



Caracterización de los agentes de deterioro que afectan a la calle subterránea de Guanajuato

*Álvarez Guzmán Gilberto, *Martínez Piñeiro Esmeralda L., *Cervantes Jauregui Jorge A. *Salazar Barrientos Tamara V., *Palafox Rivas Leslie, *López Alarcón Luis D.A., *Morales Sánchez Luisa F., **Esquivel Longoria Marco I., ***Zamorategui Molina Adrián

*Departamento de Química, Cuerpo Académico de Química y tecnología del Silicio, División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato, Noria Alta s/n 36050, email: g.alvarez@ugto.mx, esmeraldamartinez@ciencias.unam.mx, jauregi@ugto.mx, tv.salazarbarrientos@ugto.mx, l.palafoxrivas@ugto.mx, lda.lopezalarcon@ugto.mx, lf.moralessanchez@ugto.mx

**Centro de Ciencias atmosféricas, División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato, email: mi.esquivel@ugto.mx

***Departamento de Ingeniería Civil, División de Ingenierías, Universidad de Guanajuato, Avenida Juárez No.77 Zona Centro, 3600, email: zamorategui@ugto.mx

Resumen

La calle subterránea Miguel Hidalgo es uno de los accesos de importancia histórica de la ciudad de Guanajuato. La calle, construida en el año 1964 sobre el lecho del río Guanajuato se encuentra dentro de la poligonal de la declaratoria de Patrimonio Mundial conferido por la UNESCO en el año de 1988. En la década de los 80's del siglo pasado, se realizó una investigación multidisciplinaria que además del análisis estructural, incluyó un estudio sobre las condiciones de deterioro de los materiales constructivos y con ello evaluar el impacto provocado por la creciente circulación de vehículos automotores. Con base a lo anterior y considerando el aumento inusitado del parque vehicular derivado del crecimiento de la ciudad y de la población flotante asociada con el turismo, este estudio muestra la tipología de contaminantes presentes y su relación con el deterioro de los materiales constructivos en comparación hasta donde sea posible con los estudios previos realizados. Para ello se efectuaron muestreos de partículas PM_{2.5} y PM₁₀ en cuatro sitios de la calle subterránea complementado dicho muestreo con el reconocimiento de los materiales constructivos y su estado de conservación tomando muestras de las eflorescencias de sales presentes en los muros. Para complementar el estudio se determinaron los parámetros climáticos (temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) así como la concentración de algunos contaminantes como el monóxido de carbono. Con estos resultados se busca contribuir a la aportación de información actualizada que pueda derivar en acciones preventivas o correctivas para la salvaguarda de este monumento histórico y para la salud de quienes lo transitan.

Palabras Clave: Calle Miguel Hidalgo, contaminación atmosférica, variables medioambientales, deterioro, bio deterioro



Abstract

Miguel Hidalgo underground street is one of the accesses of historical importance to the city of Guanajuato. The street, built-in 1964 on the bed of the Guanajuato River, is within the polygonal of the declaration of World Heritage conferred by UNESCO in 1988. In the '80s of the last century, an investigation was carried out multidisciplinary that in addition to the structural analysis, included a study on the conditions of deterioration of the construction materials and with it to evaluate the impact caused by the increasing circulation of motor vehicles. Based on the above and considering the unusual increase in the vehicle fleet derived from the growth of the city and the floating population associated with tourism, this study shows the typology of contaminants present and their relationship with the deterioration of construction materials compared to were possible with previous studies carried out. For this, PM2.5 and PM10 particle sampling was carried out at four sites of the underground street, complementing said sampling with the recognition of the construction materials and their state of conservation, taking samples of the efflorescence of salts present in the walls, to complement the study. The climatic parameters (temperature, relative humidity, and wind speed) were determined, and the concentration of some pollutants such as carbon monoxide. With these results, we seek to contribute to the provision of updated information that may lead to preventive or corrective actions for safeguarding this historical monument and for the health of those who pass through it.

Keywords: Miguel Hidalgo underground street, atmospheric pollution, Environmental parameters, deterioration in building materials, biodeterioration.

INTRODUCCIÓN

La calle subterránea Miguel Hidalgo tiene sus orígenes en el siglo XVIII, esto debido a las constantes inundaciones que asechaban a la ciudad de Guanajuato por el asolvamiento del río Guanajuato que cruza lo que hoy es el centro histórico de la ciudad. Durante más de doscientos años este sitio confinado solo tuvo el tránsito del río, y fue hasta mediados del siglo XX cuando se le dio un nuevo uso, entubándose el río, restaurando y reforzando el amurallamiento realizado en el siglo XVIII dio origen a la calle subterránea Miguel Hidalgo considerada hace unos años como una de las 13

maravillas México. [De la selva Negrete et al, 2010; Audefroy. 2013; Carreón Nieto, 2007]

Justamente hace más de treinta años y teniendo veinte años de uso como la vialidad principal de la ciudad un grupo de investigadores del posgrado en Restauración de Sitios y Monumentos de la Universidad de Guanajuato, llevó a cabo un estudio integral sobre el estado de conservación de esta vía, en la cual se observó el deterioro de los materiales constructivos, atribuido principalmente a la contaminación atmosférica provocada por el aumento del parque vehicular local.[Álvarez Gasca et alt, 2000]



Además de lo anterior, a partir de estudios similares realizados en otros centros y sitios patrimoniales e históricos, se ha denotado cómo los agentes contaminantes atmosféricos provenientes del proceso de combustión de automotores provocan el deterioro de los materiales constructivos y a la vez afectan la salud de los usuarios, esto a través de la interacción con el material particulado PM2.5 y PM10, los cuales tienen como componentes a contaminantes tales como óxidos de nitrógeno y azufre, diversos aniones y cationes metálicos y no metálicos, los cuales al interactuar con los factores climáticos (humedad, temperatura, velocidad del viento, entre otros) de manera sinérgica incrementan o aceleran los procesos de deterioros de los materiales o modifican la atmósfera circundante generando las condiciones propicias además, para el crecimiento de la carga microbiana del sitio, siendo esto una foco rojo que puede generar afectaciones a los bienes inmuebles patrimoniales y a la salud de los usuarios. [Gaviria et al, 2011].

