



Artículo de investigación

Prototipo para visualización de flujo con aplicación en medios urbanos expuestos a contaminantes



Prototype for flow visualization with application in urban environments exposed to pollutants

Oscar Adrián Morales Contreras¹ , Alejandro Alonzo García² , Juan Antonio Paz González¹ , Raúl Vázquez Prieto¹ , José Emilio López Escobar² 

¹Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California, Unidad Valle de las Palmas, Tijuana, Baja California, México

²CONAHCYT, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Nuevo León, Av. Eloy Cavazos No. 2001, Colonia Tolteca, C.P. 67160, Guadalupe, Nuevo León, México

Autor de correspondencia: Oscar Adrián Morales Contreras: Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California, Unidad Valle de las Palmas, Tijuana, Baja California, México. Correo electrónico: moraleso97@uabc.edu.mx. ORCID: 0000-0003-0118-8132.

Recibido: 13 de Febrero del 2024

Aceptado: 15 de Mayo del 2024

Publicado: 28 de Mayo del 2024

Resumen.- Esta investigación presenta información cualitativa relacionada con la contaminación en el medio ambiente en zonas urbanas a escala, para esto se diseña, construye y caracteriza un prototipo denominado tobera convergente en el cual se implementa la técnica de visualización de flujo con sólidos. La caracterización de la zona de pruebas se realiza experimental (utilizando tubo de Prandtl) y numéricamente (utilizando el software comercial Solidworks®); se tiene flujo turbulento con recirculación en la entrada de la zona de pruebas (la velocidad promedio es de 4.18m/s y turbulencia del 7%). Con esta técnica de visualización se analizará el flujo turbulento de diferentes materiales simulando el comportamiento de contaminantes que circulan a través de un prototipo de medio urbano a escala. De los diferentes materiales probados se encontró que el bicarbonato de sodio presenta las mejores características para mostrar el comportamiento del flujo alrededor del modelo, mostrando claramente la formación de nichos que simulan el acumulamiento de contaminantes o la aparición de islas de calor.

Palabras clave: Visualización de flujo; Dinámica de fluidos computacional; Tobera convergente; Contaminantes medio urbano.

Abstract. – This investigation presents qualitative information related to pollution in the environment in urban areas at scale, for this a prototype called convergent nozzle is designed, built and characterized in which the flow visualization technique with solids is implemented. The characterization of the test area is carried out experimentally (using Prandtl tube) and numerically (using the commercial software Solidworks®); There is turbulent flow with recirculation at the entrance to the test area (the average speed is 4.18m/s and turbulence is 7%). With this visualization technique, the turbulent flow of different materials will be analyzed, simulating the behavior of pollutants that circulate through a prototype of a scale urban environment. Of the different materials tested, it was found that sodium bicarbonate presents the best characteristics to show the behavior of the flow around the model, clearly showing the formation of niches that simulate the accumulation of contaminants or the appearance of heat islands.

Keywords: Flow visualization; Computational fluid dynamics; Converging nozzle; Urban environment pollutants.



1. Introducción

El crecimiento económico y la globalización han originado evidentes beneficios, pero al mismo tiempo han provocado la aparición de nuevos riesgos. Existen dificultades e incertidumbres para identificar con exactitud la relación causal entre medio ambiente y salud. La medición de la exposición a numerosos factores ambientales es compleja porque no se dispone de sistemas adecuados de información y vigilancia sanitaria que permitan valorar la magnitud y gravedad de los riesgos. La información disponible sobre las enfermedades relacionadas con el medio ambiente procede de la experimentación en animales, estudios de laboratorio, epidemiológicos y toxicológicos. Los resultados de estos trabajos de investigación permiten extrapolar y estimar posibles riesgos para la salud pública. Se sabe, además, que algunas sustancias ambientales por debajo de ciertos niveles no son peligrosas. Sin embargo, otros agentes, tales como alérgenos, radiaciones ionizantes, contaminantes del aire, preparados químicos carcinógenos, pueden suponer un riesgo a niveles más bajos de los observados [1].

Se ha estimado que en los países industrializados un 20 % de la incidencia total de enfermedades puede atribuirse a factores medioambientales [2]. La contaminación ambiental ha derivado en enfermedades en la piel, cardiovasculares, respiratorias, que al principio se presentan como mínimas hasta que se llevan a niveles como cáncer, alteraciones en los huesos, entre otras [3].

En Europa una gran proporción de muertes y años de vida ajustados por discapacidad (DALYs) en el grupo en edad infantil es atribuible a la contaminación del aire interior y exterior. Un dato significativo de este trabajo es que 1/3 de las muertes en el grupo de edad de 0-19 años es atribuible a exposiciones ambientales [4].

Acerca de la carga de la enfermedad asociada a la contaminación del aire, la Organización Mundial de la Salud, manifiesta que, en todo el mundo, 4.2 millones de muertes prematuras fueron atribuibles a la contaminación del aire ambiental exterior en el 2016. Alrededor del 88% de estas muertes ocurren en países de ingresos bajos y medios. Asimismo, indica que más de una cuarta parte de las defunciones de niños menores de cinco años son consecuencia de la contaminación ambiental [5]. La Organización Panamericana de la Salud por su parte, indica que cada año las condiciones insalubres del entorno, tales como la contaminación del aire en espacios cerrados y en el exterior, la exposición al humo de tabaco ajeno, la insalubridad del agua, la falta de saneamiento y la higiene inadecuada, causan la muerte de 1.7 millones de niños menores de cinco años [6].

Por otro lado, la actividad antropogénica produce cambios sin precedentes al medioambiente global. La acumulación de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO₂) y el metano, entre otros, tienen implicaciones en el clima del planeta. El mundo se ha calentado en aproximadamente 0.6°C desde 1994. El tiempo que el CO₂ reside en la atmósfera excede los 100 años, por lo cual, lo que hoy se haga en la tierra tendrá repercusiones en las futuras generaciones [7]. Aunque se presume que el cambio climático puede afectar la salud, la evidencia aún es pequeña. Las investigaciones a la fecha se han enfocado a estrés térmico, eventos de climas extremos, y enfermedades infecciosas, con alguna atención de estimados futuros sobre producción de alimentos en la región y prevalencia de hambre [8]. Finalmente es importante notar que la mayoría de los efectos dañinos crónicos de la contaminación del aire ambiental se miden, en la actualidad, a través del material particulado menor a 2.5 micrones (PM 2.5), que penetran los espacios profundos del pulmón [9].



Debido a las grandes problemáticas expuestas, la OMS promueve intervenciones e iniciativas para que las políticas sectoriales (por ejemplo, de la energía, el transporte, la vivienda, la planificación urbana y la electrificación de los centros de salud) mejoren la salud, aborden los principales riesgos para la salud derivados de la contaminación del aire interior y exterior y permitan aprovechar los beneficios para la salud de las políticas de mitigación del cambio climático. La OMS también ha elaborado y puesto en marcha una estrategia para concientizar sobre el riesgo de la contaminación del aire y las soluciones disponibles para mitigar los riesgos de la exposición a ella [5]. En México el marco normativo vigente en materia de contaminantes se prevé en la Ley General de Salud la cual establece en su título séptimo, “Promoción de la Salud” Capítulo IV, “Efectos del Ambiente en la Salud” (Artículos 116 y SS) que, en materia de efectos del ambiente en la salud de la población, corresponde a las autoridades de salubridad establecer normas, tomar medidas y realizar actividades tendientes a proteger la salud humana ante los riesgos y daños que pudieran ocasionar las condiciones del ambiente, así como determinar los valores de concentración máxima permisibles para el ser humano de los contaminantes atmosféricos. Con base en lo anterior, la Secretaría de Salud ha emitido más de 42 Normas Oficiales Mexicanas que regulan la emisión y control de contaminantes [10].

La aplicación de normas y regulaciones se basan y requieren de investigación del comportamiento de las partículas en el medio ambiente, varios estudios se han realizado desde diversas perspectivas, medios urbanos, impacto ambiental, modelos de transporte de contaminantes, etc. A continuación, se mencionan algunas investigaciones sobre el comportamiento de aire en medios urbanos y las técnicas de estudio.

