioro en los materiales de construcción que se atribuye

principalmente, sin demeritar otros factores (escurrimientos de aguas grises), a la contaminación provocada por los diversos contaminantes emitidos por los automotores de combustión interna. Al mismo tiempo, se ha considerado el efecto que tienen dichos contaminantes en la salud de quienes habitan cerca de la calle o de los usuarios que transitan por ella. En años más recientes (2019 y 2022), se realizaron nuevas investigaciones correspondientes en la calle, siendo el enfoque la obtención de diferentes parámetros ambientales que en conjunto tienen que ver con el grado de deterioro que se presenta (Álvarez y col., 2000). En términos generales, se determinaron en distintos tramos de la calle, considerados los de mayor grado de contaminación, parámetros tales como la velocidad del aire, la humedad relativa, la temperatura, la concentración y especies principales en el material particulado PM2.5 y PM10, así como concentración de gases (CO, CO<sub>2</sub>, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre), así como compuestos orgánicos volátiles (Gaviria y col., 2008). Adicionalmente, estudios con el fin identificar microorganismos que se desarrollan y pululan en el ambiente de la calle con efectos



potenciales para la salud humana (Guzman, 2022).

Este trabajo, considera los datos experimentales referidos y busca aplicar la Simulación Computacional de Dinámica de Fluidos (CFD) estableciendo de alguna manera la similitud entre tramos de la calle subterránea con la metodología aplicada en túneles de minas subterráneas con el propósito de identificar el comportamiento de las corrientes del material particulado y corrientes gaseosas y su relación con los parámetros ambientales ya referidos y que imperan en la calle subterránea (Vizguerra, 2019). Asimismo, se recurre al programa FLUENT 16, que tiene como base las ecuaciones de continuidad, momento y la más imprescindible, la ecuación de la conservación de la energía.

Ecuaciones:

Continuidad o masa (Childs, 2011).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left( \frac{\partial}{\partial x} \rho v_x + \frac{\partial}{\partial y} \rho v_y + \frac{\partial}{\partial z} \rho v_z \right) = S_m$$

Momento (Laloui & Rotta, 2020).

$$\frac{\partial}{\partial t} (p v) = -\bar{v}(p \vec{v} \vec{v}) - \bar{v} p - \bar{v} \tau + p \vec{g} + \vec{F}$$

Energía (Azimi, 2021).

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (pE) = & -\nabla(\vec{v}(pE)) - \nabla q + p(vg) \\ & - (\nabla p v) - (\nabla[\tau v]) + S_h \end{aligned}$$

Cada una de estas ecuaciones son elementales para la resolución de cada uno de los problemas planteados en FLUENT. Un ejemplo de aplicación es al involucrar la transferencia de calor en fluidos o a la vaporización de las partículas presentes, esto puede ser solucionado por la ecuación de la conservación de la energía. En torno a la ecuación de momento, se pueden resolver las cuestiones de los fluidos viscosos, por ejemplo. En general, es importante saber la relación entre cada una de las ecuaciones para entender el cómo se está desarrollado el programa en función de los casos a analizar como el comportamiento de fluidos en tuberías, túneles, ductos de ventilación, etc.

Por ende, en la presente investigación se muestran los resultados de la simulación de uno de los tramos más transitados de la subterránea que es la sección del túnel bajo el Mercado Hidalgo tratando de verificar los valores y afectaciones de los contaminantes y su comportamiento con los datos experimentales obtenidos en investigaciones realizadas previamente y referidos de manera



específica al comportamiento de las concentraciones de monóxido de carbono (CO).

## 2. Metodología.

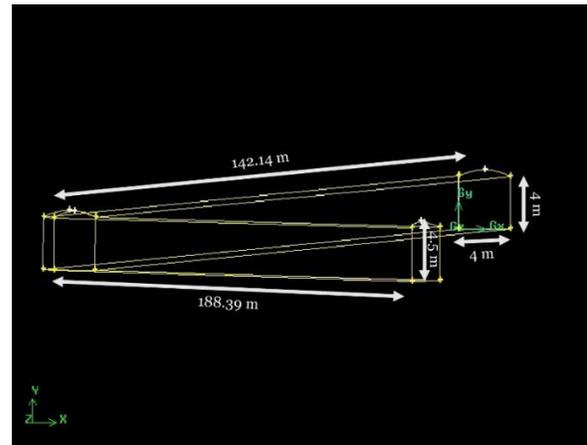
La metodología para la generación de la simulación constó de tres fases:

- I. Preprocesamiento
- II. Procesamiento
- III. Posprocesamiento

En la fase I, el preprocesamiento, éste se realizó con el propósito de obtener las medidas reales de los tramos de la calle, información faltante en cuanto a muchos detalles, y constó de la realización de levantamientos topográficos realizados por un equipo especializado, en los tres tramos de mayor circulación vehicular y a la vez los que en gran medida concentran a la mayor cantidad de usuarios en la calle, al haber paradas de los autobuses de pasajeros. Esos tramos son: la parte baja del Mercado Hidalgo; zona conocida como el Abanico; y parte baja del Jardín de la Unión. Los levantamientos topográficos se efectuaron con el equipo de una Estación Sokkia con modelo IM-50series.

Una vez que se contó con esta información, se configuraron los elementos geométricos de los tramos de la calle ya referidos y se realizó el mallado en el programa de simulación GAMBIT 2.4. El mallado implementado en la

**Figura 2:** Dibujo del área debajo del Mercado Hidalgo



experimentación fue de tipo mixto tetraédrico y hexagonal. Específicamente para el tramo del Mercado Hidalgo se registraron una cantidad de 9,984 unidades (figura 2) utilizando las siguientes dimensiones para el mallado:

- Dimensiones de 4 m de ancho, 4 m de alto y 4.5 m de altura del arco con una longitud de 188.39 m.
- El uso de un tubo de combustión semejando la acción de un automóvil con 0.5 m de radio y 1 m de alto.

Una vez concluido el modelado del dibujo y el mallado de cada uno de los tramos de la



calle, se procedió a introducir las condiciones de frontera las cuales se indican en las tablas; en la tabla 1 se encuentra los valores

establecidos para la zona bajo el Mercado Hidalgo.

**Tabla 1:** Datos del área debajo del Mercado Hidalgo

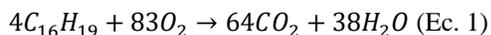
Condiciones de frontera	Tipo de condición	Valores de condición	
		Velocidad (m/s)	Temperatura (K)
Entrada túnel	Entrada de flujo másico	0.6	299
Salida túnel	Salida de flujo másico	-	297
Paredes, piso y techo	Pared	-	296
Entrada combustible	Entrada de flujo másico	20	310
Entrada aire	Entrada de flujo másico	0.5	310
Salida contaminante	Salida de flujo másico	1	310
Pared tubo	Pared	-	310

Para la realización de la fase II, el procesamiento, se extrajo el mallado como archivo “mesh”. A continuación, utilizando el programa Fluent 16 de Ansys, se hizo la captura del mallado, al que se insertaron las propiedades físicas de los materiales de construcción de cada uno de los tramos de la

calle a ser estudiados. Los materiales constructivos identificados fueron hormigón, concreto y cantera (toba riolítica). Como parte esencial de la metodología, se consideró que la reacción química a considerar en los tramos de la calle se refiere a la simulación



del proceso de combustión en un motor de vehículo automotor:



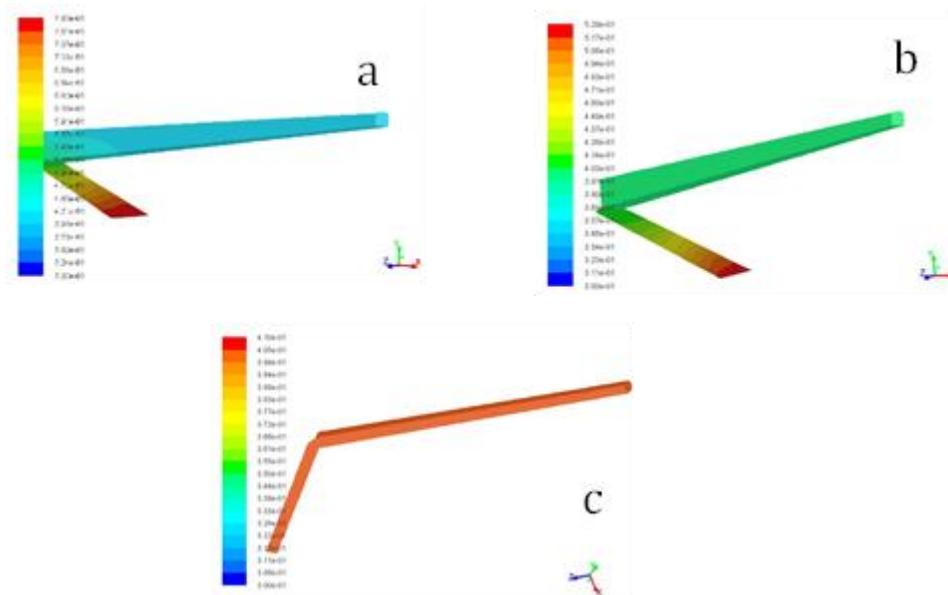
A diferencia de la reacción de combustión normal de la gasolina (Ec. 1), esta reacción, de la que se obtiene como producto al monóxido de carbono (Ec. 2), fue considerada en la simulación ya que al análisis de monóxido de carbono (CO) fue al que se le dio especial seguimiento durante la obtención de datos experimentales en la calle. De manera complementaria, se realizaron trazos de líneas y ejes con el fin de poder visualizar el valor obtenido una vez realizada la simulación.

Como parte final, la fase III, el posprocesamiento, éste consistió en exportar los resultados de la simulación. realizó en se realizó forma estacionaria y transitoria. Dependiendo del punto o área solicitada, y verificando los valores obtenidos desde los reactantes hasta los productos y en función también de la velocidad, estos datos fueron obtenidos en distintos tiempos de la simulación, ya que, haciendo intervenciones a cada cierto tiempo en segundos, fue posible apreciar diferencias en el experimento.

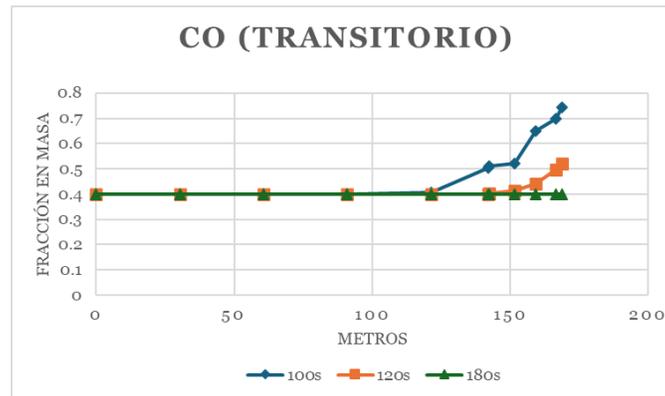
En función de los resultados, éstos se dividieron en dos secciones las cuales representan cada producto obtenido de la combustión de la gasolina los cuales son monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ) que también fue simulado en este tramo de la calle Subterránea. El modelado se realizó a una escala de  $1 \text{ m} = 0.33 \text{ cm}$ , para facilitar el manejo de datos.

## 2. Análisis de resultados.

Primeramente, para los valores simulados de monóxido de carbono, estos se obtuvieron tanto en estado transitorio como en estacionario en los mismos tiempos 100, 120 y 180 segundos; de la figura 3 a la figura 5 se puede visualizar la variación que existe entre la cantidad de masa de CO que va aumentando con respecto al tiempo transcurrido durante la simulación. El color que predomina en los 100 segundos es el azul, que tiene un rango entre  $3.73 \times 10^{-1}$  hasta los  $4.70 \times 10^{-1}$  fracción de masa. Mientras que en los 120 segundos la concentración del compuesto aumenta mostrando una coloración predominantemente azul verdoso por lo tanto cuenta con una concentración entre  $3.91 \times 10^{-1}$  hasta los  $4.0310^{-1}$ . Finalmente, a los 180 segundos, se encontró que hay una concentración constante a lo



**Figura 3:** Simulación transitoria a) fracción en masa de CO en 100 s, b) fracción en masa de CO 120 s, c) fracción en masa de CO en 180 s.