Con base a lo anterior, se llevó a cabo esta investigación que tiene como objetivo caracterizar los agentes de deterioro y su aporte en el proceso de afectación a los materiales constructivos de la calle subterránea Miguel Hidalgo de Guanajuato, así como un estudio preliminar sobre microorganismos que pululan en la calle y que pueden causar daño a la salud de los usuarios.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología para generar un perfil de los agentes de deterioro fue la siguiente:



Figura 1: Metodología de la investigación. Elaboración propia 2022.

Cabe hacer mención que para este proceso previamente se realizó un reconocimiento de la calle, por medio de una serie de recorridos con el objetivo de conocer el estado de conservación del sitio, reconocer los materiales de construcción, estimación del flujo vehicular, flujo de corriente natural del aire, humedad relativa y la zonificación de los puntos de muestreo.

Estas actividades se desarrollaron en el verano de 2019 y el verano de 2021, siendo interrumpida en 2020 por la contingencia sanitaria propiciada por el SARS-COV-2. Es importante resaltar que es necesario llevar a cabo estudios durante las diferentes épocas del año para tener un perfil ampliado y ver las variaciones de los parámetros citados en los cambios de estación, considerando así mismo el flujo de visitantes provocados por la actividad turística de la ciudad.

Para llevar a cabo el monitoreo de material particulado, de los parámetros ambientales y de la efluorescencia de sales que se mencionan en la Figura 1, se emplearon los siguientes dispositivos:

- Material particulado: equipo Microvol 1100 de bajo volumen (3 L/min), empleando filtros de microfibras de vidrio grado epm



2000 47mm y un diámetro de poro 2μ previamente estabilizados para poder realizar el estudio gravimétrico, haciendo un monitoreo de 10 horas por 10 días en los sitios seleccionados en la calle.

- Concentración de Material Particulado 10 y 2.5 (PM 10 y 2.5) y monóxido de carbono (CO): Se utilizó un sensor móvil de IR SOL507, un detector móvil de CO₂ marca ALTAIR y un sensor de calidad de aire infrarrojo para medir la concentración de volátiles orgánicos totales y aldehídos (TVOC y HCHO).
- Variables climáticas: Un termómetro-higrómetro digital marca radio shack, para la velocidad del viento un anemómetro-termómetro-higrómetro digital portátil marca BLUE-ABH4224.
- Morfología del material particulado: Se utilizó un microscopio electrónico de barrido Zeiss Sigma de emisión de campo y sonda EDX.
- Para composición de las sales: Un espectrofotómetro IR Perkin Elmer Spectrum 100.

Mediante el uso de la metodología referida en combinación con los diferentes instrumentos empleados permitió obtener un perfil de comportamiento en una temporalidad del año (el verano) en donde se tienen lluvias persistentes, así como la influencia por el tráfico vehicular local y el tráfico derivado de la actividad

económica más importante de la ciudad de Guanajuato, el turismo.

RESULTADOS Y DISCUSION

Para poder obtener el perfil de comportamiento de los agentes de deterioro fue necesario establecer los puntos de monitoreo y muestreo, los cuales se basaron en el trabajo de Alvarez Gasca y colaboradores quienes tomaron como punto de referencia que los agentes identificados son los contaminantes provenientes de los vehículos automotores y la humedad presente la cual puede ser natural o de origen antropogénico, es decir, la falta de mantenimiento y el adosamientos de descargas residuales de las fincas circundantes a la calle [Álvarez Gasca et al, 2000]. Se procedió a establecer puntos para medir las variables ambientales (velocidad del aire, temperatura y % de humedad relativa), recolección material particulado, concentración del material particulado y de algunos contaminantes como el CO, TVOC y HCHO, así como la recolección de eflorescencia de sales; además de tomar en cuenta lo citado por Alvarez Gasca y colaboradores, se consideró la topografía del sitio ya que la calle sigue el curso del cauce natural del río Guanajuato observándose zonas donde las variables como humedad y velocidad del viento muestran cambios significativos en sus valores. Debe mencionarse también, que los sitios seleccionados son puntos donde se ha observado que la población los utiliza ya sea para tomar el transporte público, o que son puntos de interés turístico y en años recientes, zona comercial temporal utilizada por la autoridad municipal para llevar a cabo



festivales de índole cultural y promoción turística con venta de comida y bebida. Los puntos seleccionados fueron los siguientes:

1. Mercado Hidalgo
2. Patrocinio
3. Los Ángeles
4. Corazón
5. Alonso
6. La Arcada bajo hotel San Diego
7. Baratillo

La figura 2 muestra la ubicación de las zonas de muestreo en la calle subterránea.