En 2016 en la ciudad Río de Janeiro, Drach y Corbella utilizaron la técnica de arrastre de arena en modelos a escala de manzanas específicas de los barrios de Copacabana e Ipanema en el túnel de viento de la Universidad Federal de Río de Janeiro [11]. Utilizaron un túnel de viento diseñado por el laboratorio de Aerodinámica de las Construcciones y fue montado en una sala de 8.80 m x 7.60 m, es capaz de desarrollar velocidades superiores a 10 m/s, las cuales son apropiadas para la realización de ensayos de erosión eólica. La zona de pruebas del túnel cuenta con una mesa de ensayos, que posee un mecanismo giratorio que permite que los modelos reducidos sean colocados de forma adecuada con relación a la dirección del viento que se desea evaluar. La maqueta se instaló en la mesa de ensayos urbanos y las estructuras más altas tienen alrededor de 0.150 m y las más bajas 0.03 m. Para que las maquetas permitieran la visualización clara de los efectos de los vientos, utilizaron color oscuro en la base de la maqueta, arena clara y materiales resistentes a los efectos del viento. La técnica de visualización utilizada conocida como erosión eólica o de “arrastre de arena” consiste en aplicar arena seleccionada sobre todas las superficies expuestas de la maqueta, así mismo ayuda a entender los caminos que el viento realiza en el medio urbano, como también sus posibles entradas y barreras. A través de esta técnica es posible observar, en el nivel del peatón, zonas ventiladas o estancadas, en función de los vientos dominantes. El estudio de las zonas donde la arena se acumula, combinado con el estudio de la insolación, permite identificar posibles islas de calor, así como zonas con concentración de polución.

En el caso de Copacabana, donde una barrera de edificios con prácticamente la misma altura bloquea significativamente la entrada del viento, existe una reducción de la ventilación en las zonas más internas del barrio como se observa en la Figura 1. En el caso de que estas áreas



escasamente ventiladas estén expuestas a la insolación, pueden presentar un aumento en la temperatura, lo que dificultará también la

dispersión de los gases producidos por ómnibus y automóviles.

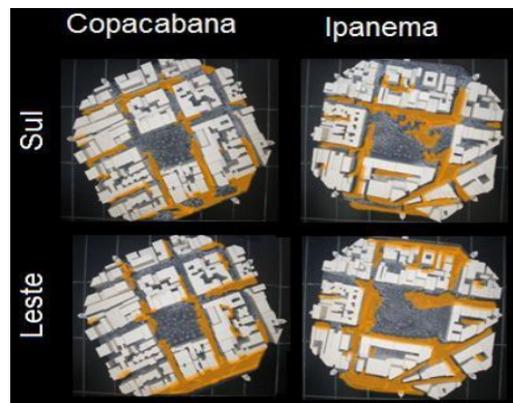


Figura 1.- Trayectorias de flujo de viento sobre las maquetas [11].

En este artículo, los investigadores concluyen cualitativamente a partir de los experimentos realizados la identificación de eventuales puntos críticos lo permitirá ensayar intervenciones que ayuden a adecuar la necesidad de confort y de espacio urbano. Las posibles interferencias que pueden ser sugeridas para las áreas estancadas varían de acuerdo con la región climática donde están localizadas. Por ejemplo, en regiones de clima cálido húmedo, se sabe que se debe inducir una mayor ventilación. Así, las alteraciones de la forma y de las posiciones de obstáculos, que permitan el re-direccionamiento del viento, pueden ser estudiadas para inducir un incremento de ventilación, contando también con las sombras para amenizar el problema y evitar la formación de islas de calor.

De esta investigación puede destacarse la visualización de flujo como una herramienta en la mecánica de fluidos experimental que hace ciertas propiedades de un campo de flujo directamente accesible a la percepción visual. Se sabe que la observación de un patrón de flujo facilita el desarrollo de una comprensión y el análisis posterior de tal fenómeno. En general y en circunstancias normales, la mayoría de los fluidos, gases o líquidos, son medios transparentes y su movimiento permanece invisible para el ser humano durante la

observación directa, a menos que se aplique una técnica que permita la visualización del flujo. Una gran variedad de métodos permite que el flujo de un fluido sea visible ya sea en un laboratorio, entornos industriales o experimentos de campo, y aunque los principios físicos de muchas visualizaciones de flujo utilizan métodos sencillos, se han hecho importantes descubrimientos con estas técnicas [12-14]. Un ejemplo destacado es el hallazgo de la existencia de estructuras coherentes en flujos turbulentos, realizado por W. Liepmann quien concluye: “Es irónico que estos complejos flujos de estructuras fueran encontrados por los más primitivos métodos experimentales: la visualización de flujo” [15].

Por otro lado, la investigación realizada por Cedillo y Marín [16] trata el comportamiento del flujo de aire sobre edificaciones mediante un estudio numérico con el software comercial ANSYS-Fluent y experimental en un túnel de viento de la marca Armfield C15 en el que se instalaron modelos de helipuerto (edificio con techo en H), coliseo (casa con techo a dos aguas) y edificio con techo colgante, en la construcción de estos modelos se respetó la semejanza geométrica, cinemática y dinámica. Para el experimento realizado se considera que el flujo de aire en la sección de pruebas del túnel



de viento está determinado por: Aire a presión constante (presión atmosférica), los modelos se analizan en régimen estacionario, las variaciones de temperaturas se consideran despreciables, se considera un flujo incompresible y que las pérdidas de carga son despreciables. Mediante el estudio numérico se analiza el comportamiento del flujo alrededor de los modelos, en los resultados se encontraron que se forma un vórtice principal tipo estela en

la parte posterior de las edificaciones como en la Figura 2. Por otro lado, se comparan los valores de velocidad obtenida experimental y numéricamente sobre las edificaciones, como se muestran los resultados del edificio en la Figura 3, la línea en azul reporta el resultado experimental obtenido a través del tiempo, las líneas roja y verde presentan los resultados de estudios numéricos con tamaño de malla refinada y malla estándar, respectivamente.

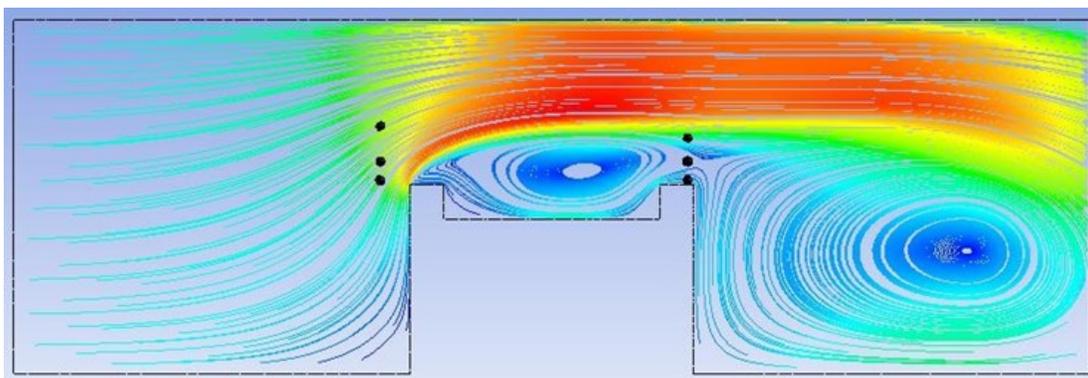


Figura 2.- Líneas de corriente en perfil H [16].

