

SIMULACIÓN DE FLUJOS DE VIENTO EN LA MICROESCALA CON OPENFOAM

SIMULATION OF WIND FLOWS AT THE MICROSCALE WITH OPENFOAM

Gaspar Montiel Mela^a, Matias Ivan Ragessi^a, Matias Ezequiel Suarez^{b,c} y Andres Rodriguez^{a,b}

^a*Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias, Exactas, Físicas y Naturales - Universidad Nacional de Córdoba (FCEFyN - UNC), Argentina*

^b*Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (IDIT CONICET/UNC). FCEFyN, Córdoba, Argentina*

^c*Laboratorio de Radar y Sensores Remotos, Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación, UNC*

Palabras clave: Ingeniería de viento, microclima urbano, campos de viento, Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), Weather Research and Forecasting (WRF).

Resumen. En el análisis de flujos atmosféricos sobre zonas urbanas, el campo de velocidades del viento a la escala de las edificaciones resulta de importancia en múltiples aplicaciones. Los modelos numéricos meteorológicos son incapaces de entregar una descripción detallada de dicho campo porque consideran los procesos en la microescala por medio de parametrizaciones; sin embargo, el acoplamiento de modelos meteorológicos con simulaciones de CFD podría permitir alcanzar un mayor nivel de exactitud. En este trabajo, se llevaron a cabo múltiples simulaciones numéricas en OpenFOAM sobre un dominio urbano en las cuales las condiciones de borde se definieron a partir de los resultados del modelo WRF. Los resultados de las simulaciones fueron validados con las mediciones de velocidad y dirección del viento a 10 metros de altura tomadas por una estación meteorológica localizada dentro del dominio bajo estudio.

Keywords: Wind engineering, urban microclimate, wind fields, Computational Fluid Dynamics (CFD), Weather Research and Forecasting (WRF).

Abstract. In the analysis of atmospheric flows over urban zones, the wind field at building scale is important for several applications. The numerical meteorological models are unable to provide a detailed description of the wind field because they consider the microscale processes by means of parametrizations; however, the coupling of mesoscale meteorological models and CFD simulations could enable a higher level of accuracy to be achieved. In this study, several numerical simulations over a urban domain were carried out in OpenFOAM in which the boundary conditions were set based on the results of the WRF model. The simulation results were validated against measurements of wind speed and direction at a height of 10 meters taken by a meteorological station located inside the domain under study.

1. INTRODUCCIÓN

El incremento de la población urbana en las últimas décadas ha llevado a un aumento notable de problemas relacionados con la calidad del aire y el confort térmico en las grandes ciudades. La mayor presencia de vehículos e instalaciones industriales ha resultado en un aumento considerable de las emisiones de gases contaminantes y de los consecuentes efectos negativos sobre la salud (Taseiko et al., 2009). Por otro lado, el incremento en el número de construcciones y la mayor generación de calor antropogénico, entre otros factores, ha intensificado el efecto de las islas de calor urbanas (UHIs, por sus siglas en inglés), lo que ha llevado a un aumento de la temperatura en las ciudades y ha generado gran impacto sobre las demandas energéticas y sobre la salud y confort de los peatones y residentes (Allegrini et al., 2015). Por estas razones y por el surgimiento de normas ambientales más restrictivas, existe una necesidad creciente de descripciones más detalladas de los microclimas urbanos con propósitos de planeamiento y toma de decisiones (Allegrini et al., 2015; Taseiko et al., 2009). Para cumplir con este fin, es de suma importancia estimar, con un grado aceptable de exactitud, las características del viento sobre las ciudades, ya que este juega un rol fundamental en numerosos procesos tales como la remoción de contaminantes, los intercambios de energía y la ventilación natural (Tsichritzis y Nikolopoulou, 2019).