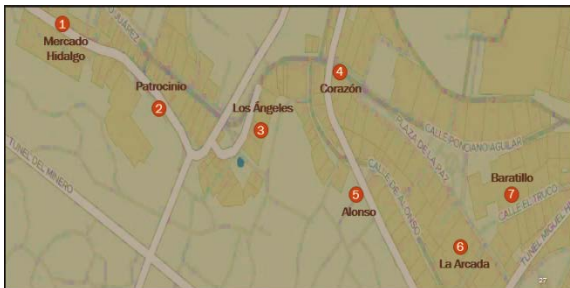


Figura 2: Zonas de monitoreo en la calle subterránea: Martínez Piñeiro 2022.

Como se ha comentado, los monitoreos se realizaron durante el verano específicamente entre los meses de junio a julio en los años 2019 y 2021 época que se caracteriza por ser la estación de lluvias en esta zona del bajío por lo que las variables climáticas juegan un papel fundamental en el comportamiento del material suspendido en la atmósfera y en los procesos asociados tales como la cristalización y recristalización de sales, así como en el aumento súbito de la humedad relativa y la variación de la temperatura entre otros. A la vez, es una de las temporadas con mayor afluencia turística, incrementándose el parque vehicular que transita por la calle que en

combinación con los factores antes citados aceleran los procesos de deterioro.

Debe hacerse énfasis que las variables climáticas como lo son la velocidad del viento, temperatura y humedad relativa juegan un papel muy importante en el transporte, resuspensión, incremento en la concentración y precipitación del material particulado y contaminante presente en la atmósfera circundante de la calle subterránea [J. Díaz Jiménez, Linares Gil, 2006, Bourzac, 2021]. Con respecto a la velocidad del viento circulante en la calle subterránea, se puede mencionar que durante las dos etapas de medición que comprendido el verano de 2019 y el verano de 2021 se observó lo siguiente:



Figura 3. Gráfica 1: Monitoreo de la velocidad del aire en la subterránea. Elaboración propia verano 2019.

La gráfica 1 (Figura 3) es el resultado de un recorrido realizado a lo largo de los 4.2 km que tiene la calle haciendo pausas de 10 minutos en los puntos de monitoreo. Se observan picos altos que oscilan entre 1.2 a 1.5 m/s atribuido al aporte dado por el tráfico vehicular y un valor promedio de 0.6 m/s, que se asocia al flujo natural del aire que circula en la calle subterránea por la corriente que entra en los accesos y



zonas semiabiertas. Este mismo parámetro se determinó en el verano de 2021.



Figura 4. Gráfica 2: Monitoreo de la velocidad del aire en el Mercado Hidalgo. Elaborado por T.V. Salazar Barrientos 2021.

Es interesante ver que de acuerdo con la gráfica 2 (Figura 4) el comportamiento de la velocidad del viento es similar al observado en el verano de 2019: los incrementos superiores a 0.6 m/s se deben al paso de vehículos, mientras los observados entre 0.4 a 0.6 m/s es el flujo natural del aire que circula en la subterránea mismo que se mantiene cuando no hay tránsito de vehículos y cuando entra el flujo de aire al túnel. Lo anterior se ilustra en la siguiente gráfica (Figura 5).

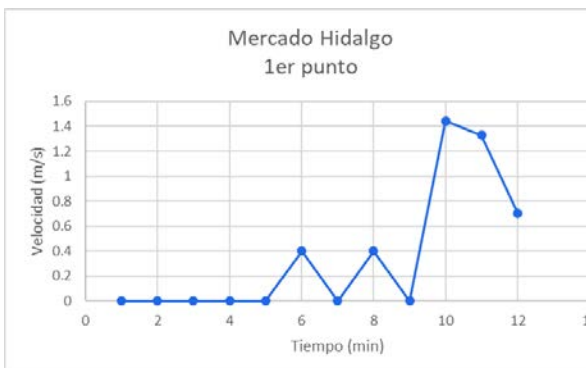


Figura 5: Gráfica 3: Monitoreo de la velocidad del aire en el mercado Hidalgo.

Elaborado por T.V. Salazar Barrientos 2021.

Los valores superiores comprendidos entre 0.4 a 0.6 m/s corresponden al aporte del tráfico vehicular el cual resuspende el material particulado y propicia que estos se muevan a través del trayecto de la calle subterránea.

Se puede concluir que el perfil de velocidad del aire en la calle de manera natural sin la influencia del tránsito vehicular oscila entre 0.4 a 0.6 m/s y con la influencia del tránsito los valores se incrementan hasta 1.6 m/s originando el transporte y resuspensión del material particulado presentes en la atmósfera de la calle subterránea.

Otros factores que se consideraron en este estudio fue obtener el comportamiento de la temperatura y de la humedad relativa. Estos dos parámetros influyen en los procesos de suspensión, hidratación y sedimentación del material particulado presente en el aire, además de acelerar los procesos de deterioro en los materiales constructivos al interactuar con los agentes contaminantes y el material particulado depositado, así como propiciar el crecimiento de agentes microbianos que se suman a los procesos de deterioro y se convierten en un foco latente de infección y afectación a la salud humana.

La Figura 6 muestra el comportamiento de la temperatura y de la humedad relativa en toda la calle subterránea (año 2019), denotándose que la temperatura se mantiene estable alrededor de 25 a 27°C, mismo comportamiento observado en 2021. Cabe hacer mención que en esta



época la temperatura en la ciudad suele oscilar entre los 30 a 32°C. A pesar de estas altas temperaturas el flujo de aire que llega a circular en la calle hace propicio que la temperatura se mantenga por debajo a la existente en el exterior a ella.

