

Simulación de la capa límite atmosférica en el túnel de viento de la Universidad del Valle

Simulation of atmospheric boundary layer wind tunnel of Universidad del Valle

Martha Elena Delgado Osorio¹  Albert Ortiz¹  Jhon Jairo Barona¹  Johannio Marulanda¹ 
Peter Thomson¹ 

¹Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Resumen

La precisa simulación del flujo de viento en la capa límite atmosférica en un túnel de viento es de suma importancia para diversas aplicaciones en ingeniería, abarcando campos como la ingeniería civil y ambiental, entre otros. En el contexto de investigar y caracterizar el comportamiento del viento en modelos a escala reducida de estructuras civiles, llevamos a cabo un estudio en el Túnel de Viento de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad del Valle. El objetivo principal consistió en determinar la distribución adecuada de dispositivos generadores de turbulencia para replicar perfiles de velocidad específicos requeridos para exposiciones de tipo rural, suburbana y urbana. Este estudio se basó en la reproducción de tres perfiles de velocidad, representativos de exposiciones urbanas, suburbanas y rurales, a una escala de 1:200. Para lograr esto, implementamos generadores de vórtices de Irwin a tamaño completo, una barrera almenada y elementos de rugosidad de Counihan y Gartshore. La medición de la velocidad media en la sección de ensayos del túnel de viento se llevó a cabo utilizando sistemas de anemometría de hilo caliente y tubos de Pitot. Los resultados experimentales obtenidos al simular los perfiles de velocidad demostraron una correspondencia aceptable con los perfiles teóricos establecidos en el código de diseño NSR-10. Este estudio contribuye al avance en la comprensión y reproducción de perfiles de velocidad en el contexto de simulación de la capa límite atmosférica en túneles de viento, respaldando aplicaciones clave en el campo de la ingeniería.

Abstract

The accurate simulation of wind flow in the atmospheric boundary layer in a wind tunnel is crucial for various engineering applications, spanning fields such as civil and environmental engineering. With the aim of investigating and characterizing the behavior and impact of wind on scaled models of civil structures in the Wind Tunnel of the School of Civil Engineering at the University of Valle, the main objective is to determine the appropriate distribution of turbulence-generating devices to replicate specific velocity profiles required for rural, suburban, and urban exposure types that describe the atmospheric boundary layer. This study is based on reproducing three velocity profiles, representative of urban, suburban, and rural exposures, at a 1:200 scale. To achieve this, full-scale Irwin vortex generators, a castellated barrier, and Counihan and Gartshore roughness elements were implemented. Velocity measurements in the wind tunnel test section were conducted using a hot-wire anemometry system and Pitot tubes. Experimental results obtained by simulating velocity profiles demonstrated an acceptable correspondence with theoretical profiles established in the NSR-10 design code. This study contributes to the advancement in understanding and replicating velocity profiles in the context of simulating the atmospheric boundary layer in wind tunnels in Colombia, supporting key applications in the field of engineering.

Keywords: wind tunnel, Passive turbulence-generating devices, wind profile, atmospheric boundary layer, Roughness types.

Palabras clave: túnel de viento, dispositivos pasivos generadores de turbulencias, perfil del viento, capa límite atmosférica, elementos de rugosidad.

¿Cómo citar?

Delgado, M.E., Ortiz, A., Barona, J.J., Marulanda J., Thomson, P. Simulación de la Capa Límite Atmosférica en el túnel de viento de la Universidad del Valle. Ingeniería y Competitividad, 2024, 26(2)e-20713317.

<https://doi.org/10.25100/iyc.v26i2.13317>

Recibido: 31-10-23 Aceptado: 12-03-24

Correspondencia:

martha.delgado@correounivalle.edu.co

Este trabajo está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-No Comercial 4.0.



OPEN  ACCESS

Conflicto de intereses: ninguno declarado

¿Por qué se llevó a cabo?

Esta investigación se realizó para replicar la capa límite atmosférica dentro del túnel de viento de la Facultad de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle. El cumplimiento del código de diseño colombiano NSR-10 es esencial para estudiar y evaluar con precisión las cargas de viento en estructuras civiles.