En la mayoría de las ciudades, los datos climáticos disponibles están limitados a unos pocos puntos de medición, por lo que las simulaciones numéricas resultan esenciales para obtener descripciones de alta resolución (Allegrini et al., 2015). El estudio de los microclimas por vías numéricas se puede realizar a diferentes niveles de complejidad. Los modelos meteorológicos, como WRF (Weather Research and Forecasting), operan en escalas múltiples que van desde la mesoescala (menor a 200 km) hasta las escalas urbanas (1-10 km), los procesos a escalas inferiores no son resueltos explícitamente, sino que se incorporan por medio de UCMs (Urban Canopy Models) (Kadaverugu et al., 2021). Este tipo de estudios presentan importantes limitaciones en la descripción de las características del viento en la microescala (<1 km), ya que este es afectado considerablemente por la morfología urbana (Huang et al., 2008). Las simulaciones numéricas de CFD (Computational Fluid Dynamics) se presentan como una alternativa prometedora al poder utilizar mallas de alta resolución y, por ende, tener en cuenta de forma explícita la presencia de obstáculos; sin embargo, el alto costo computacional que conllevan limita su aplicación a dominios de, como máximo, pocos kilómetros de extensión. En numerosos estudios, los resultados de WRF han sido utilizados para definir las condiciones de contorno y condiciones iniciales de simulaciones de CFD sobre zonas urbanas relativamente pequeñas, lo que mostró mejoras significativas en el nivel de concordancia con las mediciones en comparación con los resultados del modelo WRF (Kadaverugu et al., 2021).

En este trabajo, se simuló el campo de velocidades del viento en una región de 1 km x 1 km dentro de la ciudad de Córdoba, Argentina. El campo de movimiento en el dominio fue estimado mediante simulaciones estacionarias de CFD ejecutadas en OpenFOAM cuyas condiciones de contorno fueron definidas a partir de los resultados obtenidos de la aplicación de WRF. El estudio se llevó a cabo en un periodo de 24 horas, desde el 17 de mayo de 2025 a las 6 a.m. hasta el 18 de mayo de 2025 a las 6 a.m.; las condiciones de borde de la simulación de CFD fueron actualizadas cada 1 hora. Los resultados de magnitud y dirección de la velocidad del viento obtenidos con WRF de forma aislada y con el acoplamiento WRF + OpenFOAM fueron contrastados con las mediciones de la estación meteorológica registradas durante el período de estudio, y se realizó una comparación cuantitativa de la exactitud alcanzada por ambas vías.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Modelo WRF

El modelo WRF es un modelo de mesoscala diseñado para utilizarse en investigación como así también para la realización de pronósticos operacionales. Para realizar las simulaciones numéricas de intensidad y dirección de viento utilizadas en este trabajo, se utilizó el modelo WRF versión 4.2. Las condiciones iniciales y de contorno se obtuvieron a partir de datos provistos por el Global Forecast System (GFS) con una resolución horizontal de $0,25^\circ$. Se configuraron dos dominios anidados, el dominio externo (d01) y el dominio de alta resolución (d02). El dominio d01 se configuró con una resolución horizontal de 4 km y una grilla de 113×113 puntos, mientras que el dominio d02 con una resolución horizontal de 1 km y 73×73 puntos. Ambos dominios poseen 35 niveles verticales.

En cuanto a las parametrizaciones físicas, se adoptó el esquema Thompson ([Thompson et al., 2008](#)) para la microfísica, el esquema RRTM para la radiación de onda larga y Goddard para la radiación de onda corta. La capa límite planetaria se representó con el esquema de Mellor–Yamada–Janjic (MYJ) ([Janjić, 1994](#)) en conjunto con el esquema de superficie Unified Noah Land ([Tewari, 2004](#)) y la capa superficial con el esquema Eta Similarity ([Monin y Obukhov, 1954](#)). Desde el punto de vista dinámico, las simulaciones se realizaron en modo no hidrostático.

2.2. Modelo de CFD

El estudio del campo de viento mediante análisis de CFD se restringió a la región de 1 km x 1 km correspondiente a la celda de la grilla d02 de WRF en la que se encontraba localizada la estación meteorológica cuyos datos se utilizaron posteriormente para la validación de resultados. En esta región, comprendida entre las coordenadas $64,19^\circ$ y $64,20^\circ$ O, y $31,44^\circ$ y $31,45^\circ$ S, los obstáculos fueron modelados de forma explícita. Los contornos de los árboles y de las construcciones fueron detectados a partir de imágenes satelitales mediante QGIS en conjunto con su complemento Mapflow (ver Fig. 1), luego, estos fueron extruidos desde el suelo para generar el modelo tridimensional. Las alturas de las construcciones se estimaron de acuerdo con su número de pisos a partir de observaciones en Google Street View. A los árboles se les asignó una altura de 11,6 m, que resultó ser la altura promedio de los árboles en la zona estudiada de acuerdo con la información adicional provista por Mapflow. En numerosos trabajos de características similares al presente (por ejemplo [Kadaverugu et al. \(2021\)](#)) la detección de las construcciones y, especialmente, la de los árboles se ha llevado a cabo con una considerable intervención por parte del usuario. La utilización de QGIS+Mapflow para este fin no solamente permite reducir notablemente el tiempo requerido, sino que también constituye un procedimiento sistemático que requiere de una menor intervención del calculista.