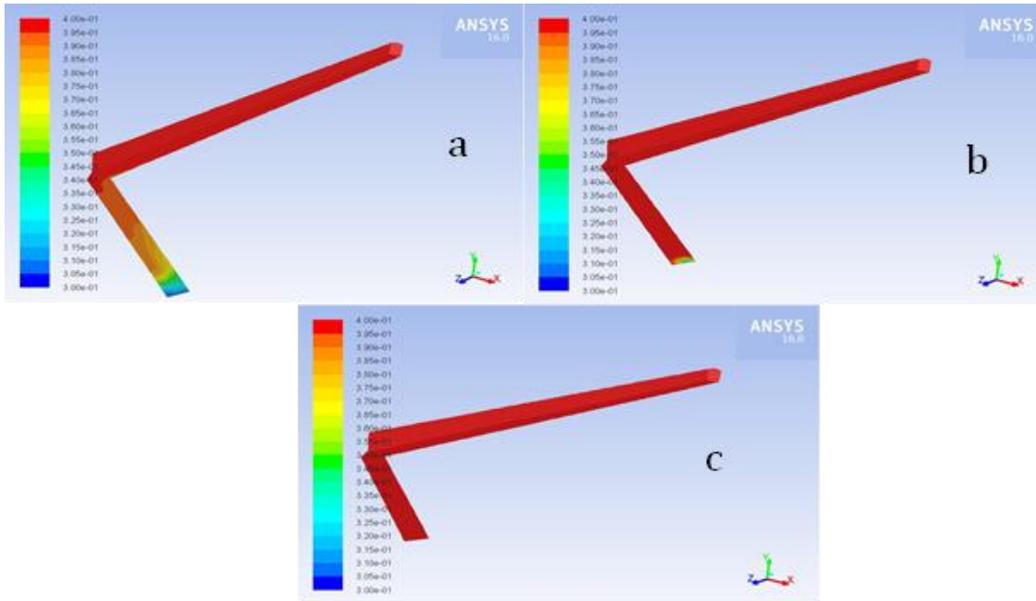
**Gráfica 1:** Valores de todos los tiempos de simulación transitoria de monóxido de carbono

largo del túnel entre los  $3.99 \times 10^{-1}$  hasta los  $4.05 \times 10^{-1}$ . En general, cada gráfico coincide en que la concentración de monóxido de carbono es superior en la parte final del túnel.

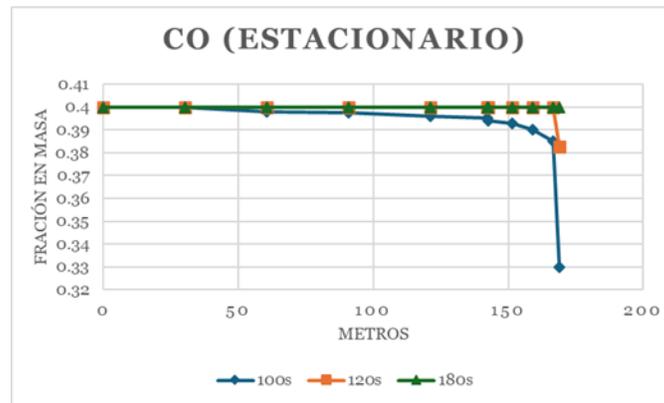
La gráfica de valores de CO obtenidos a partir de los diversos tiempos establecidos brinda la información concisa de lo que representa cada una de las ilustraciones previas. Se aprecia

que hay una concentración igual al inicio del tramo del túnel, sin embargo, después de pasar la curva comienzan a subir los niveles de CO, hasta que en cierto tiempo esta concentración comienza a ser del mismo nivel a lo largo de éste.

Al realizar el experimento de manera estacionaria, los valores de la concentración



**Figura 4:** Simulación estacionaria a) fracción en masa de CO en 100 s, b) fracción en masa de CO 120 s, c) fracción en masa de CO en 180 s.