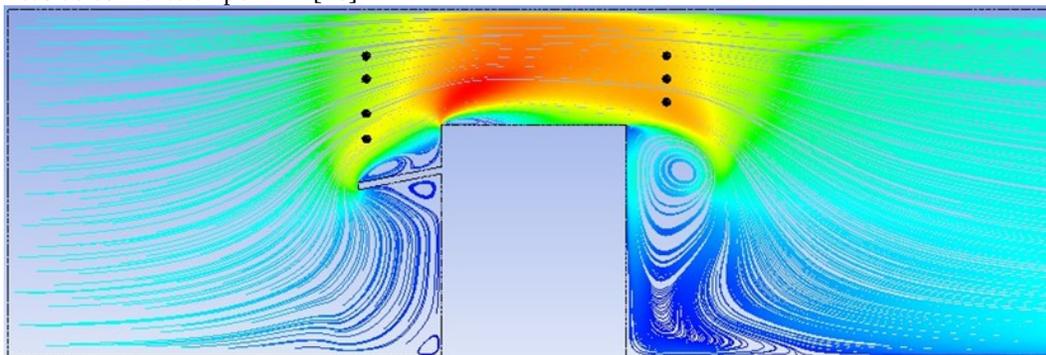


Figura 3.- Líneas de corriente en techo colgante [16].

En resumen, las comparaciones en los tres casos los autores concluyen que las velocidades de las simulaciones por mallado refinado son cercanas a los determinados experimentalmente, esto se esperaba ya que el mallado refinado en el contorno se usa especialmente en geometrías complicadas y para poder visualizar de mejor manera los efectos que se producen gracias a la capa límite del fluido en este caso el viento sobre los perfiles de las edificaciones.

Los resultados obtenidos para la medición de velocidad numérica y experimentalmente

presentan una diferencia máxima de 9% y se da para el caso presentado en la Figura 4 en el sensor 12, esto demuestra que el Software ANSYS Fluent® puede considerarse una herramienta de simulación para predicción, evaluación o para comparación confiable que brinda ayuda para analizar el comportamiento del viento.

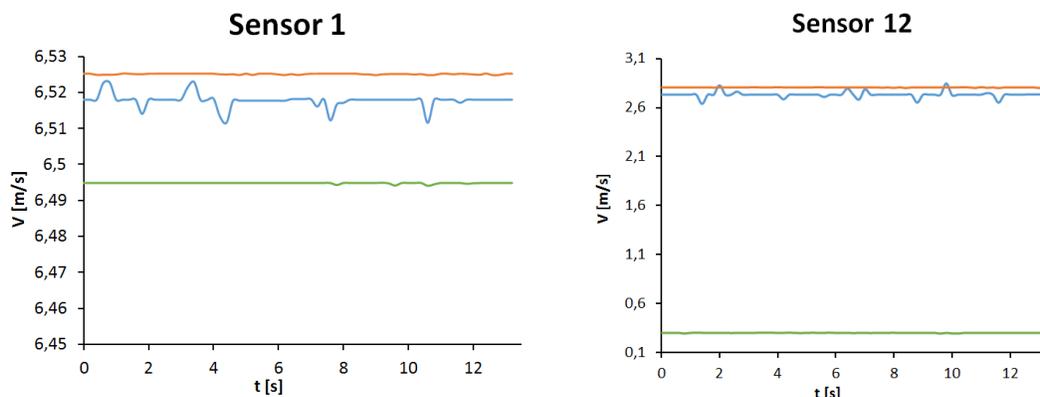


Figura 4.- Monitoreo de velocidad en los puntos 1 y 12 sobre techo colgante [16].

Otra investigación que trata al análisis del flujo sobre edificaciones utilizando el modelado numérico es la realizada por Bustamante et al. [17], quienes a través de un simulador de dinámica de fluido (Autodesk® Vasari) reproducen el flujo del viento de la ciudad de Punta Arenas, Chile. Se alimentó al software con la información climática de la ciudad obtenida mediante estaciones meteorológicas móviles Datalogger del tipo NOMAD de Secondwind, y posteriormente se procedió a realizar la simulación por bloques de 2 x 2 cuadras. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5. De sus resultados ellos concluyen que la herramienta del CFD permite entre otras características:

*Evaluar con más precisión la encrucijada de calles al considerar los comportamientos de remolinos laterales en el cañón urbano y cómo estos afectan a la comodidad peatonal.

*Visualizar mejor las incidencias de cambio de alturas dentro de la trama urbana, saliéndose de la rugosidad de la ciudad y su impacto dentro del espacio público.

*Reconocer las diferencias de comportamiento térmico entre veredas de las calles que están transversalmente al viento predominante.

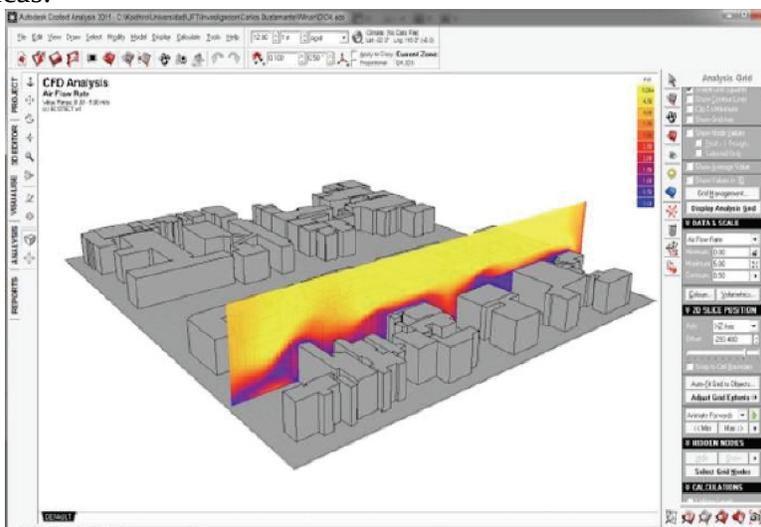


Figura 5.- Plano de flujo de aire sobre la ciudad [17].

Otro tipo de fenómeno que produce afectaciones al medio ambiente es el “cañón urbano”

producido por las edificaciones, el término define a una calle conformada por edificios a



ambos lados, que le otorgan una configuración de cañón. Las ciudades están formadas por cañones urbanos que forman estructuras complejas que, por una parte, dificultan el flujo libre del aire al disminuir la ventilación, y por el otro, provocar un atrapamiento de los contaminantes que debido precisamente a la reducida ventilación pueden ocasionar niveles inadecuados de calidad del aire con el consiguiente efecto en la salud humana [18]. Un cañón urbano se define por tres parámetros principales (H, W, L), tal y como se indica en la Figura 6. H es la altura máxima de los edificios en el cañón, W la anchura del cañón y L la longitud. Una vez establecidos los tres parámetros la descripción geométrica del cañón se limita a tres simples medidas: la relación

H/W, que describe las proporciones del cañón urbano en función de la altura (H) y ancho de calle (W), la relación L/H y la densidad edificada $j=Ar/AI$, donde “Ar” es el área aproximadamente plana de la cubierta edificada y “AI” el área “lot” o área del suelo ocupada por cada edificio. Otros descriptores geométricos que lo caracterizan es la orientación del cañón (θ) que describe el ángulo en grados del cañón respecto al eje Norte-Sur, y generalmente se indica la dirección cardinal (N-S, E-W) o (NW-SE, NE-SW), y el factor de visibilidad del cielo (skyview factor), que describe la porción del cielo visible desde una superficie dada, en un punto específico o dentro de un área urbana.

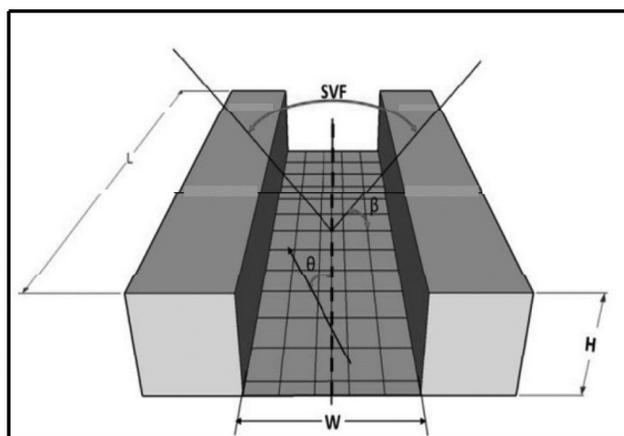


Figura 6.- Vista esquemática de un cañón urbano simétrico y sus descriptores geométricos SVF y H/W [18].