El dominio de simulación (ver Fig. 2) fue construido de acuerdo a las recomendaciones de [Franke et al. \(2011\)](#). La zona modelada fue ubicada en el centro y las fronteras laterales se alejaron a una distancia de 15 veces la altura de la construcción más alta (H) para permitir el desarrollo del flujo y evitar problemas numéricos (especialmente en las secciones de salida). La frontera superior fue posicionada a una altura igual a 6 veces la altura de la construcción más alta para representar adecuadamente las condiciones de la atmósfera sin perturbar. Para la ejecución de las simulaciones, se aplicó el solver *porousSimpleFoam*, implementado en OpenFOAM, que permite el tratamiento de problemas de flujo incompresible, turbulento y estacionario en presencia de medios porosos. La turbulencia fue considerada mediante el enfoque RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) en conjunto con el modelo de cierre $k - \epsilon$ en su versión estándar.



Figura 1: Imagen satelital del área modelada (izquierda), contornos de construcciones (centro) y contornos de árboles (derecha). La ubicación de la estación meteorológica se encuentra indicada con un punto rojo en la imagen satelital.

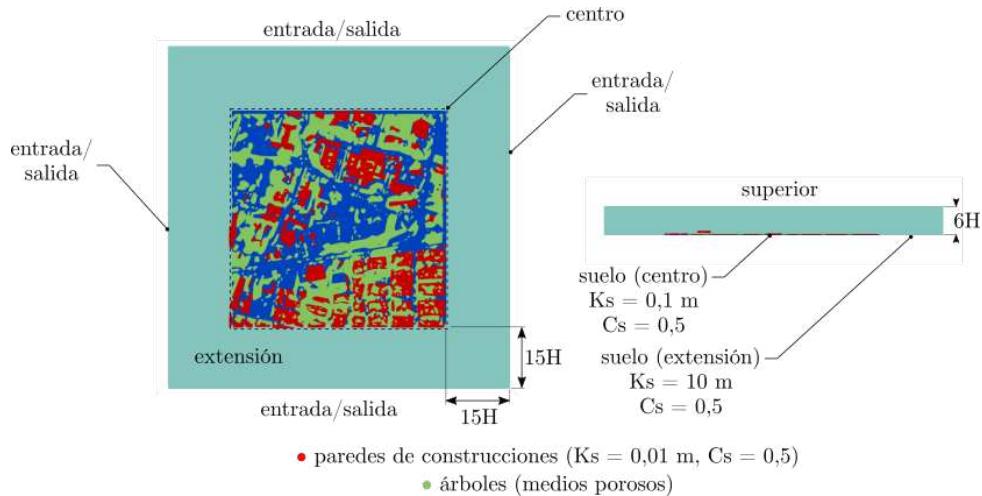


Figura 2: Dimensiones generales y fronteras del dominio de simulación. Vista en planta (izquierda) y vista lateral (derecha).

Para el tratamiento de las condiciones de contorno, se definieron ocho fronteras diferentes: el suelo de la zona construida, las paredes de las construcciones, el suelo de la extensión del dominio, la frontera superior y las cuatro fronteras laterales (ver Fig. 2). Los tipos de condiciones de borde asignados a cada frontera en la sintaxis de OpenFOAM se resumen en la Tabla 1¹. La condición de entrada o salida de las fronteras laterales fue determinada para cada simulación a partir de la dirección del viento en las celdas vecinas de la grilla de WRF.

En las entradas se aplicaron las condiciones de borde de tipo *atmBoundaryLayerInletVelocity*, *atmBoundaryLayerInletEpsilon* y *atmBoundaryLayerInletK* que proveen perfiles logarítmicos generalizados bajo las hipótesis de capa límite atmosférica homogénea, bidimensional, sin humedad, en equilibrio y neutral (Richards y Hoxey, 1993). Para configurar estas condiciones de borde se consideró una longitud de rugosidad aerodinámica de 0,5 m, correspondiente a terreno suburbano o de categoría EC3 de acuerdo con la norma holandesa NEN8100 para molestias y riesgos causados por viento en entornos construidos. En las salidas, se asumió al flujo como completamente desarrollado y se aplicó la condición de gradiente nulo tanto para la velocidad como para las variables turbulentas. La presión fue fijada en la frontera superior del dominio, correspondiente a la atmósfera.