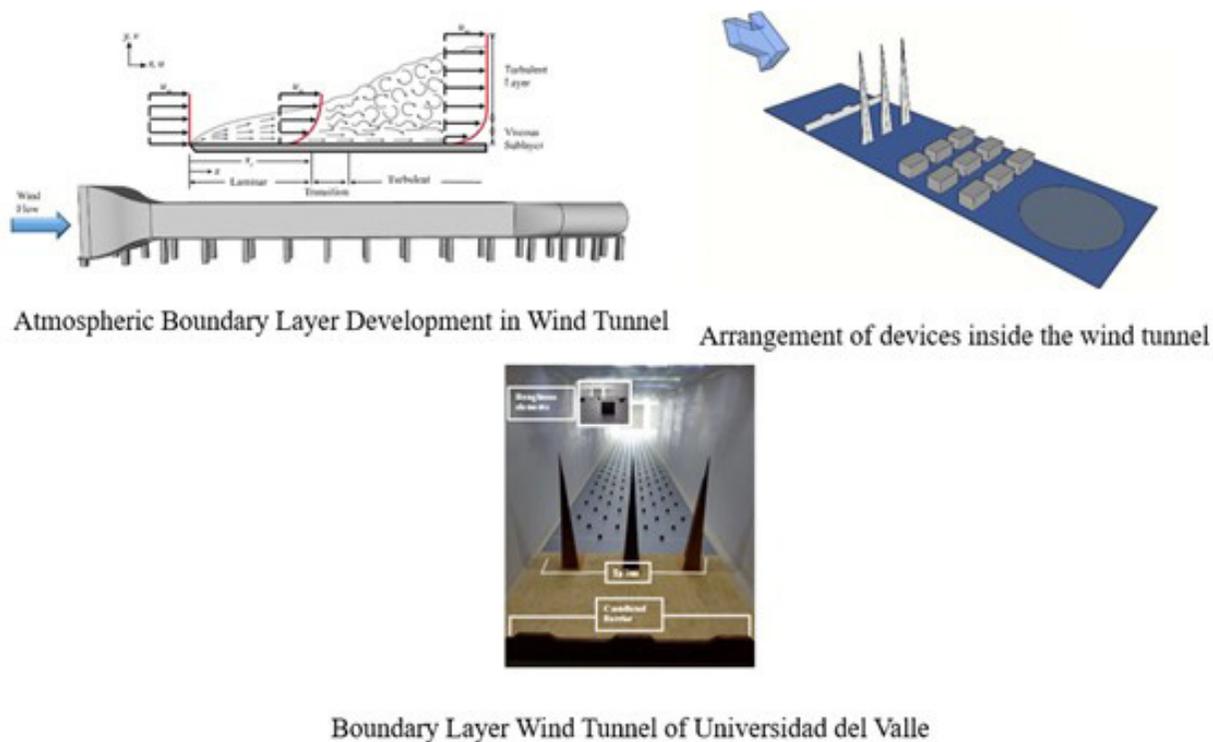
¿Cuáles fueron los resultados más relevantes?

A través de las pruebas realizadas, este estudio estableció las dimensiones y configuraciones óptimas de los dispositivos pasivos generadores de turbulencias, asegurando la representación precisa de los perfiles de viento para exposiciones rurales, suburbanas y urbanas especificadas en el código de diseño.

¿Qué aportan estos resultados?

Estos hallazgos sientan las bases para futuros experimentos en túneles de viento, facilitando la medición de cargas de viento en modelos a escala. Al someter estos modelos a exposiciones de rugosidad adecuadas, se garantiza la similitud cinemática de las pruebas.

Graphical Abstract



Introducción

El crecimiento de la población mundial y la evolución de la infraestructura explican el progresivo interés en analizar la Capa Límite Atmosférica (CLA), debido a que, en esta capa de aire, aproximadamente entre 1 - 2 km de altura, se desarrollan las actividades humanas. Los efectos del viento sobre edificaciones, sobre el confort de peatones, la dispersión de contaminantes, en la generación de energía eólica, son algunos de los ejemplos de estas actividades desarrolladas dentro de la CLA. Las características de este flujo dentro de esta capa dependen de varios factores, principalmente de la interacción del aire con las características del terreno como su rugosidad (1).

Existen técnicas establecidas para modelar físicamente la CLA en un túnel de viento, dos de ellas son, la larga longitud de crecimiento de la capa límite en el túnel, la cual debe ser mucho mayor en comparación con la dimensión de la sección transversal, junto con la disposición y tamaño de rugosidad en el piso del túnel. Si bien esta técnica se utiliza tradicionalmente para el estudio del CLA, la modelización numérica ha surgido como una contribución complementaria a la misma en las últimas décadas. El desarrollo de modernos ordenadores paralelos y de métodos numéricos de dinámica de fluidos computacional (CFD) permite actualmente simular numéricamente flujos turbulentos con diferentes aproximaciones, que van desde los métodos Navier-Stokes con promediado de Reynolds (RANS), pasando por la simulación de grandes corrientes (LES), hasta la simulación numérica directa (DNS) (1-3). La principal preocupación de esta metodología es reproducir adecuadamente las características de la capa límite, que dependen principalmente de las características de rugosidad del terreno. Para ello se han propuesto diferentes enfoques, entre los que se incluyen la rugosidad, como bloques cúbicos en el suelo y la representación de la vegetación basada en el arrastre con la ley potencial de velocidad (4,5).