No es tarea fácil explicar las características generales de la dispersión en cañones urbanos, ya que además del fenómeno de la turbulencia, ya de por sí difícil de describir, intervienen otros factores que también la afectan. Al considerar la dirección del viento encima del cañón urbano, se pueden distinguir dos escenarios principales: el caso 1, cuando el viento sobre el cañón urbano (viento ambiental) tiene una dirección perpendicular o casi perpendicular al eje del cañón o de la calle y el caso 2, cuando la dirección del viento es paralela o casi paralela a este. Cuando las direcciones del viento son perpendiculares o casi perpendiculares al eje de la calle, la dispersión de los contaminantes

atmosféricos puede ser vista bajo diferentes regímenes de flujo. Oke [19] clasifica a esos patrones de flujo de acuerdo con la relación existente entre la altura de los edificios (“H”) y el ancho (“W”) de la calle, y se establecen tres regímenes de flujo que dependen sobre todo de las relaciones entre la altura media de los edificios (H) y el ancho del cañón (W), y a la vez entre la longitud de la calle (L) y la altura media de los edificios (H), tal como se muestra en la Figura 7. Estos tres tipos de flujo pueden presentarse como (a) aislado, (b) en estela interferida, y (c) en vórtice. Por ejemplo, para edificios frontales ampliamente espaciados ($H/W < 0.3$), los flujos asociados con edificios



separados por la calle no interactúan entre sí. En cambio, cuando la calle no es tan ancha ($0.3 < H/W < 0.7$) la estela originada por el edificio ubicado a sotavento es perturbada por el edificio situado a barlovento. Finalmente, en el caso en que el espaciamiento entre edificios separados por una calle sea aún menor

($0.7 < H/W$) se origina un vórtice estable en el interior del cañón urbano que interactúa levemente con el flujo de aire exterior. Este vórtice induce a que el flujo del aire a nivel de la calle tenga una dirección contraria a la del viento que circula sobre los edificios.

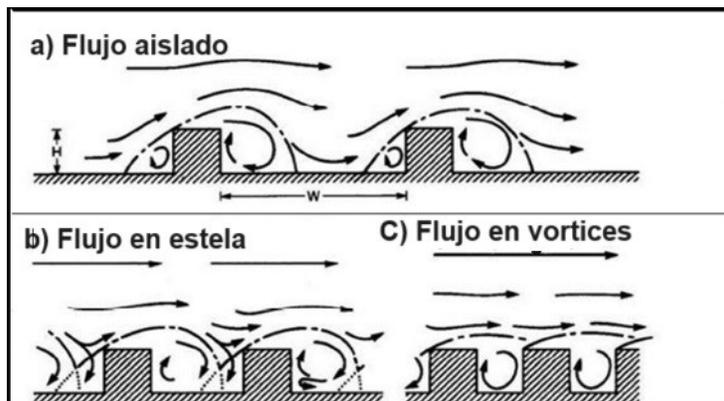


Figura 7.- Flujo del aire sobre cañones urbanos aumentando su relación H/W [19].

Lipp [18] concluye que la contaminación atmosférica en cañones urbanos por lo general se presenta en niveles varias veces superiores a la contaminación de fondo urbana. Los vehículos son las principales fuentes de contaminantes del aire, que contribuyen a un serio deterioro del aire ambiente urbano. Los contaminantes emitidos desde estas fuentes, inicialmente son afectados por las características propias de su emisión, luego son influidos por la turbulencia generada por el movimiento de los autos y finalmente por la turbulencia propia del aire en el interior del cañón urbano. Su remoción de la canopia urbana, por otra parte, es compleja debido sobre todo a la configuración de las fuentes, al ancho de calles y avenidas, a la interferencia de los edificios, y a la velocidad y dirección del viento. Todos estos fenómenos pueden actuar simultáneamente e intensificar el impacto.

Después de revisar el estado del arte de la problemática y fenómenos asociados a contaminación sobre medios urbanos, se describe a continuación el método para desarrollar un prototipo que permita la

visualización de flujo sobre medios urbanos a escala.

2. Metodología experimental

La implementación de la técnica de visualización de flujo con sólidos sobre modelos urbanos a escala se aplica en una zona de pruebas cuadrada construida de acrílico de $0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ de sección transversal, espesor de 0.09 m y una longitud de 1 m , tal como se aprecia en la Figura 8. El aire que fluye en esta zona de pruebas es impulsado por un ventilador axial tipo tambor estándar de 0.76 m de diámetro de 4 aspas, con un peso de 275 N y caudal máximo de $3.6 \text{ m}^3/\text{s}$.

La zona de pruebas se conecta a una tobera convergente que contiene el ventilador mencionado. Se conoce de la literatura [20-25] que una tobera de diferentes características (convergente-divergente, sónica o supersónica) permite inyectar o extraer un flujo de aire turbulento en alguna sección. Para esta investigación se decidió construir una tobera convergente de flujo subsónico debido a su fácil



implementación, bajo costo y que permite la aceleración del flujo en la zona de pruebas. En la Figura 9 se muestra el isométrico del diseño la tobera convergente, la cual se elabora de madera comprimida de 0.025 m de espesor y longitud de 1.2 m. Para generar un flujo

uniforme en la zona de pruebas se optó por colocar un honeycomb a la salida de la tobera como se muestra en la Figura 10, este accesorio tiene la especificación técnica de HK-5/32-2.5, que se toma del catálogo de Gill Corporation [26].

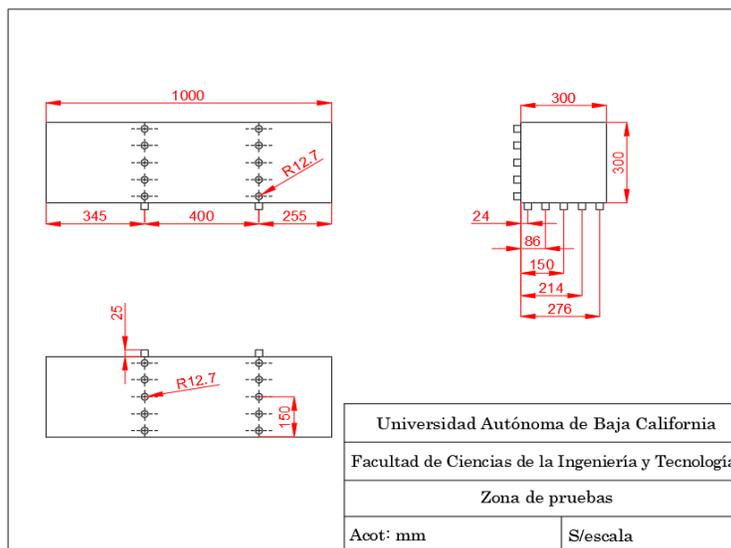


Figura 8.- Zona de pruebas de acrílico.

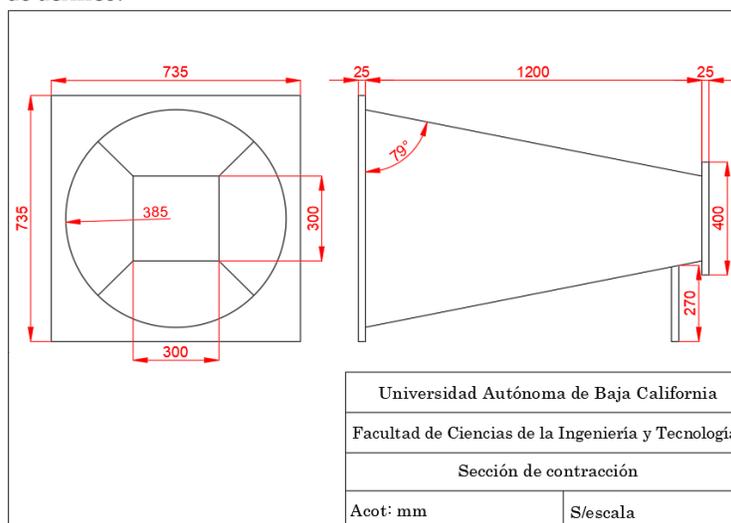


Figura 9.- Tobera convergente.