El tratamiento del flujo en la cercanía de las paredes (suelo de la zona construida, suelo de la extensión del dominio y paredes de construcciones) se llevó a cabo mediante la utilización

¹Por propósitos de brevedad, el suelo de la zona construida, el suelo de la extensión del dominio y las paredes de las construcciones han sido englobados en la Tabla 1 bajo el nombre de *paredes*.

de funciones de pared para las variables turbulentas. Las rugosidades del suelo y de las paredes de las edificaciones fueron consideradas en el modelo mediante la función de pared aplicada a la viscosidad cinemática turbulenta. Los valores de altura de rugosidad de grano de arena equivalente K_s utilizados² (ver Fig. 2) fueron estimados a partir de los datos provistos por Hansen (1993).

Frontera	entrada	salida	superior	paredes
p	zeroGradient	zeroGradient	fixedValue	zeroGradient
\mathbf{U}	atmBoundaryLayer InletVelocity	zeroGradient	zeroGradient	noSlip
k	atmBoundaryLayer InletK	zeroGradient	zeroGradient	kqRWallFunction
ϵ	atmBoundaryLayer InletEpsilon	zeroGradient	zeroGradient	epsilonWallFunction
ν_t	calculated	calculated	calculated	nutRoughWallFunction

Tabla 1: Tipos de condiciones de borde aplicadas en la sintaxis de OpenFOAM (Greenshields, 2025).

Los árboles fueron tratados como medios porosos del mismo modo que lo han hecho otros autores en trabajos similares (Kadaverugu et al., 2021). Para este fin, se utilizó el modelo de Darcy-Forchheimer, el cual considera la caída de presión que sufre el flujo al circular a través de medios porosos mediante un término fuente en las ecuaciones de cantidad de movimiento que consta de una contribución viscosa dada por la ley de Darcy y de una contribución inercial dada por la ley de Forchheimer. La configuración de este modelo en el software de simulación requiere de la especificación de los coeficientes de la ley Darcy y los de la ley de Forchheimer para cada dirección espacial. Dos simplificaciones fueron consideradas en este aspecto. Por un lado, la porosidad fue supuesta isótropa, por lo cual, se utilizaron los mismos coeficientes para las tres direcciones espaciales. Por otro lado, el flujo fue asumido completamente turbulento y, por lo tanto, la contribución viscosa dada por la ley de Darcy se consideró despreciable (Ha, 2018). El coeficiente del término de Forchheimer fue estimado por medio del modelo presentado en Wilson et al. (1982), que permite calcularlo a partir de características propias de los árboles.

$$f = \frac{2C_d LAI}{h} \quad (1)$$

donde C_d es el coeficiente de resistencia del árbol, LAI es su índice de área foliar y h es su altura.

A todos los árboles se les asignó el mismo coeficiente de Forchheimer; por lo tanto, la determinación de los parámetros que intervienen en la Ec. (1) se realizó considerando características promediadas o ponderadas del conjunto de todos los árboles del dominio. En múltiples trabajos (por ejemplo Fu et al. (2024)), el coeficiente de resistencia C_d de los árboles ha sido asumido como constante; sin embargo, se sabe que este puede sufrir variaciones considerables con la velocidad del viento debido a la aerodinamización que experimentan los árboles al interactuar con el flujo. Una ley de tipo potencial puede ser utilizada para describir aproximadamente el comportamiento de este coeficiente. En este trabajo, el C_d fue calculado para cada simulación con la velocidad estimada por WRF en la celda estudiada por medio de la Ec. (2) (Reijs, 2024).

$$C_d = 2,55 |\mathbf{U}|^{-0,9} \quad (2)$$

²La altura de rugosidad de 10 m aplicada al suelo de la extensión del dominio es consistente con la longitud de rugosidad aerodinámica adoptada para la definición del perfil de la capa límite atmosférica en las entradas, lo cual resulta fundamental para que este no sufra cambios sustanciales antes de alcanzar la zona construida.