Para realizar una adecuada simulación de la CLA se debe reproducir el comportamiento exponencial del flujo de los vientos naturales dentro de ella, lo cual implica lograr una reproducción apropiada de la distribución de velocidad media en función de la altura y algunos parámetros turbulentos (6). Con el objetivo de caracterizar la capa límite en el Túnel de Viento de la Universidad del Valle, en esta investigación se plantea el análisis de los perfiles de velocidad media en el túnel y su contenido está organizado como sigue: la sección 2 contiene los materiales y métodos; la sección 3, resultados y discusión y la sección 4, las conclusiones.

Materiales y métodos

Perfiles de velocidad de viento

La física del CLA es muy compleja, y la razón principal de esta complejidad es la interacción entre el flujo de aire y la superficie terrestre, que se produce principalmente a través de mecanismos mecánicos y térmicos. La interacción mecánica surge de la fricción causada por el viento contra la superficie del suelo, y la turbulencia asociada. En ausencia de procesos térmicos, se dice que la CLA es neutra, y se espera encontrar una velocidad exponencial, caracterizada por la velocidad de fricción y la altura de rugosidad del terreno (6,7). En esta investigación, primero se llevaron a cabo simulaciones de la capa límite generada dentro del túnel sin los dispositivos pasivos para analizar el campo de flujo transversal en la sección de ensayos, posteriormente, y de acuerdo con el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (8) se empleó la ley potencial para describir la variación de las características de la velocidad media respecto a la altura, como se presenta en la ecuación (1), dentro de la sección de ensayos en el túnel de viento.

$$U(z) = U_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (1)$$

donde $U(z)$ es la velocidad media del viento a una altura z sobre el terreno. U_{ref} es la velocidad

media del viento para una altura de referencia Z_{ref} sobre el terreno. Y α es el índice de rugosidad del terreno, el cual depende de la exposición descrita en el código de diseño (8).

Según el reglamento los parámetros de la Capa Límite Atmosférica de los terrenos estándar están dados en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de la Capa Límite Atmosférica para las exposiciones B, C, D.

Terreno	Índice de Rugosidad α	Altura Capa Límite (m)	Altura Referencia (m)
B	0.25	365.8	
C	0.15	274.3	10
D	0.11	213.4	

Estrategia de simulación

En la simulación de la CLA realizada en el túnel de viento de la Universidad del Valle se emplearon dispositivos pasivos del desarrollo de la capa límite, tales como agujas, barreras y tapetes de rugosidad, similar a las investigaciones realizadas por (1,9,10). El túnel de viento opera en circuito abierto y presenta una sección de ensayos con dimensiones de 2 m de altura por 2 m de ancho, junto con una sección de crecimiento de 22 m. La velocidad máxima alcanzada en la cámara de ensayos asciende a 30 m/s. Con el objetivo de cumplir con las condiciones de la CLA según lo establecido en el Reglamento NSR-10, se llevaron a cabo cálculos para determinar las dimensiones de los dispositivos turbulentos. Estos dispositivos de control incluyen mallas o rejillas metálicas para homogeneizar el flujo de viento en la entrada y la contracción, seguidas de una barrera con forma almenada, agujas generadoras de turbulencia y elementos de rugosidad que se extienden hasta la sección de ensayos. El proceso de diseño y fabricación se dividió en varias etapas: en primer lugar, se realizaron simulaciones preliminares mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) para optimizar el espaciado y tamaños de los dispositivos. Luego, se procedió a la fabricación, instalación y prueba de estos dispositivos en el túnel de viento. Adicionalmente, se definieron las dimensiones de los dispositivos para adaptar el Túnel de Viento de la Universidad del Valle a las tres exposiciones especificadas por el Reglamento NSR-10. Los elementos de rugosidad, las agujas y la barrera se colocaron sobre el suelo del túnel de viento siguiendo una configuración y distribución que permitiera obtener los perfiles de velocidad conforme a lo establecido en el código de diseño (ver figura 1). Asimismo, se programó una ruta para el escáner de velocidades, con el propósito de capturar y medir los perfiles de velocidad de manera precisa (11,12).