El panel hexagonal instalado está fabricado con material de aramida y para unirlo al interior de la sección de contracción se utilizó soldadura escocesa (scotch-weld) con el adhesivo estructural de uretano EC-3532 B/A, para realizar la unión fue necesario limpiar la superficie y posteriormente se mezcla

isocianato, generalmente conocido como endurecedor o acelerador, con polioliol durante 30 segundos aproximadamente, lo que proporciona un tiempo de trabajo entre 5 a 15 minutos, durante el cual se realizó la aplicación del adhesivo en el contorno del panel para posicionarlo y dejar curar durante 24 horas.



Figura 10.- Inserción de Honeycomb en tobera subsónica.

Para caracterizar la zona de pruebas se determina la presión dinámica promedio en la sección transversal como lo indica Wang [27], además sugiere que la distribución de los puntos de medición (Figura 11) se establezcan basado en la norma de la ASHRAE Standard 111-88

[28], y basados en esta norma para la zona de pruebas de esta investigación se utilizan 25 puntos para determinar la velocidad promedio en la sección transversal.

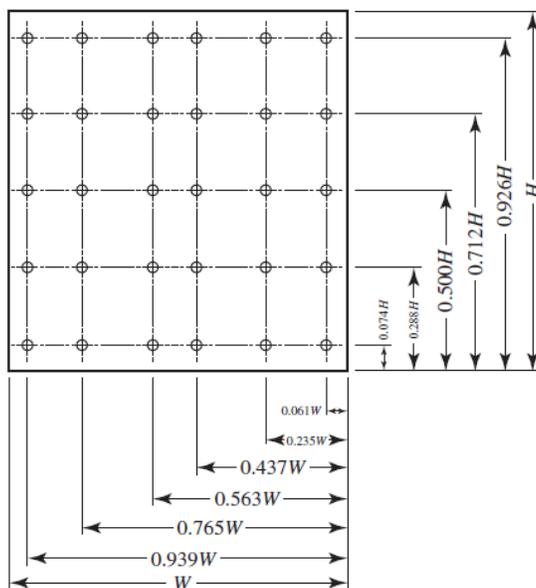


Figura 11.- Distribución de puntos de medición en una sección cuadrada [28].

La metodología para tratar los resultados de las mediciones de la presión dinámica en la zona de pruebas se explica en el documento de Morales et. al. [29]. En este artículo también se indica que la densidad del aire (ρ) se calcula basado en la guía de Becerra y Guardado [30]. Para determinar el valor de la densidad del aire y su incertidumbre durante esta investigación se utilizan los programas de cómputo registrados ante Indautor por Gómez et. al. [31] y Castillo et. al. [32], los datos requeridos para tal cálculo

(presión atmosférica, humedad y temperatura del aire) se obtuvieron con los datos de la estación meteorológica instalada en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología (FCITEC).

Finalmente, para indicar las propiedades del flujo se determinan los números adimensionales según lo indica Mott [33].

Número de Mach:



$$Ma = \frac{u_{media}}{C} \quad (1.1)$$

Donde:

u_{media} = velocidad promedio (m/s).

C = velocidad del sonido en el aire a la temperatura a la cual se realiza el experimento y se determina: $C = \sqrt{kRT}$, Dónde: $k=1.4$ y representa la relación de calores específicos.

Numero de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho 4 R u_{media}}{\mu} \quad (1.2)$$

Donde:

$4R$ = radio hidráulico (m).

μ = viscosidad dinámica del aire (Pa-s).

Intensidad de la turbulencia:

$$TU = \frac{u_{rms}}{u_{media}} \quad (1.3)$$

Donde la velocidad promedio temporal (u_{rms}) se define con la ecuación:

$$u_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_1^N [u_i - u_{media}]^2} \quad (1.4)$$

Donde:

u_i = velocidad instantánea (m/s).

La metodología para la visualización de flujo con solidos en el modelo del medio urbano se implementa con los siguientes pasos:

- 1.- Utilizando una guía (pala o papel) colocar la cantidad requerida de trazador (volumen de material para visualización) sobre el modelo urbano a escala, el cual se coloca en una base llamada mortero (Figura 12) para que permita que el material se distribuya uniformemente en toda la superficie.
- 2.- Insertar el modelo urbano en el interior de la zona de pruebas (Figura 13), y fijar el modelo.
- 3.- Encender el ventilador a la potencia necesaria, y permitir que el flujo circule sobre el modelo al menos durante 3 minutos.
- 4.- Apagar el ventilador después de este tiempo y capturar la imagen del comportamiento del flujo sobre el modelo urbano.
- 5.- Retirar los residuos de la maqueta y limpiar la misma para su almacenamiento.

Los materiales utilizados para probar la técnica de visualización con solido se enlistan en la Tabla 1. La arena sílica 20-40 [34] es utilizada para la preparación de morteros epóxicos, ya que esta presenta una densidad que permite su desplazamiento al contacto con el aire.

Tabla 1. Propiedades de materiales para visualización.

Material	Densidad (kg/m ³)
Alpiste	0.00075
Arena Sílica	0.002
Bicarbonato de sodio	0.0026
Confeti	0.0008

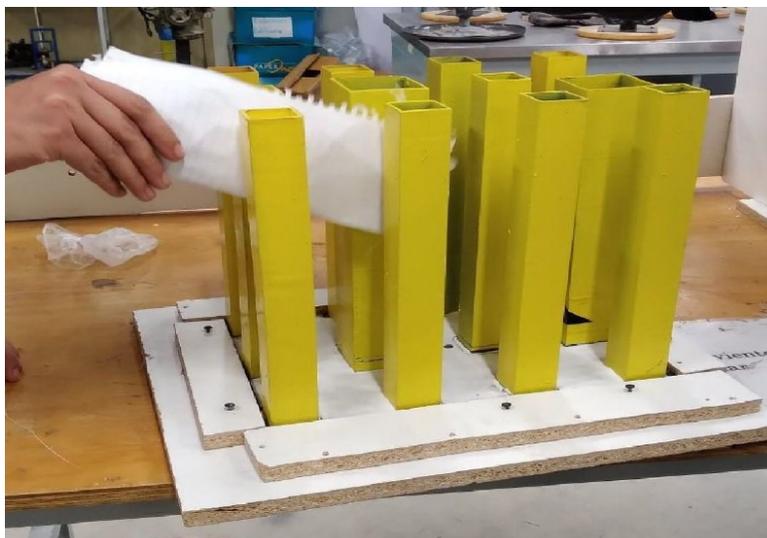


Figura 12.- Mortero para distribución de arena.

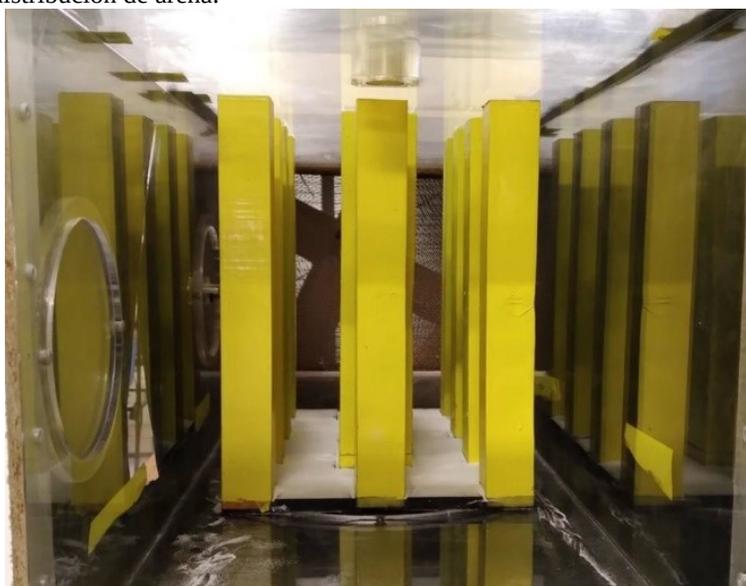


Figura 13.- Maqueta de medio urbano instalado.