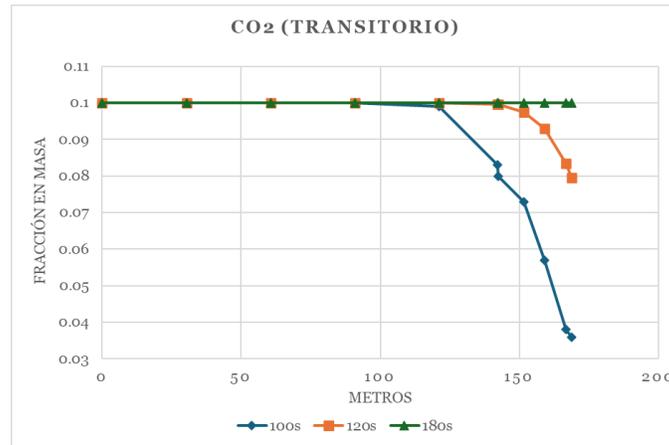


**Gráfica 2:** Valores de todos los tiempos de simulación estacionaria de monóxido de carbono

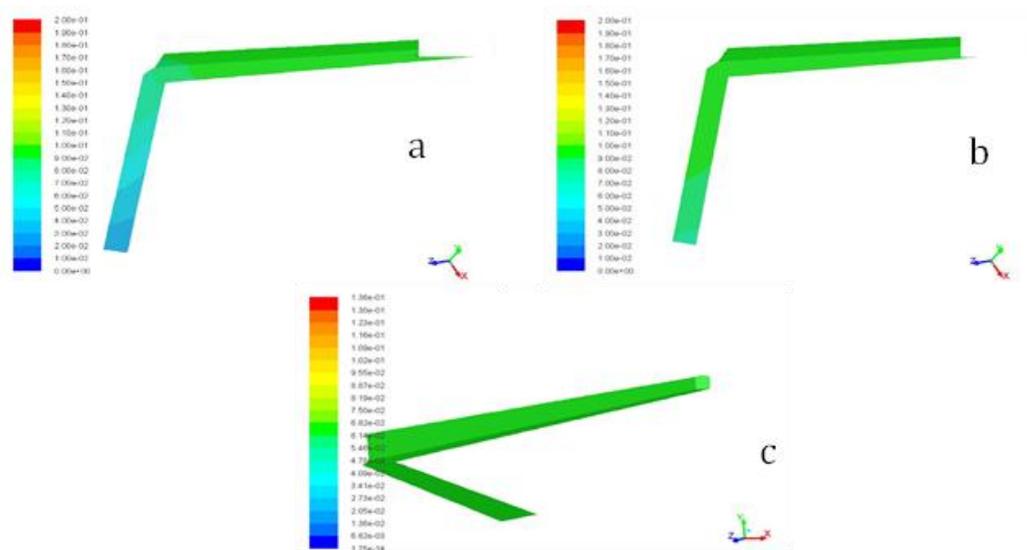
cambian de manera considerable. Como se muestra en la figura 4, el comportamiento de la concentración del CO suele ser muy similar en cada uno de los tiempos establecidos, por ende, se puede inducir que el monóxido de carbono llega a contaminar más rápido de manera estacionaria. Al igual que con los valores transitorios los valores estacionarios

también presentan una gráfica la cual demuestra cómo es su comportamiento al pasar el tiempo.

La principal característica que diferencia los datos de manera estacionaria con los transitorios es que estos descienden, y, por tanto, se indica que la sección después de la



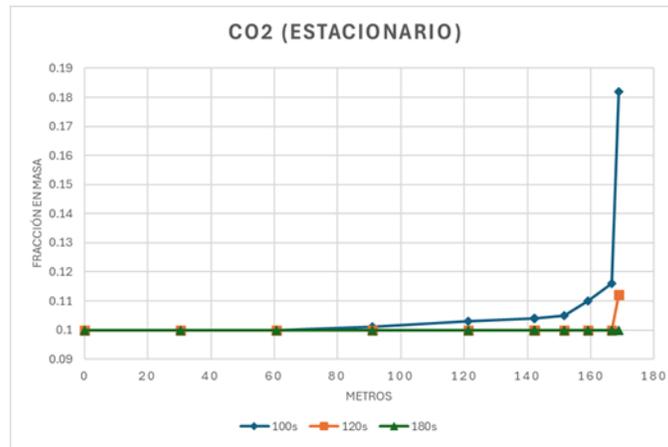
**Gráfica 3:** Valores de todos los tiempos de simulación transitoria de dióxido de carbono