El índice de área foliar LAI se define como la relación entre el área unilateral de las hojas de un árbol y el área de suelo ocupada por este; este parámetro depende fundamentalmente de la especie y de la estación del año (Dong et al., 2025), y suele ser estimado a partir de valores genéricos reportados en la bibliografía (Rahimi et al., 2025). En este trabajo, con el objetivo de considerar las características de la vegetación regional, el índice de área foliar fue estimado a partir de la base de datos global de Myneni et al. (2015). El valor obtenido de esta fuente fue posteriormente corregido³ por medio de la Ec. (3).

$$LAI = \frac{LAI_g}{TC_g} \quad (3)$$

donde LAI_g es el índice de área foliar satelital de la región estudiada tomado de Myneni et al. (2015) y TC_g es la cobertura arbórea reportada en Hansen et al. (2013) asociada a la celda de la grilla satelital a la cual corresponde el valor de LAI_g .

El mallado se generó mediante la utilidad *snappyHexMesh* de OpenFOAM. La malla fue refinada hacia la zona construida para capturar correctamente la geometría de las construcciones y árboles, alcanzando un tamaño mínimo de celdas de alrededor de 1 m. En cualquier caso se verificó que la altura de la primera celda sobre las paredes fuese de, como mínimo, el doble de la altura de rugosidad de grano de arena equivalente aplicada a cada superficie.

Se llevó a cabo un estudio de convergencia de malla en el cual se evaluaron tres resoluciones de malla diferentes. Para realizar este análisis se consideraron las condiciones correspondientes al 17/05/2025 a las 18:00 y se tomaron como variables de control a las variables de interés del presente estudio, es decir, la magnitud $|U|$ y dirección de la velocidad del viento U_α correspondientes a la ubicación de la estación meteorológica a 10 m de altura. Los resultados obtenidos con cada malla se muestran en la Tabla 2. Las bandas de error de truncamiento de las variables de interés correspondientes a la malla más fina fueron calculadas por medio de la metodología propuesta por Roache (1994)⁴, resultando en un 5 % para la magnitud de la velocidad del viento y en un 1 % para la dirección de la velocidad del viento. Los resultados reportados para todas las condiciones analizadas fueron obtenidos con la malla fina. Las simulaciones se detuvieron a las 10000 iteraciones; a partir de este punto, las variables de interés no mostraron cambios sustanciales y los residuales se estabilizaron alrededor de 1×10^{-4} para el campo de presiones y alrededor de 1×10^{-6} para el resto de variables.

malla	número de celdas	$ U $ m/s	$ \epsilon_{ U }(\%) $	U_α deg	$ \epsilon_{U_\alpha}(\%) $
gruesa	9380896	3,71	-	-39,58	-
intermedia	12232041	3,79	2,20	-39,38	0,50
fina	19514421	3,73	1,57	-39,52	0,37

Tabla 2: Resultados intermedios obtenidos en el análisis de convergencia de malla.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Fig. 3 se muestra el campo de velocidades obtenido para las condiciones a las cuales se llevó a cabo el análisis de convergencia de malla, 17/05/2025 a las 18:00. Los obstáculos ejercen

³Los valores entregados por Myneni et al. (2015) no son calculados de acuerdo a la definición convencional de LAI sino como la relación entre el área unilateral de las hojas de todos los árboles de una celda y el área de dicha celda (Dong et al., 2025), la corrección es necesaria para referir el LAI al área ocupada por árboles únicamente.

⁴Roache (1994) propone expresar el error de truncamiento de los resultados por medio del, así llamado, índice de convergencia de grilla (GCI, por sus siglas en inglés), el cual es una medida de la diferencia porcentual entre el valor computado y aquel que se obtendría con una malla de infinito número de celdas. Este último es estimado por extrapolación de Richardson a partir de los resultados obtenidos con dos o, idealmente, tres mallas distintas.

una influencia considerable en el campo de movimiento. El flujo sufre una reducción sustancial de su velocidad en regiones con vegetación y en las estelas de las construcciones; en el caso de las edificaciones más altas, puede observarse incluso la aparición de zonas de estancamiento. En regiones no obstaculizadas, el flujo se acelera y alcanza velocidades significativamente más altas que en las inmediaciones.