El modelo de medio urbano está constituido por 12 prismas cuadrados, dos tienen una longitud $D=0.06$ m y los restantes diez con $d=0.036$ m, los cuales están separados a una distancia $Y=0.048$ m, todos cuentan con una altura $W=0.3$ m, tal como se indica en la Figura 14. Con esta configuración se tiene un modelo

urbano con una relación de $W/Y=6.25$, la cual es muy elevada para lo reportado por Oke [19], y por lo tanto se tendrá una influencia en el comportamiento del flujo. Los 12 prismas instalados en la placa se construyen con una impresora 3D de la marca XYZ Printing Da Vinci® que utiliza filamentos de PLA (ácido poli láctico) con diámetro de 0.00172 m.

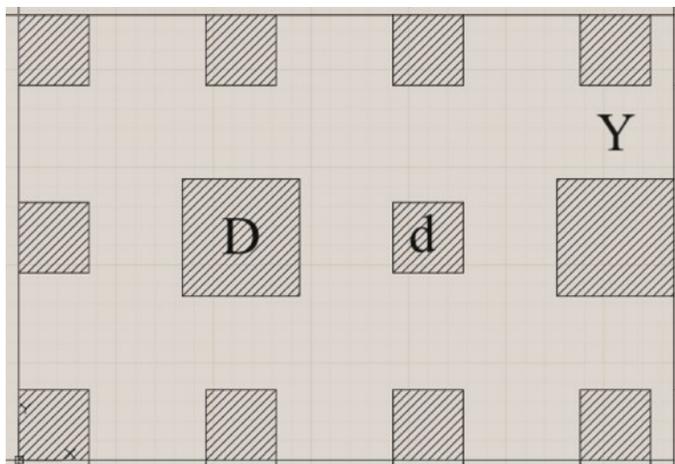


Figura 14.- Nomenclatura en modelo urbano.

3. Resultados y discusiones

La tobera subsónica construida se instala en el laboratorio de Fluidos de la FCITEC y se muestra en la Figura 15. Para obtener los valores de velocidad del aire en la zona de pruebas se utilizan los instrumentos de medición mostrados en la Figura 16, a) tubo de Prandtl y b) manómetro digital modelo ExtechHD350 [35] y c) modelo de utilidad diseñado por Morales et. al. [36]. Los números adimensionales de Reynolds y Mach obtenidos

para las condiciones del experimento indican que se tiene flujo turbulento e incompresible en la zona de pruebas de la tobera subsónica; la longitud característica utilizada para el Reynolds es el Radio hidráulico y los resultados son: **Re = 304992 y Mach = 0.01**. La velocidad promedio obtenida en la zona de pruebas sin colocar el prototipo en el interior es de **4.18 m/s ± 0.3 m/s**, las condiciones atmosféricas que se monitorean durante las pruebas se enlistan en la tabla siguiente:

Tabla 2. Condiciones ambientales.

Densidad aire (Kg/m ³)	1.136
Temperatura aire (°C)	24.56
Humedad aire (%)	20
Viscosidad dinámica aire (Aire) (Pa/s)	1.8683x10 ⁻⁵
Presión atmosférica (Pa)	97283.703

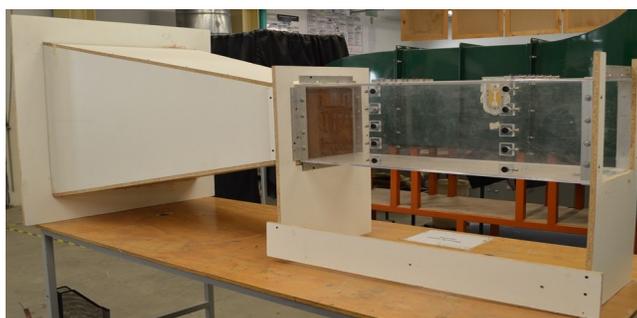


Figura 15.- Tobera subsónica.



Figura 16.- Instrumentos de medición.

La incertidumbre estadística encontrada en la medición de la velocidad indica que el flujo presenta un comportamiento irregular en la zona de pruebas, por lo que se decidió realizar una simulación numérica del flujo en el prototipo completo utilizando el software Solidworks [37], para los mismos parámetros geométricos y de flujo que en el experimento. Para la simulación numérica se estableció flujo interno con régimen turbulento (el modelo de turbulencia que utiliza el software por default es $k-\epsilon$), las condiciones iniciales de presión atmosférica y temperatura se consideran estándar, las condiciones de frontera se establecieron con una velocidad de entrada para un ventilador axial y presión atmosférica a la salida de la zona de pruebas, las paredes del dominio computacional se consideran adiabáticas, el fluido de trabajo es aire y la gravedad se estableció con un valor de 9.81 m/s^2 . Para el mallado del dominio

computacional se utilizó la opción automática nivel 3.

En la Figura 17 se muestran los vectores de velocidad encontrados en la simulación, se aprecia que el flujo ingresa a la zona de pruebas con rotación generada por el ventilador axial y maximizado por reducción de la tobera, lo que conlleva a encontrar un flujo que presenta una turbulencia elevada en la sección transversal de la caja de acrílico (tal como se encontró experimentalmente con $Tu=7\%$). Como conclusión de esta simulación se tiene: es posible realizar un experimento con este prototipo, se puede utilizar la visualización de flujo para obtener un análisis cualitativo aceptable del comportamiento de un contaminante en un medio urbano, no así para un resultado cuantitativo.

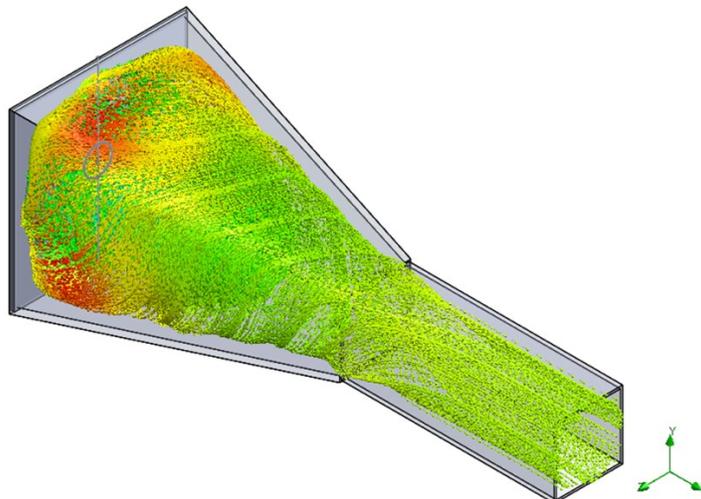


Figura 17.- Resultado numérico de flujo turbulento en zona de pruebas.

En la Figura 18 se muestran los resultados obtenidos con los diferentes tipos de materiales sólidos utilizados para la visualización de flujo. La cantidad de material utilizada en cada caso

fue pesada en una báscula para tener un control de los experimentos (100 gr para arena y bicarbonato, 400 gr para alpiste y confeti).