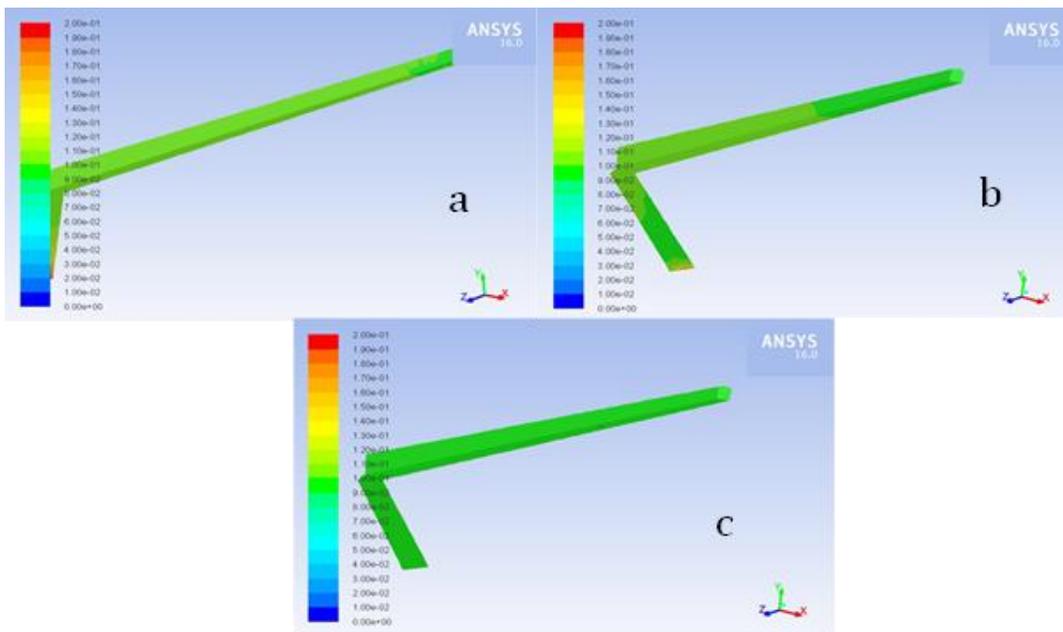
**Figura 5:** Simulación transitoria a) fracción en masa de  $CO_2$  en 100 s, b) fracción en masa de  $CO_2$  en 120 s, c) fracción en masa de  $CO_2$  en 180 s.

curva suele contaminarse más lento por CO. Por otro lado, los datos tampoco suelen variar tanto como los transitorios. Con respecto al dióxido de carbono, ( $CO_2$ ) este compuesto también se analizó conforme al mismo intervalo de tiempos en segundos, como se muestran la figura 5; para los 100s se demuestra que las concentraciones del gas

son las de mayor concentración antes de la curva, y llegando casi a cero a los pocos metros posteriores a la curva. En el caso de los 120 s, la concentración se mantiene antes de la curva, sin embargo, aumenta casi al mismo nivel posterior a ésta. Finalmente, a los 180 s se obtiene un nivel constante en la concentración completa del túnel, lo cual es



**Gráfica 4:** Valores de todos los tiempos de simulación transitoria de dióxido de carbono



**Figura 6:** Simulación estacionaria a) fracción en masa de  $CO_2$  en 100 s, b) fracción en masa de  $CO_2$  120 s, c) fracción en masa de  $CO_2$  en 180 s.

semejante a los resultados obtenidos de monóxido de carbono. A diferencia de los valores de simulación transitoria del monóxido de carbono, la información brindada de la gráfica 3 revela que la concentración que hay dentro del túnel después de cada intervalo de tiempo por

iteración va disminuyendo poco a poco dependiendo de la ubicación. Únicamente en el primer caso bajan sus concentraciones drásticamente llegando a casi cero (0.036), por ende, concuerda con la ilustración 5. De igual manera, para los 120 segundos,



disminuye de manera reducida en comparación al primer caso. A los 180 s, la concentración se mantiene igual en toda el área del túnel.

Con relación al caso de estudio del estado estacionario de la simulación de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), al realizar el análisis de cada etapa de la experimentación se encontró que no hay un cambio real de la concentración a lo largo del túnel, más que algunas variaciones a la salida. Todas estas variaciones se comprueban con la gráfica 4 ya que no hay un cambio notorio en los datos.

Así mismo, su fracción en masa es considerablemente baja si se compara con los valores de la concentración del monóxido de carbono (CO).