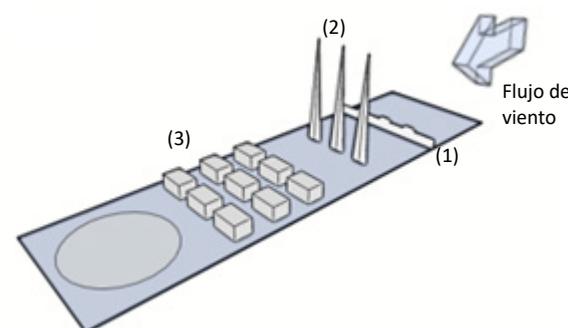


Figura 1: Esquema de disposición de la barrera almenada (1), agujas (2) y elementos de rugosidad (3) en túnel de viento

Experimentación en el Túnel de Viento de capa límite

Los experimentos fueron conducidos en el Túnel de Viento de Capa Límite Atmosférica de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad del Valle. En la figura 2, se presenta un esquema general del Túnel de viento.

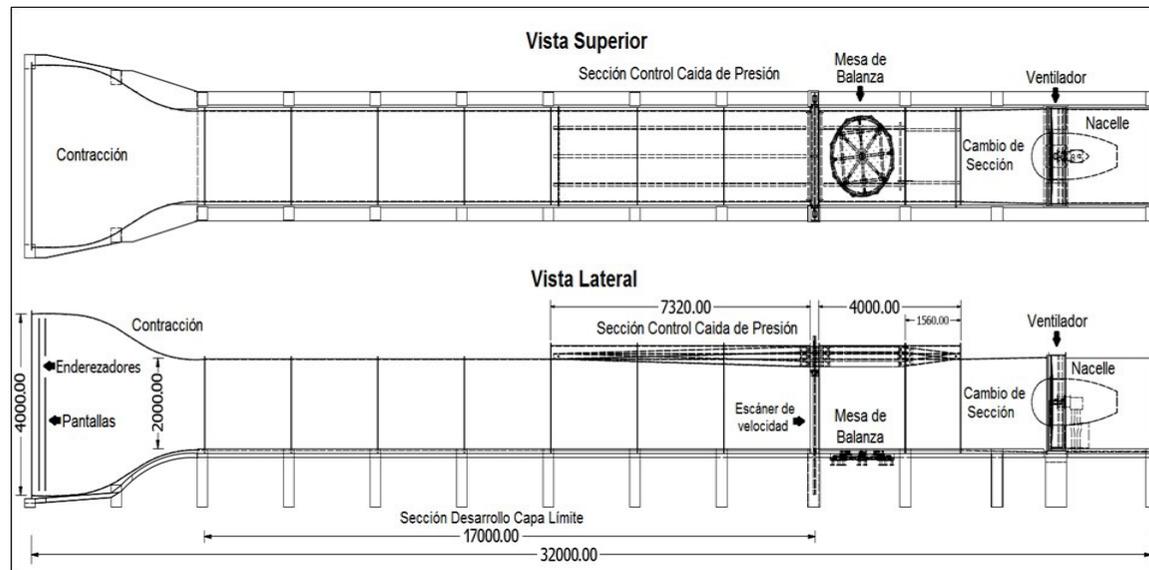


Figura 2: Diseño del Túnel de Viento de Capa Límite de la Universidad del Valle (unidades en mm).

Previamente a la simulación de la CLA se evalúa el comportamiento básico del túnel de viento sin elementos que generen turbulencia. Se realizan mediciones de la velocidad media en la sección transversal de la sección de ensayos. El desarrollo del flujo en un túnel de viento se rige por los principios fundamentales de la mecánica de fluidos, el aire es inducido a fluir a lo largo de la sección de prueba gracias a un sistema de un ventilador de alto potencial hidráulico, donde las paredes del túnel desempeñan un papel esencial en la conformación del flujo y la obtención de un campo de velocidad uniforme.

La geometría de las paredes del túnel, junto con su perfil aerodinámico y el acabado superficial, están diseñadas meticulosamente para minimizar la generación de turbulencia y perturbaciones en el flujo. Esto implica la adopción de perfiles de sección transversal cuidadosamente diseñados para evitar la formación de vórtices y gradientes de velocidad indeseados (ver figura 1). Asimismo, se incorporan deflectores y dispositivos de corrección para eliminar remolinos y asegurar la uniformidad del flujo, como los *honeycombs* y mallas tipo angeo.