Con respecto a la humedad relativa (HR), se observó que en zonas cerradas o con cambios en el trazo de la calle (curvaturas) la humedad alcanza valores cercanos al 60% HR. Tales zonas son el Patrocinio, el Corazón la Arcada bajo el hotel San Diego y el Baratillo. Este comportamiento es atribuido a que en estas zonas el flujo del aire tiene un valor cercano a 0 m/s, por lo cual al no haber flujo de aire la humedad se incrementa, presentándose la formación de núcleos salinos, la proliferación de microorganismos y un aumento considerable en la concentración de material particulado y elementos contaminantes (Figura 6).

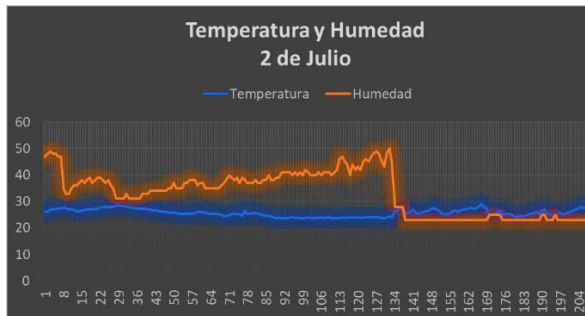


Figura 6: Gráfica 4. Comportamiento de la temperatura y de la humedad relativa a lo largo de la calle subterránea. Elaborado por López Alarcón. 2019.



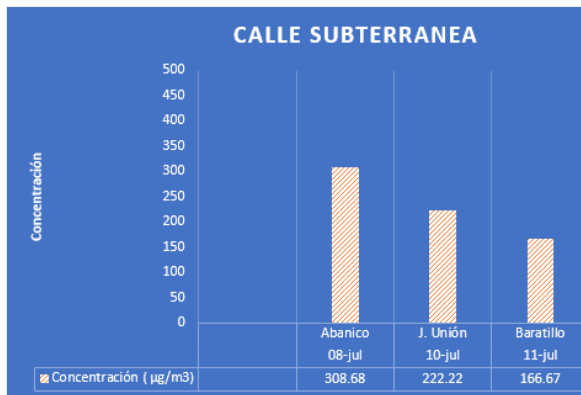
Figura 7. Muro con salitre, zona Alonso. Tomada en 2021.

En zonas donde el flujo de aire es constante y se le adiciona el que aporta el flujo vehicular, la humedad relativa presenta valores de 30% y en el tramo abierto que va desde el Hinojo en dirección a la plaza Allende el valor oscila en 20%. Como se mencionó las zonas que presentan una alta humedad relativa la concentración de material particulado y algunos contaminantes atmosféricos como el monóxido de carbono (CO), orgánicos volátiles (TVOC) y aldehídos (HCHO) se incrementa de manera significativa, siendo zonas en donde se observa un mayor deterioro en los sistemas constructivos, la eflorescencia, cristalización y recristalización de sales (ver figura 7), así como la presencia de patinas biológicas, el acumulación de hollín y daños por humedades a muros y otras estructuras que son notorias y son producto de la interacción que tienen estos elementos con el material constructivo de la calle. La gráfica 5 muestra los resultados de los análisis gravimétricos realizado a los filtros de fibra de vidrio conteniendo el material particulado colectado en la



estación móvil colocada en los puntos de monitoreo seleccionados de la calle subterránea:

ANÁLISIS GRAVIMÉTRICO CALLE SUBTERRÁNEA



Gráfica 5: Análisis Gravimétrico de los filtros ubicados en las zonas con mayor concentración de material particulado PM 10. Alatorre 2020.

Se observa que la zona más contaminada a pesar de que existe un flujo de aire constante es la zona del Mercado Hidalgo. Esto se atribuye a que en esta zona hay dos paradas para tomar el transporte público y es lugar de carga y descarga que surte de mercancía al mercado y acceso al primer estacionamiento de la zona centro. La segunda zona con mayor concentración de material particulado es el abanico (Corazón). Esta zona se caracteriza por no presentar un flujo de aire debido a la curvatura que presenta la traza de la calle la cual presenta así mismo un peralte pronunciado donde el flujo que pueda ingresar se corta al chocar con la curvatura. En la zona bajo el hotel San Diego y en el Baratillo los valores son altos pues aquí no hay flujo de aire y es una zona muy húmeda con valores de 60%HR

propiciando que el material particulado se humecte y se adose a la superficie de los muros.

Es fundamental hacer hincapié en la norma NOM-025-SSA1-2021 misma que establece los criterios de la calidad del aire con respecto al material particulado PM10 y 2.5 el cuál, tiene efectos en la salud por ser elementos que propician la contaminación atmosférica. La norma establece que los valores de concentración promedio de 24 horas (exposición aguda) es de 75 y 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM10 y PM2.5, respectivamente. Puede observarse en la gráfica 5, los valores de material particulado PM10 reportados en la gravimetría sobrepasa a lo que la norma dictamina siendo una concentración importante de elementos contaminantes suspendidos en la atmósfera circundante de la subterránea. Lo anterior se puede contrastar con los resultados arrojado por el monitoreo móvil con respecto a la concentración de PM 10 y PM2.5.

Las gráficas 6 y 7 muestra los resultados del monitoreo de partículas PM10 y PM 2.5 realizado en 2019 y 2021, en la cual se puede observar que en un tiempo de monitoreo de 2 h los valores de concentración superan a lo indicado por la norma incluso muy cercano a los valores que la OMS establece para estos dos parámetros siendo estos PM10: 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y PM2.5: 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, lo cual llama la atención ya que la literatura reporta una relación causal entre la exposición a PM2.5 en el aire del ambiente con el incremento en la prevalencia de cardiopatías isquémicas, enfermedades cerebrovasculares y aumento en infecciones de las vías respiratorias



inferiores y enfermedades pulmonares obstructivas crónicas [NOM-025-SSA 2021; Gutiérrez et al., 2018].