#### **4. Conclusión.**

En conclusión, los resultados obtenidos de los estudios por CFD de cada uno de los casos referidos a contaminación por una reacción de combustión mediante la cual el producto principal es monóxido de carbono, se observó que conforme es el consumo de combustible de los automotores, mientras el estado sea transitorio en la vialidad del túnel, los valores arrojan que con respecto a periodo de tiempo que pase en segundos, y considerando solo un

motor, las concentraciones del CO aumentarán hasta que toda esta sección de la calle Subterránea este contaminada por la misma concentración. En cambio, con relación al  $CO_2$  hay un cambio significativo, ya que en estas circunstancias las cifras descienden un poco en la parte final del túnel. Por otra parte, la experimentación estacionaria manifiesta que la variabilidad de las concentraciones no es representativa.

Finalmente, esta investigación permite sustentar los resultados experimentales obtenidos en los estudios más recientes (2019 y 2022) con respecto al grado de contaminación que se presenta en esta zona muy transitada de la calle subterránea, tomando como caso la concentración de monóxido de carbono. Asimismo, este comportamiento de la concentración de monóxido de carbono en la calle subterránea “Miguel Hidalgo” permite entender de mejor manera como es que este compuesto, generado por la combustión incompleta en los motores de los vehículos que circulan por esta vialidad, es encontrado en mayor concentración en la calle, siendo un aspecto de gran relevancia a considerar para salvaguardar la salud de quienes somos usuarios de este histórico inmueble, tal vez, único en el mundo.



## 5. Dedicatoria.

A la memoria del doctor Alberto Florentino aguilera, al amigo, al profesor de múltiples generaciones, al universitario comprometido y al motivador que, con su permanente entusiasmo en la enseñanza, entre otros temas se interesó en promover, aplicar y difundir el CFD, siendo este trabajo uno sugerido por el y a ser realizado alguna vez...

## 6. Agradecimientos.

Agradecimientos a la cuadrilla de topografía de la Compañía de Servicios de Consultoría en Infraestructura Vial, S.A. de C.V. Dirigida por Cesar Carrillo y colaboradores.

## Fuentes Bibliográficas.

Álvarez Gasca, D. E., Cervantes McSwinney, M. E., & Juárez Sandoval, E. (2000). Calle Subterránea de Guanajuato: Su estudio y conservación. Guanajuato: Los Autores

Azimi, A. H. (2021). 16 - An introduction to hydraulic structures. En P. Samui, H. Bonakdari, & R. Deo (Eds.), Water engineering modeling and

mathematic tools (pp. 297–342). Elsevier.

Carreón Nieto, M. del C. (2007). Desastre de Guanajuato: La inundación del 5 de julio de 1760. Tzintzun, 45, 11–32

Childs, P. R. N. (2011). Chapter 2 - Laws of motion. En P. R. N. Childs (Ed.), Rotating flow (pp. 17–52). Butterworth-Heinemann.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382098-3.00002-0>

Gaviria, C. F., Benavides, P. C., & Tangarife, C. A. (2008). Contaminación por material particulado (PM 2,5 y PM 10) y consultas por enfermedades respiratorias en Medellín.

Guzmán Gilberto, Á., et al. (2022). Caracterización de los agentes de deterioro que afectan a la calle subterránea de Guanajuato

Laloui, L., & Rotta Loria, A. F. (2020). Chapter 3 - Heat and mass transfers in the context of energy geostructures. En L. Laloui & A. F. Rotta Loria (Eds.), Analysis and design of energy geostructures (pp.



69–135). Academic Press.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816223-1.00003-5>

Mendoza Puga L. E., Alejandra, C. B., & Eréndira, C. M. (2015). Capacidad y niveles de servicio viales de la calle Miguel Hidalgo. En B. Valdivia (Ed.), *De Rio a Calle* (pp. 228–262). Universidad de Guanajuato.

Ortiz Álvarez, M. I., Tamayo Pérez, L. M. O., González Sánchez, J., & Villaseñor Franco, A. (2017). Vista de Guanajuato, «Ciudad Patrimonio de la Humanidad». ¿Oportunidad o desafío para el turismo sostenible? *Arbor*. <https://doi.org/10.3989/arbor.2017.785n3008>

Vizguerra Morales, P., et al. (2019). Estudio dinámico mediante simulación por CFD del efecto de un sistema de ventilación mono extractivo en la concentración de partículas suspendidas en minas subterráneas. *Geomimet*, 7–10.