La consecución de un flujo uniforme en la región de prueba es de suma importancia, ya que garantiza mediciones precisas y replicables en las pruebas aerodinámicas, permitiendo un análisis detallado de los comportamientos de flujo y las características aerodinámicas de los objetos o modelos bajo examen, la figura 3 muestra el contorno de velocidad media uniforme en la sección de ensayos.

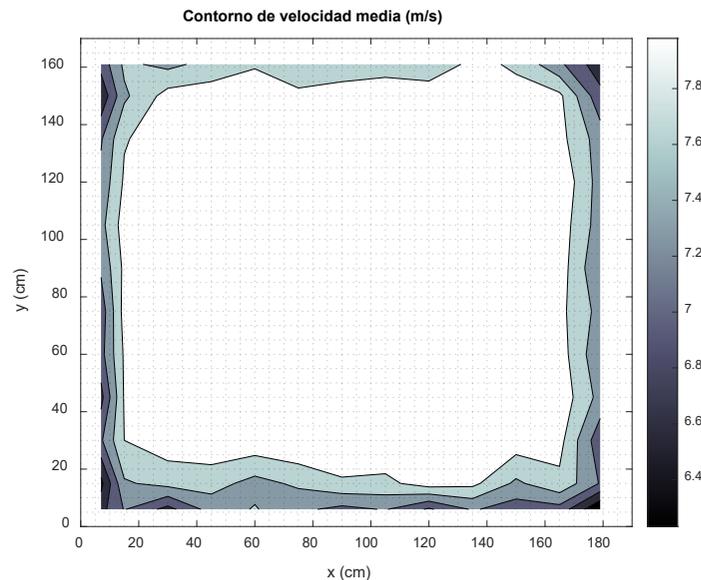


Figura 3: Contorno de velocidad media en la sección de ensayos

Para simular la CLA en el túnel de viento de la Universidad del Valle, para cualquier categoría de exposición del terreno, hay varias definiciones con pequeñas diferencias de rugosidad de la superficie del suelo para modelar la capa límite atmosférica en los estudios de ingeniería eólica, según el reglamento NSR-10 las categorías de la superficie terrestre son divididas en tres categorías de exposición: B, C y D.

Las metodologías que permiten lograr la simulación de la CLA son las propuestas de Counihan (13), Irwin (14), (3) y Gartshore (15). El procedimiento parte de obtener las dimensiones con expresiones semiempíricas en función de parámetros medios del tipo de viento que se desea generar en el túnel, esto después de establecer los parámetros geométricos en cada modelo y establecer los parámetros aerodinámicos con los cuales se realiza el dominio de evaluación y las condiciones de frontera (8). Las condiciones geométricas de los modelos numéricos se establecieron a partir de las medidas del Túnel de Viento de la Universidad del Valle. Las dimensiones de los elementos de simulación se obtienen según el espesor de la capa límite que se desea obtener y el método de simulación con el que se esté trabajando. Adicionalmente, se debe tener en cuenta el exponente para la ley potencial, que se determina en función del terreno a simular en el túnel de viento (16,17).

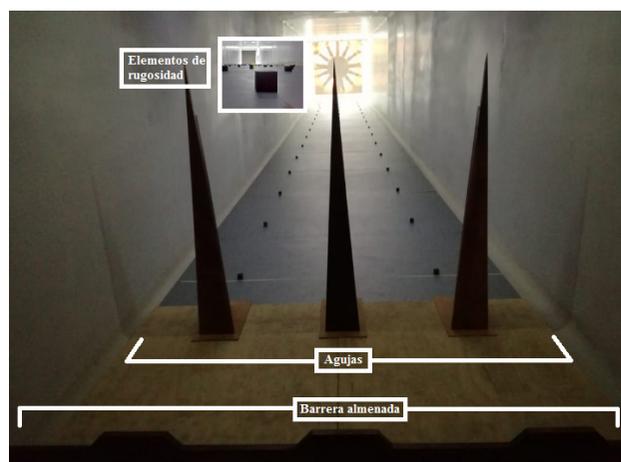


Figura 4: Distribución de los elementos de generación de la CLA dentro del Túnel de Viento de Capa Límite

En la tabla 2 se muestra un resumen de las configuraciones de los elementos de rugosidad implementados, con las cuales se pudo obtener los perfiles de velocidad deseados para las tres categorías de exposición.

Tabla 2. Dimensiones de los elementos de rugosidad para la simulación de las exposiciones B, C, D.