En los estudios con población infantil, se han evidenciado efectos como el incremento en la prevalencia de asma, bajo peso al nacer, parto prematuro y trastornos neurológicos o cognitivos [NOM-025-SSA 2021]. Esto es un punto importante ya que las zonas reportadas como el mercado y bajo el hotel San Diego o Jardín Unión están ubicadas dos estaciones del transporte público, observándose que el tiempo promedio que una persona puede esperar su transporte es de 5 a 15 minutos lo cual es un tiempo suficiente para estar expuestos a estos agentes contaminantes que a la larga pueda ocasionar daños a la salud.

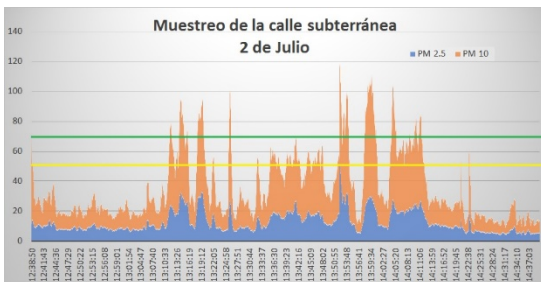


Figura 7. Gráfica 6: Concentración PM 10 y PM 2.5, verano 2019. Cuevas Acevedo C.A., López Alarcón L.D.A., Et al.

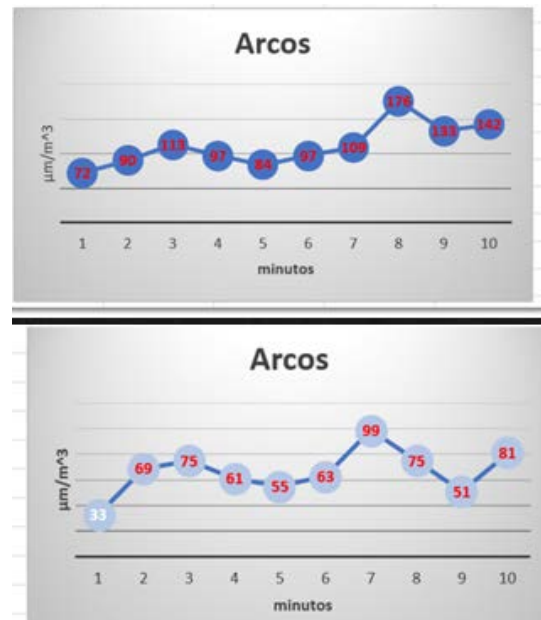


Figura 8. Gráfica 7. Concentración PM10 y PM 2.5, verano 2021. López Alarcón y Palafox Rivas.

Como complemento a este estudio se analizó el material particulado recolectado en las zonas de estudio, empleando microscopia electrónica de barrido siendo analizada la morfología de las partículas presentes en los filtros, así como su composición por medio de microanálisis por dispersión de energías de rayos-x (XEDS) y con ello postular su posible origen. Autores como Burgos, Campos entre otros [Burgos, 2017; Singh et al., 2011; Campos et al., 2007; Ramos, 2006, Salvador 2005, Galán y Martín, 2004], han realizado investigaciones sobre las partículas que se encuentran suspendidas en la atmósfera. Estos autores refieren dos clasificaciones en función de la naturaleza de la partícula: naturales y antropogénicas. Las primeras son el producto de emisiones naturales y que, por acción de las condiciones ambientales, viento principalmente, quedan



suspendidas. Las partículas antropogénicas son el resultado de las actividades humanas propiciadas por fuentes estacionarias y móviles que en combinación con factores ambientales quedan suspendidas. Burgos, [Burgos, 2017] hace mención que las morfologías características que se relacionan con el material particulado suspendido en la atmósfera son: cenósferas, esferas lisas, esféricas rugosas, irregulares, amorfas, cristalinas y biológicas, las cuales se muestran en la Figura 9:

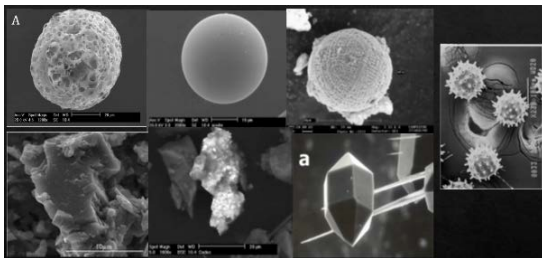


Figura 9: Morfologías características del material particulado, tomado de: Burgos García A. (2017).

Las partículas de especial interés son las cenósferas cuyo origen es el proceso de combustión, y se caracterizan por presentar un alto contenido de azufre, hierro y plomo. Las rugosas tienen su origen en el proceso de fundición de metales, mientras que las amorfas e irregulares su origen se relaciona con material re suspendido cuya composición es metálica y finalmente las cristalinas cuyo origen se asocia con la formación de sales, como cloruros o sulfatos. En el monitoreo realizado en la calle subterránea, las partículas que se detectaron en su mayoría son amorfas y cristalinas. El resultado del análisis por XEDS indica que en su composición hay hierro, azufre, sodio, potasio, bario y

partículas metálicas como plomo, atribuyendo su origen a las emisiones de los vehículos que transitan, por el desgaste de los motores de combustión interna, así como a las sales que cristalizan y recrystalizan por la humedad presente. La Figura 10 ilustra un ejemplo de la zona del Patrocinio y la gráfica 7, la composición por XEDS de las partículas mostradas.