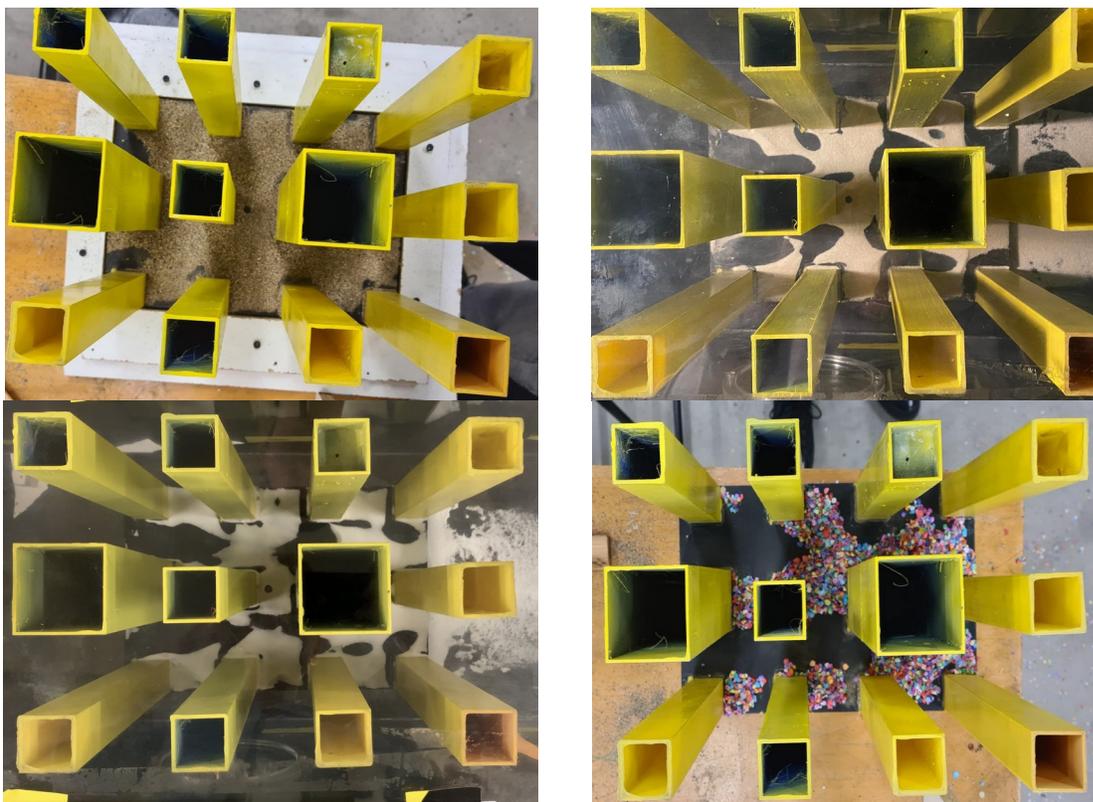


Figura 18.- Visualización de flujo (imagen en sentido horario): alpiste, arena sílica, bicarbonato de sodio y confeti.

De los resultados se aprecia que tanto la arena sílica como el bicarbonato presentan de mejor

manera el comportamiento del flujo, mostrando claramente las acumulaciones de material a



diferencia del alpiste o el confeti, este último no se comportaba estable y después de un tiempo variaba su conformación. Finalmente, por el bajo costo del bicarbonato hace que sea el material a sugerir para las pruebas en este tipo de técnica de visualización.

En la Figura 19 se observa el paso de un flujo turbulento de aire a través de un medio urbano a escala. En ella se destacan con un punto rojo las zonas donde se presenta acumulación de contaminantes, en este caso representados por [las acumulaciones de] bicarbonato de sodio. Estas zonas que se caracterizan por una baja circulación de viento y por consiguiente alta temperatura, se relacionan con el efecto “isla de calor”. Además, son propensas a la acumulación de contaminantes, por lo que es ahí donde se espera que la plantación de áreas verdes pueda ayudar a mitigar ambos efectos. De manera opuesta, las líneas azules muestran el paso del flujo libre del aire característico de grandes avenidas interconectadas, las cuales serán positivas en la dispersión. Esta representación del comportamiento del flujo es similar a la

obtenida por Drach y Corbella mostrados en la Figura 2. Algunas trayectorias del flujo relacionadas con la generación de vórtices que conllevan a la acumulación simétrica del contaminante son mostradas por las flechas verdes. Por otro lado, la Figura 20 corresponde a un mapa de contornos adimensionales obtenidos de un análisis numérico del flujo en un medio poroso (también puede considerarse como una zona urbana) que muestra un patrón de flujo similar al obtenido experimentalmente en esta investigación. La simulación numérica fue realizada por Alonzo et. al. [38], para un flujo turbulento ($Re=50000$) con una relación de aspecto $D/d=0.6$ (relación entre ancho de cada prisma) similar a la que se tiene en esta investigación. En el resultado numérico se aprecian en rojo las zonas de desprendimiento de flujo y generación de turbulencia, las cuales coinciden con las regiones en forma de lóbulo sin trazador en las zonas frontales del modelo experimental, y aquellos en las corrientes laterales de flujo que se interconectaron a lo largo del modelo.

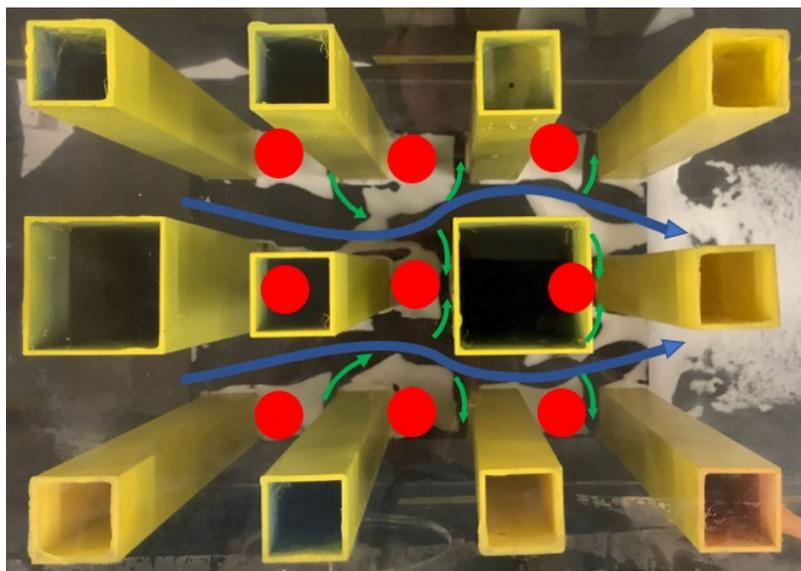


Figura 19.- Visualización de flujo con bicarbonato de sodio en un medio urbano.

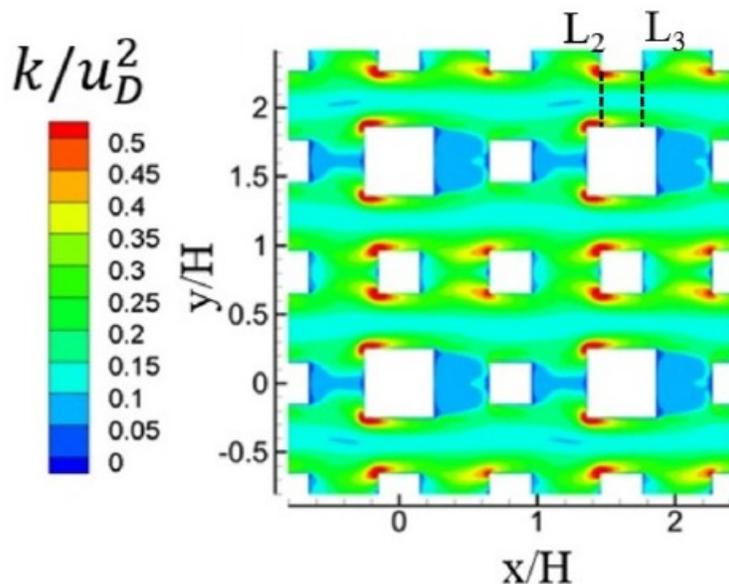


Figura 20.- Análisis numérico del flujo en un medio poroso [38].

4. Conclusiones

Se construyó y caracterizó una tobera convergente subsónica para aplicaciones de visualización de flujo con sólido. La zona de pruebas del prototipo presenta flujo turbulento con una turbulencia del 7% sin la presencia del modelo. El prototipo de visualización de flujo construido permite realizar un análisis cualitativo confiable del flujo en un medio urbano, y fue probado para un medio poroso con cilindros de diferente diámetro. De los 4 materiales utilizados para aplicar la técnica de visualización de flujo, el bicarbonato de sodio presenta mejores condiciones en cuanto a su viabilidad de aplicación, y capacidades de representar zonas de bajas y altas velocidades. Este trabajo, presenta las bases para nuevos intentos orientados a la visualización de los patrones de flujo en medios urbanos reales a escala, y otros afines. De esta manera, se busca encontrar regiones donde la emisión de cierto contaminante es en especial dañina, o bien, donde se espera que la implementación de políticas de áreas verdes sea en especial positiva.