Terreno	Configuración de dispositivos	Patrón
B	Agujas + Barrera + cubos 4x4x4 cm (Separación = 35 cm)	Tipo "Ajedrez"
C	Agujas + Barrera + cubos 2.5 x 2.5 x 2.5 cm (Separación = 1 m)	Tipo "Línea"
D	Agujas + cubos 2.5 x 2.5 x 2.5 cm (Separación = 40 cm)	Tipo "Ajedrez"

El material de los elementos de rugosidad es madera y la geometría es cúbica, son fijados al túnel por medio de láminas de acero 430 con imanes de neodimio, distribuidas a lo largo y ancho de la sección de desarrollo de la capa límite del túnel, con un patrón tipo cuadrícula. Estos elementos u obstáculos representan la rugosidad superficial natural del terreno, los cuales minimizan la cantidad de movimiento en el flujo cercano al suelo para producir turbulencia. También se utilizó una barrera almenada de 21.5 cm de altura para generar un espesor inicial de la capa límite, seguida por 3 agujas triangulares de 1.11 m de altura y ancho en su base de 15 cm, las cuales suministran turbulencia al flujo y redistribuyen el déficit de cantidad de movimiento (4).

Para la medición y adquisición de datos se utilizó el escáner de velocidades ubicado en la sección de ensayos como se presenta en la figura 2. El escáner transporta un tubo *pitot Dwyer* 160E y un anemómetro de hilo caliente OMEGA FMA-900, figura 4. Se midieron las velocidades medias en la sección transversal central, inmediatamente anterior a la zona de ensayos del túnel de viento con el anemómetro, ubicándolo en una posición $Z_{inicial} = 6 \text{ cm}$ sobre el piso del túnel, hasta una posición $Z_{final} = 156 \text{ cm}$, con $dz = 10 \text{ cm}$. Se tomaron un total de 16 puntos en sentido z , en una posición x constante ($x = 91 \text{ cm}$). La velocidad de ensayo ($U_{ref} = 10 \text{ m/s}$) se obtuvo al configurar el ventilador a 350 rpm y ángulo de ataque de 28° . La medición de cada punto tuvo una duración de 1 minuto; se definió un tiempo de espera igual a 50 segundos para permitir que la señal fluctuante de velocidad se estabilizara y un tiempo de adquisición de 10 segundos por punto, a una frecuencia de muestreo de 100 Hz. Los resultados obtenidos del perfil de velocidad para cada categoría de exposición y su ajuste a la ley potencial se muestran en la sección de resultados. (18)



(a)



(b)



(c)

Figura 5: a) Escáner de Velocidades, b) y c) Sensores de Velocidad (Tubo de Pitot y Anemómetro de Hilo Caliente).

Resultados y Discusión

El análisis de los resultados se realizó entre los datos obtenidos en el Túnel de viento y los perfiles de viento de la NSR-10 para las tres exposiciones del código (Urbana, suburbana y rural), mencionados anteriormente. Se realizaron gráficas comparativas que permiten evaluar los resultados experimentales obtenidos.

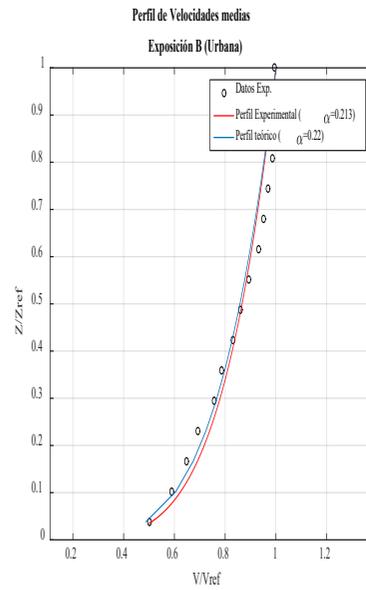


Figura 6. Ajuste del perfil de velocidades medias experimentales a la ley Potencial para la categoría de Exposición B (Tabla B.6.5-2, NSR-10)

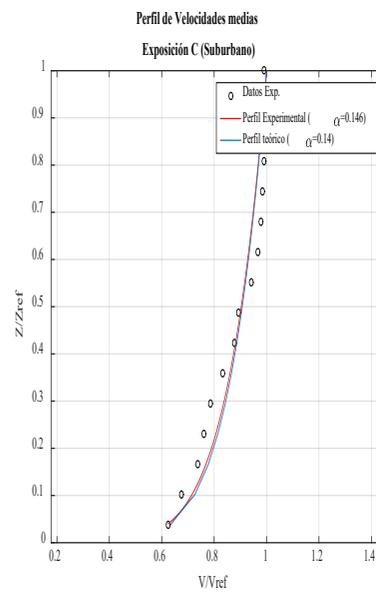


Figura 7. Ajuste del perfil de velocidades medias experimentales a la ley Potencial para la categoría de Exposición C (Tabla B.6.5-2, NSR-10)