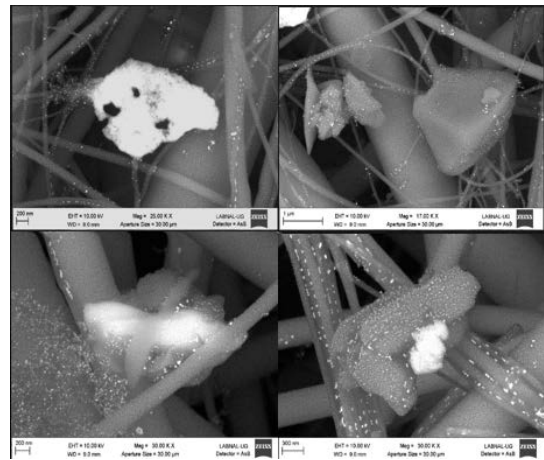
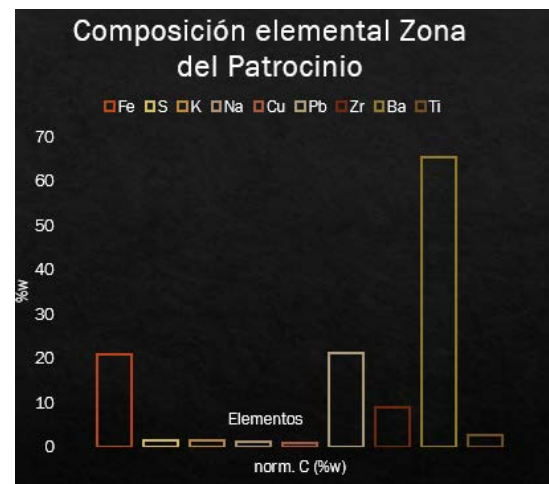


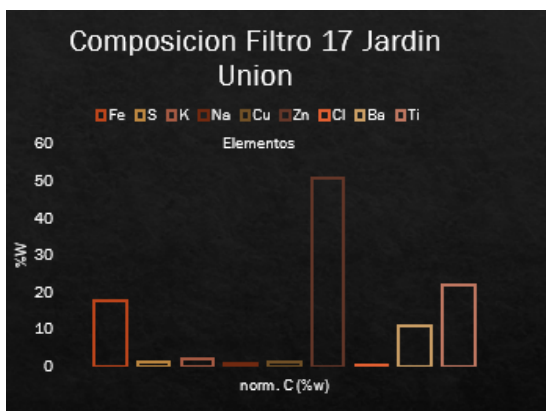
Figura 10, Morfología del material particulado presente en la calle subterránea. Lozano Sotomayor 2019.



Gráfica 8. Composición elemental por XEDS, zona del Patrocinio. Lozano Sotomayor 2019.



Los resultados de los análisis permitieron observar que el material particulado es transportado a través de la calle subterránea ya sea por el flujo natural o por el flujo originado por el tránsito vehicular., Un ejemplo muy interesante los es el del transporte de bario (Ba), elemento que fue detectado desde la zona del Mercado Hidalgo hasta la zona bajo el hotel San Diego y del Jardín Unión (ver gráfica 8), este elemento es atribuido a un proceso de intervención que se realizó en 1998, con el objetivo de consolidar elementos estructurales a partir de un mortero modificado empleando bario en la formulación, el cual con el paso de los años y a falta de mantenimiento se ha incorporado al material pululante del sitio [Greenwell, 2021; Díaz Jiménez y Linares Gil, 2006]. El resultado es relevante ya que puede dar la pauta para que se generen mapas de transporte de ciertos elementos y su extensión en la calle, así como su comportamiento en función de la temporada del año.



Gráfica 8. Composición elemental por XEDS, zona bajo el hotel San Diego y Jardín Unión. Lozano Sotomayor 2019.

Durante el verano del 2021, se realizó un muestreo de material en aquellas zonas

donde los valores de humedad relativa y la aeración era nula o muy baja, fenómeno observado tanto en el año 2019 como en 2021 y en las que así mismo, se detectó la presencia de eflorescencias de sales en los muros y que sugirió que su presencia estaría relacionada con los resultados derivados del estudio de microscopia electrónica de barrido y el micro análisis elemental por XEDS y que como se ha indicado, se observan partículas cristalinas de morfología definida y cuya composición es Na y K (sodio y potasio).

Las muestras tomadas y analizadas por espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR), presentan bandas de vibración que corresponden a la presencia de sulfatos, nitratos y carbonatos.

El origen de las sales, y que se ha sido reportado en la literatura [Bravo, et al, 2003] se asocia con la interacción que tiene el material constructivo con los contaminantes atmosféricos, los cuales, a las condiciones de humedad y temperatura de la calle, tienden a depositarse en la superficie originando superficies reactivas haciendo factible el aceleramiento en los procesos de deterioro. La Figura 11, muestra un espectro de FTIR donde se observan bandas de vibración características del ion sulfato, alrededor de 1097 cm^{-1} [Bolaños et al, 2017; Neville, 2004; Rubinson, 2001]. La presencia de estas sales indica que se están deteriorando estructuralmente las matrices de los materiales constructivos de la calle, recordando que estos son muy variados tales como piedra caliza, trozos de cantera (ignimbritas riolíticas), de ladrillo rojo y que principalmente la piedra caliza cuya



naturaleza es calcárea, por efecto de la lluvia ácida, generada por los óxidos de azufre emitidos en las emisiones del parque vehicular, se degrada a sulfato de calcio (yeso). De igual manera, los morteros y aplanados, base cal y arena, se encuentran sufriendo un proceso similar de deterioro. Al ocurrir la transformación química de material calcáreo a yeso, se afecta las propiedades mecánicas del material constructivo por la fragilidad estructural del yeso. La presencia de humedad o agua en el sitio propicia que los materiales pierdan estabilidad, caigan o se pulvericen, incorporándose a la gran cantidad de material particulado nocivo que se suspende y re suspende en la atmósfera de la calle con el flujo de aire natural o el inducido por el tráfico vehicular.