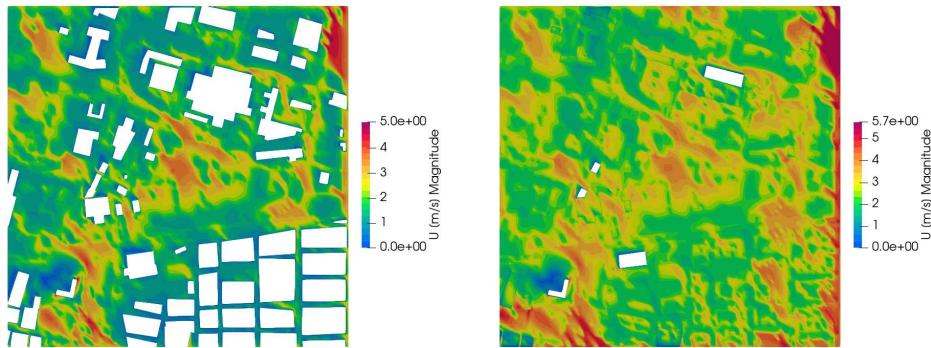


Figura 3: Campo de velocidades para las condiciones correspondientes al 17/05/2025 a las 18:00 a 5 m de altura (izquierda) y a 10 m de altura (derecha).

En la Fig. 4 se muestran las mediciones de la velocidad del viento y las predicciones correspondientes obtenidas mediante WRF de forma aislada y mediante el acoplamiento WRF+OF en la ubicación de la estación meteorológica a 10 m de altura. Se observa que WRF presenta una clara tendencia a sobreestimar la magnitud de la velocidad del viento y que el acoplamiento con OpenFOAM permite lograr un mejor seguimiento de las mediciones, particularmente cuando las velocidades son mayores. De forma aislada, WRF presenta un error medio cuadrático de 3,03 m/s, mientras que el acoplamiento WRF+OF muestra uno de 1,83 m/s, lo que implica una mejora de alrededor del 40 %. Por otro lado, el sesgo medio normalizado calculado para los resultados de WRF es de 0,738 m/s, mientras que el correspondiente al acoplamiento WRF+OF es de -0,005 m/s; esto se condice con la tendencia a sobreestimar de WRF e indica una ligera tendencia a subestimar por parte del acoplamiento.

Al analizar los resultados individuales para cada condición simulada, se observa que el acoplamiento WRF+OF permite reducir la discrepancia con las mediciones cuando WRF sobreestima la velocidad del viento. La mejora obtenida con el acoplamiento es sustancial cuando las velocidades del viento son altas; sin embargo, a menores velocidades, como aquellas en el intervalo entre las 15:00 y 21:00 del 17 de mayo, el acoplamiento sigue mostrando sobreestimaciones considerables. Por otro lado, no se observan mejoras en aquellos casos en los que WRF subestima la velocidad del viento; por el contrario, la discrepancia de WRF+OF respecto a las mediciones en estos casos es mayor que la resultante de aplicar WRF individualmente.

En la Fig. 5 se muestran las mediciones de la dirección del viento y las estimaciones obtenidas por medio de WRF y de WRF+OF en la ubicación de la estación meteorológica a 10 m de altura. A diferencia de lo que ocurría con la magnitud de la velocidad, no se observan discrepancias sustanciales entre las predicciones de WRF de forma aislada y las obtenidas al acoplarlo con OpenFOAM. El error medio cuadrático calculado para los resultados de WRF es de 44,08 grados, mientras que el del acoplamiento es de 44,03 grados, lo que resulta en una diferencia de sólo el 0,1 %. El sesgo medio normalizado también muestra diferencias mínimas, siendo de -0,23 grados en el caso de WRF y de -0,25 grados para el acoplamiento WRF+OF. Las escasas diferencias observadas en los resultados podrían deberse a que el punto de medición se encuentra en una región relativamente alejada de obstáculos de altura considerable que

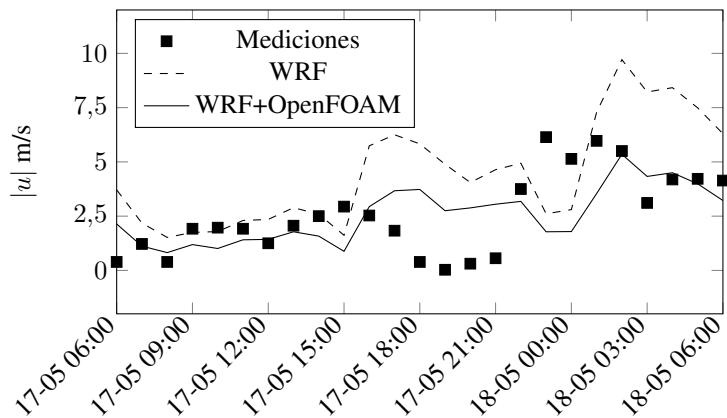


Figura 4: Mediciones y estimaciones de la magnitud de la velocidad del viento a 10 m de altura en la ubicación de la estación meteorológica.

podrían generar cambios sustanciales en la dirección del viento local.