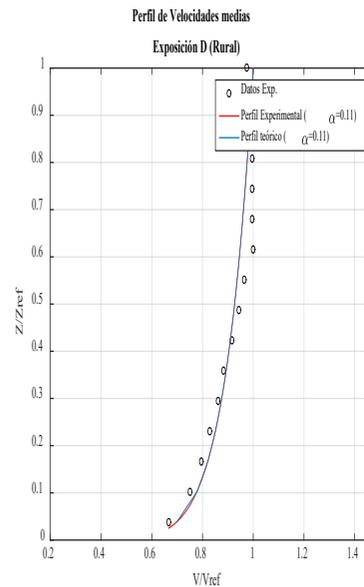


Figura 8. Ajuste del perfil de velocidades medias experimentales a la ley Potencial para la categoría de exposición D (Tabla B.6.5-2, NSR-10)

Las figuras 6-8 muestran los perfiles adimensionales de flujo de aproximación en la sección transversal anterior a la plataforma de ensayos del túnel de viento, medidos con el anemómetro de hilo caliente del escáner de velocidades. Las características del viento en la sección de prueba se describieron por el modelo de ley de potencial y de acuerdo con esto, se realizó el ajuste de los datos experimentales para la Exposición B (figura 6), Exposición C (figura 7) y Exposición D (figura 7). Se encontró que la variación de la velocidad media del viento con la altura se generó con un índice de ley de potencia ($\bar{\alpha}$) de 0.213 en la categoría Urbana, 0.146 en la categoría Suburbana y 0.11 en la categoría Rural.

Como se puede observar, la adición de cualquier elemento o dispositivo de mezcla aumentó el déficit de movimiento en la sección de desarrollo de la capa límite del Túnel de Viento. En el montaje experimental, se apreció que en la ubicación de la barrera almenada fue el dispositivo que generó el mayor crecimiento del espesor de la capa límite al llegar a la sección de ensayos, generando perfiles experimentales mucho más uniformes especialmente en la zona inferior del perfil de velocidades.

Así mismo, puede notarse que la homogeneidad transversal de los 3 perfiles es buena destacándose el perfil de la exposición B, donde se obtuvo un ajuste entre el perfil teórico y experimental cercano al 94.3%. Por su parte, la exposición C presentó un ajuste del 88.7% y la exposición D del 71.3%. Con respecto al valor del exponente ($\bar{\alpha}$), estos presentan buena correspondencia con los valores de referencia especificados en el código de diseño (8). El ajuste de la función potencial es alto en toda su altura, especialmente en la parte inferior del perfil de velocidades en los 3 tipos de exposición. Respecto al valor de los exponentes obtenidos, el que tiene mayor correspondencia con el exponente teórico es el de la Exposición D, siguiendo la Exposición B con una diferencia del 3.8 % con respecto al valor teórico, y el que menos correspondencia obtuvo es el de la Exposición C con una diferencia 4.3%.

Las configuraciones de los dispositivos de mezcla adoptados para las 3 categorías de exposición guardaron una relación directamente proporcional en sus características cualitativas en el tipo de terreno a simular. Por ejemplo, la mayor cantidad de elementos utilizados con la mayor densidad espacial en la sección de ensayos se obtuvo con la exposición B, típico de terrenos urbanos donde se presentan una gran cantidad de obstáculos como edificaciones, topografía del terreno u otro

los cuales generadores de fricción lo cual permite disminuir las velocidades por los efectos de la turbulencia. Por su parte, en la Exposición D se distingue una menor cantidad de elementos utilizados para su reproducción la cual es característica en terrenos rurales o planos, implementado una distribución más dispersa de los elementos sobre la sección de ensayos, donde la fuente de turbulencia es menor en comparación a sus predecesores.

Conclusiones

La gráfica de contorno de la figura 3, con el túnel vacío, mostró la uniformidad del flujo de viento en el centro de la sección de ensayos, lo cual corroboró el flujo laminar requerido para la simulación de la capa límite dentro del Túnel de Viento.