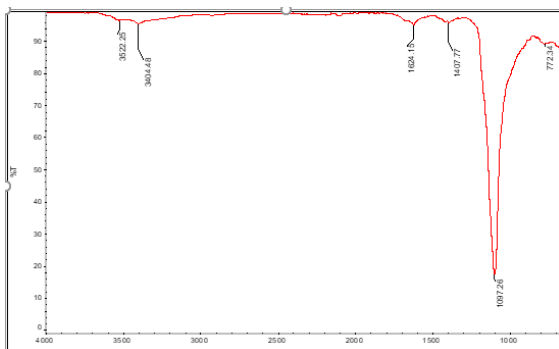


Figura 11. Espectro de FTIR, muestra la presencia de sulfatos. Salazar Barrientos, Morales Sánchez ,2021.

Es de gran importancia enfatizar que los valores que se reportan de humedad relativa, temperatura, aireación y los escurrimientos naturales y de desagües y la composición de la atmósfera de la calle subterránea, hacen que sea lugar propicio para la incubación y crecimiento de microorganismos que tienen actividad

biológica tanto con los materiales constructivos, así como con los usuarios que transitan por la calle. Tanto en el 2019 como en el 2021 se pudieron obtener muestras tanto de la atmósfera circundante, de desagües y de las superficies de los muros, siendo detectados microorganismos patógenos, siendo estos resultados de muy especial interés ya que la interacción que tienen éstos con los usuarios de la calle y sabiendo que en años recientes se ha generado un especial interés de la autoridad municipal hacia la apropiación con fines turísticos y comerciales de zonas de la calle en distintas épocas del año (la llamada Feria de la Muerte, por ejemplo), a la larga esta interacción hasta cierto punto crónica puede generar un problema latente de salud pública.

La Figura 12 muestra tres ejemplos de microorganismos que están presentes en la atmósfera de la calle subterránea, las cuales fueron tomadas en tres puntos donde están ubicados los dos paraderos del transporte público bajo el Mercado Hidalgo y en el de la zona de los Ángeles.



Figura 12. Micrografías a 100x de microorganismos presente en la calle subterránea. Martínez Piñeiro, 2021.

La primera micrografía de la muestra tomada en los Ángeles muestra la presencia de *vibrios*, microorganismos que provocan enfermedades en el tracto



digestivo. La segunda micrografía corresponde a un *staphylococcus* causante de infecciones de la piel y a veces neumonía, endocarditis y osteomielitis y la última corresponde a un protozooario (parásito) el cuál de igual manera se asocia con infecciones de la piel y a veces neumonía, endocarditis y osteomielitis. Este estudio, que es de vital importancia para la salud pública, continúa realizándose y se espera reportar nuevos avances próximamente.

CONCLUSIONES

Los resultados mostrados en este artículo, son el resultado de tres años de trabajo y a partir de los cuales, se ha podido conocer el comportamiento de los agentes de deterioro durante una temporada del año (verano), resultados que permiten ver el estado de deterioro actual de los materiales constructivos de la calle, propiciado por los agentes contaminantes, tales como el material particulado presente en la atmósfera del sitio así como de distintos microorganismos y la dependencia y correlación que éstos tienen con las variables ambientales (humedad relativa, temperatura y flujo de aire) así como el alto flujo vehicular en la calle subterránea Miguel Hidalgo.

Se observa que el daño no solo es a los materiales constructivos que constituyen a este emblemático sitio de invaluable Valor Patrimonial, sino que también se observan daños colaterales devenidos por dichos agentes, siendo latente el problema de salud pública que acarrea la interacción de estos con los usuarios que viven en la ciudad y los que la visitan.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido auspiciada en su momento por el proyecto Red PROFIDE-SEP: *Red de Estudios Interdisciplinarios Sobre Medio Ambiente y Conservación del Patrimonio Mexicano* y por el Programa de Veranos de Investigación de la Universidad de Guanajuato, así como el apoyo de la red interna de colaboración entre varios laboratorios de departamentos de distintas divisiones del campus Guanajuato de la Universidad de Guanajuato: Departamentos de Química: Laboratorio de Química y Tecnología del Silicio, Laboratorio de Gravimetría, el Laboratorio Nacional de Caracterización de Propiedades Físicoquímicas y Estructura Molecular UG-UAA-Conacyt, el Laboratorio de Análisis Instrumental Mtro. Fernando de J. Amézquita, el Departamento de Astronomía: *Centro de Estudios de la Atmósfera* de la División de Ciencias Naturales y Exactas. El Departamento de Ingeniería Civil y de Ingeniería Ambiental de la División de Ingenierías. De igual manera, el Laboratorio de Biología de la Escuela de Nivel Medio Superior de Guanajuato y el apoyo incondicional de los alumnos de Estancia de Verano de Investigación Científica de la UG y de servicio social y servicio social profesional que han participado muy activamente.