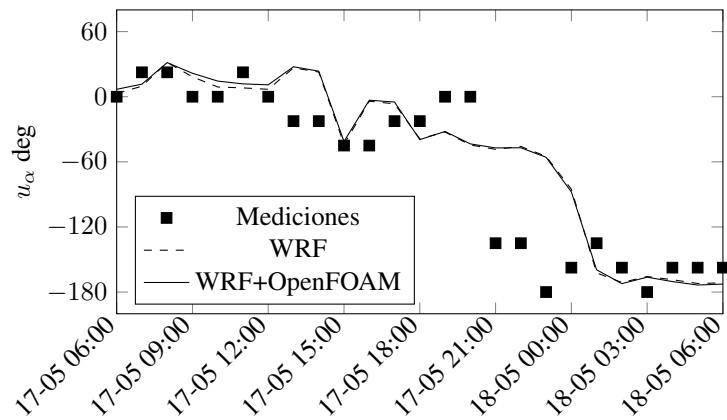


Figura 5: Mediciones y estimaciones de la dirección de la velocidad del viento a 10 m de altura en la ubicación de la estación meteorológica.

4. CONCLUSIONES

Se simuló por medio de CFD el campo de vientos en una región de 1 km x 1 km de la ciudad de Córdoba, Argentina, a lo largo de un periodo de 24 horas, desde el 17 de mayo de 2025 a las 6 a.m. hasta el 18 de mayo de 2025 a las 6 a.m. En esta región, los obstáculos (construcciones y árboles) fueron detectados sistemáticamente por medio del software QGIS en conjunto con su complemento Mapflow y modelados geométricamente como figuras planas extruidas. Los árboles fueron tratados como medios porosos mediante el modelo de Darcy-Forchheimer. En la parametrización del modelo de porosidad se consideraron las características generales de la vegetación regional en la zona estudiada y, parcialmente, la influencia de la velocidad del viento sobre el comportamiento aerodinámico de los árboles. Las condiciones de borde de las simulaciones estacionarias de CFD fueron determinadas a partir de los resultados de WRF y actualizadas en intervalos de 1 hora.

Los obstáculos (árboles y construcciones) demostraron tener una influencia significativa sobre las características del campo de movimiento en la microescala. Se observó una importante reducción de la velocidad del viento en las inmediaciones de las construcciones y en las zonas arboladas, y un aumento sustancial de esta en regiones no obstaculizadas. Los resultados para la magnitud y dirección de la velocidad del viento en la ubicación de la estación meteorológica

a 10 m de altura entregados por WRF de forma aislada y aquellos obtenidos mediante el acoplamiento WRF+OF fueron comparados con las mediciones correspondientes realizadas por la estación meteorológica. WRF aplicado de forma aislada mostró una clara tendencia a sobreestimar la magnitud de la velocidad del viento; el acoplamiento WRF+OF permitió obtener una mejora considerable tanto en exactitud como en sesgo, reduciendo el error medio cuadrático en alrededor de un 40 % y la magnitud del sesgo medio normalizado en dos órdenes de magnitud. En aquellos casos en los que WRF sobreestimó la velocidad del viento, el acoplamiento permitió mejorar considerablemente la exactitud de las estimaciones (especialmente cuando las velocidades del viento fueron altas); sin embargo, cuando WRF tendió a subestimarla, se observó un aumento del error respecto a las mediciones. No se observaron diferencias notorias entre ambos enfoques en lo que respecta a la dirección de la velocidad del viento, lo cual podría deberse a la ausencia de obstáculos de altura considerable en las cercanías del punto de medición.

El estudio realizado se limitó a un lapso de 24 horas en el que las velocidades del viento fueron relativamente altas; sería de utilidad extender este plazo para realizar una comparación estadísticamente más rigurosa entre los resultados obtenidos mediante ambos enfoques. Las mejoras moderadas obtenidas a bajas velocidades del viento y la incapacidad del modelo para mejorar la exactitud de las estimaciones en aquellas condiciones en las que WRF subestima la velocidad del viento parecerían indicar que se requieren modificaciones en el modelo, especialmente en la parametrización de la porosidad. Por otro lado, dado que la principal diferencia entre el análisis mediante WRF y a través del acoplamiento WRF+OF reside en la modelización explícita de obstáculos, sería de interés contrastar las estimaciones con mediciones tomadas en puntos donde la influencia de los obstáculos sea mayor, como en las inmediaciones de edificios de media o gran altura, o en zonas densamente arboladas. Finalmente, sería relevante evaluar modelizaciones geométricamente más detalladas para las construcciones y, especialmente, para los árboles. En este trabajo, se le asignó la misma altura a todos los árboles del dominio; sin embargo, esto dista considerablemente de la realidad y podría dar lugar a diferencias locales sustanciales entre el campo de movimiento simulado y el observado.