El desarrollo y crecimiento del perfil de velocidad de viento a lo largo del Túnel de Viento, mostró la dependencia del tamaño y configuración de los dispositivos generadores de turbulencia, específicamente de la barrera almenada. Durante los ensayos, la ubicación de la barrera tuvo crucial importancia en lograr el ajuste a los perfiles teóricos del código de diseño NSR-10.

Las pruebas realizadas en el Túnel de Viento de Capa Límite de la Universidad del Valle, simularon satisfactoriamente los perfiles de velocidad media descritos en el código de diseño, empleando diferentes dispositivos pasivos de generación de turbulencia dentro del túnel, mostrando la buena correspondencia entre los perfiles teóricos y los experimentales.

Agradecimientos

Este trabajo hace parte de un proyecto de investigación “Microzonificación eólica de la ciudad Santiago de Cali, fase i: evaluación en túnel de viento de los perfiles de velocidad”, C.I. 21130 financiado por la Universidad del Valle.

Referencias

1. Hancock PE, Hayden P. Wind-Tunnel Simulation of Weakly and Moderately Stable Atmospheric Boundary Layers. *Boundary-Layer Meteorol.* 2018;168:29–57.
2. Barlow JB, Rae WHJ, Pope A. *Low Speed Wind Tunnel Testing*. Third. John Wiley & Sons, Ltd; 1999. 724 p.
3. Shojaee SMN, Uzol O, Kurç Ö. Atmospheric boundary layer simulation in a short wind tunnel. *Int J Environ Sci Technol.* 2014;11(1):59–68.
4. Kozmar H. Truncated vortex generators for part-depth wind-tunnel simulations of the atmospheric boundary layer flow. *J Wind Eng Ind Aerodyn.* 2011;99(2–3):130–6.
5. Richards PJ, Norris SE. Appropriate boundary conditions for a pressure driven boundary layer. *J Wind Eng Ind Aerodyn.* 2015;142:43–52.
6. Avelar AC, Brasileiro FLC, Marto AG, Marciotto ER, Fisch G, Faria AF. Wind tunnel simulation of the atmospheric boundary layer for studying the wind pattern at centro de lançamento de alcântara. *J Aerosp Technol Manag.* 2012;4(4):463–73.
7. Pires LBM, Roballo ST, Fisch G, Avelar AC, da Mota Girardi R, Gielow R. Atmospheric flow measurements using the PIV and HWA techniques. *J Aerosp Technol Manag.* 2010;2(2):127–36.
8. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. Comisión Asesora Permanente para el régimen de Construcciones Sismo Resistentes (Ley 400 de 1997), editor. Bogotá; 2010.
9. Kuznetsov S, Ribičić M, Pospíšil S, Plut M, Trush A, Kozmar H. Flow and turbulence control in a boundary layer wind tunnel using passive hardware devices. *Exp Tech.* 2017;41:643–61.
10. Xie D, Xiao P, Cai N, Sang L, Dou X, Wang H. Field and Wind Tunnel Experiments of Wind Field Simulation in the Neutral Atmospheric Boundary Layer. *Atmosphere (Basel).* 2022;13(12):1–14.



11. Hlevca D, Degeratu M. Atmospheric boundary layer modeling in a short wind tunnel. *Eur J Mech B/Fluids*. 2020;79:367–75.
12. Hancock PE, Hayden P. Wind-Tunnel Simulation of Approximately Horizontally Homogeneous Stable Atmospheric Boundary Layers. *Boundary-Layer Meteorol*. 2021;180(1):5–26.
13. Counihan J. An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel. *Atmos Environ Pergamon Press*. 1969;3:197–214.
14. Irwin H. The Design of Spires for Wind Simulation. *J Wind Eng Ind Aerodyn*. 1981;7:361–6.
15. Gartshore IS, De Croos KA. Roughness Element Geometry Required for Wind Tunnel Simulations of the Atmospheric Wind. *Am Soc Mech Eng*. 1976;(76-WA/FE-18):480–5.
16. Kozmar H. Characteristics of natural wind simulations in the TUM boundary layer wind tunnel. *Theor Appl Climatol*. 2011;106(1–2):95–104.
17. Hongtao XU, Mingshui LI, Haili LIAO YH. Simulation of Atmosphere Boundary Layer by Using Wedges and Rough Elements Technique. *J Highw Transp Res Dev*. 2011;5(1):41–4.
18. Chen Z, Wei C, Chen Z, Wang S, Tang L. Numerical Simulation of Atmospheric Boundary Layer Turbulence in a Wind Tunnel Based on a Hybrid Method. *Atmosphere (Basel)*. 2022;13.