Es muy importante resaltar, que las actividades que se han realizado en la calle subterránea y que han generado los resultados aquí reportados y efectuadas en los periodos de tiempo señalados (verano del año 2019 y verano del año 2021) han sido del conocimiento y que aquí se reportan, han sido del conocimiento y



contado con la aprobación del Centro INAH-Guanajuato, así como de la Autoridad Municipal correspondiente, a quienes se agradece su apoyo en virtud de lo que estas investigaciones representan para la ciudad de Guanajuato, Patrimonio Cultural de la Humanidad.

REFERENCIAS

- Aguirre I., Sánchez L., Eugenia M. y Menéndez M. (2006). Estudio de los niveles de PM10 y PM2.5 en un área urbana con influencia industrial siderometalúrgica (basauri, vizcaya). Servicio de Geocronología y Geoquímica Isotópica. Facultad de Ciencia y Tecnología. Universidad del País Vasco (UPV/EHU).
- Álvarez Gasca, Dolores Elena, Cervantes McSwinney, María Eugenia, and Juárez Sandoval, Eloy (2000). Calle Subterránea De Guanajuato: Su Estudio Y Conservación. (Tesis de Maestría), Universidad de Guanajuato
- Audefroy. J.F. (2013). Inundaciones de Guanajuato: Una lectura histórico-urbana. En memorias. Taller de manejo de riesgo de inundación. UNAM.
- Bravo H., R. Soto, R. Sosa, and P. Sánchez A., 2003. Efecto de la lluvia ácida en el material constructivo de los monumentos mayas mexicanos. Ingeniería, Investigación y Tecnología 4, 195-205.
- Bolaños J.D, Cordero G, Segura G. (2017). Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela. 12 de abril 2022, de Revista Tecnológica en Marcha. Sitio web: <http://dx.doi.org/10.18845/tm.v30i4.3408>
- Bourzac, K (2021). Air quality monitoring goes local. C&EN NEWS, 22-28.
- Burgos Garcia A. (2017). Caracterización química y morfológica a través de Microscopía Electrónica de partículas totales suspendidas (PTS) captadas en dos zonas del eje Charallave-Ocumare, Edo. Miranda. Tesis de grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas Venezuela.
- Campos A., Alcaraz G., Herrera E., Sosa M., Jiménez J., Delgado M., Ramírez E., y Puga S. (2007). Análisis temporal de las concentraciones, distribución de tamaño y morfología de partículas suspendidas menores a 10 micras en la ciudad de Chihuahua, México. Revista Latinoamericana de Recursos Naturales. 3(1). 44-51.
- Carreón Nieto. M del C., (2007). Desastre en Guanajuato: la inundación del 5 de julio de 1760. Tzintzun. Revista de Estudios Históricos, núm. 45, enero-junio, pp. 11-32. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo Morelia, México.
- De la selva Negrete M. B. et al. (2010). Santa Fe y Real de Minas Guanajuato. Colección de monografías municipales de Guanajuato. Gobierno del Estado de Guanajuato.
- Díaz Jiménez J., Linares Gil C. (2006). Influencia de los factores meteorológicos y geográficos en la difusión y transporte de



sustancias contaminantes. *Revista Salud Ambiental*, 6(1-2):20-24.

Galán, M., y Martín R. (2004). Characterization of atmospheric particles: analysis of particles in the Campo de Gibraltar. *Atmósfera*. 191-206.

Gaviria C.F. et al. (2011). Contaminación por material particulado (pm_{2,5} y pm₁₀) y consultas por enfermedades respiratorias en Medellín (2008-2009). *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, vol. 29, núm. 3, septiembre-diciembre, 2011, pp. 241-250. Universidad de Antioquia.

Greenwell, E. (2021). Proyecto Ejecutivo Calle Subterránea. Recuperado 21 de mayo de 2022, [arqgreenwellrestauraciones.com: https://arqgreenwellrestauraciones.com/proyectosubterranea1a.html](https://arqgreenwellrestauraciones.com/proyectosubterranea1a.html)

Gutiérrez-Ávila, I., Rojas-Bracho, L., Riojas-Rodríguez, H., Kloog, I., Just, A. C., & Rothenberg, S. J. (2018). Cardiovascular and Cerebrovascular Mortality Associated with Acute Exposure to PM_{2.5} in Mexico City. *Stroke*, 49(7), 1734–1736.
<https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.118.021034>

Hernández A. (2018). Impacto de la Contaminación atmosférica en las edificaciones patrimoniales de La Habana, Cuba. Efectos para una Futuro Climático. *Revista Ingeniería de Construcción*, Vol. 33 numero 3.

Kenneth A. Rubinson, Judith F. Rubinson. (2001). *Análisis instrumental*. Edit. Prentice Hall.

Neville, A. (2004). The confused world of sulfate attack on concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(8), 1275-1296.

Norma oficial NOM-025-SSA1-2021. "Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas menores de 10 micras (pm₁₀). Valor permisible para la concentración de partículas menores de 10 micras (pm₁₀) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población".

Ramos, J. (2006). Caracterización morfológica y química de partículas atmosféricas (PM₁₀), en el Silencio; Caracas, Venezuela. (Tesis de pregrado). Universidad Central de Venezuela. Caracas.

Salvador, P. (2005). Caracterización de la contaminación atmosférica producidas por partículas en suspensión en Madrid. (Tesis Doctoral). Universidad Complutense de Madrid. España.

Singh A., Kulshrestha A. Taneja A. (2011). Characterization and morphological analysis of airborne PM_{2.5} and PM₁₀ in Agra located in north-central India. *Atmospheric Environment*. 45. 3621-3630