REFERENCIAS

- Allegrini J., Dorer V., y Carmeliet J. Influence of morphologies on the microclimate in urban neighbourhoods. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 144:108–117, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.03.024>.
- Dong W., Yuan H., Lin W., Liu Z., Xiang J., Wei Z., Li L., Li Q., y Dai Y. A global urban tree leaf area index dataset for urban climate modeling. *Scientific Data*, 12(1):426, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-04729-y>.
- Franke J., Hellsten A., Schlunzen H.K., y Carissimo B. The cost 732 best practice guideline for cfd simulation of flows in the urban environment: a summary. *International Journal of Environment and Pollution*, 44(1-4):419–427, 2011. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2011.038443>.
- Fu R., Paden I., y García-Sánchez C. Should we care about the level of detail in trees when running urban microscale simulations? *Sustainable Cities and Society*, 101:105143, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105143>.
- Greenshields C. *OpenFOAM v13 User Guide*. The OpenFOAM Foundation, London, UK, 2025.
- Ha T. *Development of 3D CFD models and observation system design for wind environment assessment over a clear-cut in mountainous region*. Tesis de Doctorado, Seoul National University, 2018.

- Hansen F.V. *Surface roughness lengths*. US Army Research Laboratory, 1993.
- Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., et al. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *science*, 342(6160):850–853, 2013. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>.
- Huang H., Ooka R., Chen H., Kato S., Takahashi T., y Watanabe T. Cfd analysis on traffic-induced air pollutant dispersion under non-isothermal condition in a complex urban area in winter. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 96(10-11):1774–1788, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.02.010>.
- Janjić Z.I. The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Monthly weather review*, 122(5):927–945, 1994. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2).
- Kadaverugu R., Purohit V., Matli C., y Biniwale R. Improving accuracy in simulation of urban wind flows by dynamic downscaling wrf with openfoam. *Urban Climate*, 38:100912, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100912>.
- Monin A.S. y Obukhov A.M. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci. USSR*, 151(163):e187, 1954.
- Myneni R., Knyazikhin Y., y Park T. MOD15A2H MODIS/Terra Leaf Area Index/FPAR 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center (Consultado: 12 de mayo de 2025). 2015. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD15A2H.006>.
- Rahimi S., Alvarez M., Berardi U., y Kastner P. Coupled urban physics in microclimate modeling: Validating and enhancing simulation tools. *Available at SSRN* 5251486, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113637>.
- Reijs V. Simulating a tree. Disponible en: <https://www.archaeocosmology.org/eng/Boomsim.htm> (Consultado: 29 de agosto de 2025). 2024.
- Richards P. y Hoxey R. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k- turbulence model. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 46:145–153, 1993. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(93\)90124-7](https://doi.org/10.1016/0167-6105(93)90124-7).
- Roache P.J. Perspective: A method for uniform reporting of grid refinement studies. *Journal of Fluids Engineering*, 116(3):405–413, 1994. ISSN 0098-2202. <https://doi.org/10.1115/1.2910291>.
- Taseiko O.V., Mikhailuta S.V., Pitt A., Lezhenin A.A., y Zakharov Y.V. Air pollution dispersion within urban street canyons. *Atmospheric Environment*, 43(2):245–252, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.076>.
- Tewari M. Implementation and verification of the unified noah land surface model in the wrf model. 2004.
- Thompson G., Field P.R., Rasmussen R.M., y Hall W.D. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. part ii: Implementation of a new snow parameterization. *Monthly weather review*, 136(12):5095–5115, 2008. <https://doi.org/10.1175/2008MWR2387.1>.
- Tsichritzis L. y Nikolopoulou M. The effect of building height and façade area ratio on pedestrian wind comfort of london. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 191:63–75, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.05.021>.
- Wilson J., Ward D., Thurtell G., y Kidd G. Statistics of atmospheric turbulence within and above a corn canopy. *Boundary-Layer Meteorology*, 24(4):495–519, 1982. <https://doi.org/10.1007/BF00120736>.