5. Reconocimiento de autoría

Oscar Adrián Morales Contreras: Conceptualización, experimentación, investigación y escritura. *Alejandro Alonzo García:* Conceptualización, experimentación, investigación y escritura. *Juan Antonio Paz González:* Conceptualización, experimentación, investigación y escritura. *Raúl Vázquez Prieto:* Conceptualización, experimentación, investigación y escritura. *José Emilio López Escobar:* Conceptualización, experimentación, investigación y escritura.

Referencias

- [1] F. Vargas, “La contaminación ambiental como factor determinante de la salud”, *Rev. Esp. Salud Publica*, No. 79, pp 117-127, 2005.
- [2] K. Smith, C. Corvalan, T. Kjellstrom, “How much global ill health is attributable to environmental factors?”, *Rev. Epidemiology*, No 10, Vol. 5. pp 573-584, septiembre 1999.
- [3] G. Araujo, “Contaminación ambiental y sus efectos sobre la salud”, Instituto Nacional de Salud Pública, Recuperado el 25 de enero de 2024 de:



https://www.insp.mx/images/stories/INSP/Docs/cts/101208_cs1.pdf

[4] F. Valent, D. Little, R. Bertollini, L. Nemer, F. Barbone and G. Tamburini, “Burden of disease attributable to selected environmental factors and injury among children and adolescents in Europe”, *Lancet Journal*, No. 363, pp. 2032-9, 2004.

[5] Organización Mundial de la Salud, Recuperado el 25 de enero de 2024, de <https://www.who.int/es>

[6] Organización Panamericana de la Salud, Recuperado el 25 de enero de 2024, de <https://www.paho.org/es>

[7] A. Haines and J. Patz, “Health effects of climate change”, *JAMA*, No. 291 Vol 1, pp. 99-103, 2004.

[8] A. McMichael, R. Woodruff and S. Hales, “Climate change and human health: present and future risks”, *Lancet Journal*, No. 367, pp. 859-69, 2006.

[9] S. Lim, T. Vos, A. Flaxman, G. Danaei, K. Shibuya, H. Adair-Rohani H, “A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990-2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010”, *Lancet Journal*, No. 380, pp. 2224-60, 2012.

[10] Secretaría del medio ambiente y recursos naturales, Recuperado el 27 de enero de 2024, de

https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2018/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServletd54a.html

[11] P. Drach y O. Corbella, “Estudios para visualización de experimentos en túnel de viento: barrios de Copacabana e Ipanema”, *Acta de la XXXVII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*, agosto de 2016.

[12] Y. Nakayama and R. Boucher. “*Introduction to Fluid Mechanics*”, Ed. Butterworth Heinemann, London, Cap. 16, 1999.

[13] M. Van Dyke. “*An Album of Fluid Motion*”, Ed. The Parabolic Press, California, 1982.

[14] W. Jei Yang. “*Handbook of Flow Visualization*”, Ed. Hemisphere Publishing Corporation, United States of America, 1989.

[15] C. Tropea, A. Yarin and J. Foss. “*Handbook of Experimental Fluid Mechanics*”, Ed. Springer-Verlag, Berlin, Cap. 11, 2007.

[16] J. Cedillo y J. Marín, “Estudio experimental y computacional mediante CFD ANSYS del flujo de aire a través de techos de edificaciones utilizando un túnel de viento”, Tesis para Ing. Mecánico, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca Ecuador, 2015.

[17] C. Bustamante, P. Ogino y E. Higuera, “Estrategia Metodológica para la Visualización Digital de Patrones Aerodinámicos Presentes en la Morfología Urbana y su Incidencia en el Uso Estancial de los Espacios Públicos” in XVII Congreso de la Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital, pp. 108-111, Sao Paulo, diciembre de 2014.

[18] D. Lipp, “El cañón urbano su incidencia en la contaminación del aire”, *Actas Congreso Internacional de Geografía*, pp. 123-128, 2014.

[19] T. Oke, “*Boundary Layer Climates*”, 2ª edición, Ed. Routledge, New York, USA, 1987.

[20] F. White, “*Viscous fluid Flow*”, 3ª edición, Ed. McGraw-Hill, New York, USA, 2006.

[21] G. Sutton and O. Biblarz, “*Rocket propulsion elements*”, 9ª edición, Ed. John Wiley & Sons, New York, USA, 2016.

[22] J. Anderson, “*Fundamentals of aerodynamics*”, 6ª edición, Ed. McGraw-Hill, New York, USA, 2017.

[23] Y. Cengel and J. Cimbala, “*Fluid mechanics: Fundamentals and applications*”, 4ª edición, Ed. McGraw-Hill, New York, USA, 2017.

[24] T. Karman, “The fundamentals of the statistical theory of turbulence”, *Journal of the Aeronautical Sciences*, vol. 4, No. 4, pp. 131-138, 1937.

[25] S. Tolentino, “Evaluación de modelos de turbulencia para el flujo de aire en un difusor



transónico”, Revista Politécnica, vol. 45, No. 1, pp. 25-38, 2020.

[26] The Gill Corporation, Recuperado el 5 de febrero de 2024 de <https://www.thegillcorp.com/>

[27] S. Wang, “*Handbook of Air Conditioning and Refrigeration*”, Cap. 17, pp. 17.77-17.78, 2ª edición, Ed. McGraw-Hill, Nueva York, 2001.

[28] ASHRAE Standard, “Measurement, testing, adjusting, and balancing of Building HVAC systems”, ANSI/ASHRAE Standard 111-2008.

[29] O. Morales, A. Gómez, J. Paz, J. Navarro y J. Barboza, “Caracterización del túnel de viento subsónico de ECITEC-UABC”, R. Ingenierías, vol. XXI, no. 80, 2018.

[30] S. Becerra y G. Guardado, “*Estimación de la Incertidumbre en la Determinación de la Densidad del Aire*”, Centro Nacional de Metrología, Querétaro, 2003.

[31] A. Gómez, M. Méndez, O. Morales, J. Paz y J. Nieto, “Programa para determinar la densidad del aire”, Registro Indautor 03-2018-061810015800-01, México, junio de 2018.

[32] A. Castillo, M. Fong, M. Méndez, O. Morales, J. Ruiz e I. Uriarte, “Programa para

determinar la incertidumbre en la medición de la densidad del aire”, Registro Indautor 03-2018-092410202300-01, México, junio de 2018.

[33] R. Mott, “*Mecánica de Fluidos*”, 7ª Edición, Ed. Pearson, 2015.

[34] INTACO, Recuperado el 5 de febrero de 2024 de <https://www.intaco.com/>

[35] EXTECH, Recuperado el 20 de abril de 2024 de <https://www.flir.com.mx/products/hd350/?vertical=condition+monitoring&segment=solutions>

[36] O. Morales, A. Gómez y J. Paz, “Buje para sonda de presión tipo tubo de Pitot o Prandtl”, Modelo de utilidad 5267, México, junio de 2023.

[37] SolidWorks®, Recuperado el 5 de febrero de 2024, de https://www.solidworks.es/sw/images/content/Training/SIM_2010_HOTD_ESP.pdf

[38] A. Alonzo, A. Mendoza, M. Díaz, S. Martínez and E. Martínez, “Assessment of Low-Re turbulence models and analysis of turbulent flow in porous media consisting of square cylinders with different diameter ratios,” J. Fluids Eng., vol. 143, no. 1, pp. 18, 2020.



Derechos de Autor (c) 2024 Oscar Adrián Morales Contreras, Alejandro Alonzo García, Juan Antonio Paz González, Raúl Vázquez Prieto, José Emilio López Escobar



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)