



Caracterización del viento local en la morfología del centro histórico de Quito (Ecuador)

Andrés Bustamante Campoverde¹

Recibido: 12 de marzo del 2022 / Enviado a evaluar: 28 de marzo del 2022 / Aceptado: 9 de diciembre del 2022

Resumen. El viento local incide en el microclima urbano, en donde los edificios causan que el viento pierda intensidad al llegar a calles y plazas, afectando la ventilación y el confort peatonal. El presente estudio tiene por objeto evaluar el comportamiento del viento peatonal empleando morfometría, mecánica de fluidos computacional (CFD) e indicadores de ventilación para un área del centro histórico de Quito en un radio de 400 m. El modelo presenta cañones urbanos con orientaciones respecto al norte de 40° y 125°. Los cañones se modelan en base a su geometría para definir el ratio H/W. Posteriormente, se realizan simulaciones considerando el viento prevalente de la zona durante los periodos de día (6:00-12:00) y tarde (12:00-18:00). Las simulaciones muestran una velocidad de viento peatonal entre 0,8 y 1,2 m/s, que ocasiona una reducción térmica de 2°C. Además, los indicadores de ventilación muestran un mejor comportamiento para los cañones menos profundos.

Palabras clave: CFD; morfología; cañón urbano; temperatura aparente; ventilación; Quito.

[en] Characterization of the local wind in the morphology of the historic center of Quito (Ecuador)

Abstract. The local wind affects the urban microclimate, where buildings cause the wind to lose intensity when it reaches streets and squares, affecting ventilation and pedestrian comfort. The present study aims to evaluate the pedestrian wind behavior using morphometry, computational fluid dynamics (CFD) and ventilation indicators for an area of the historic center of Quito within a 400 m radius. The model shows urban canyons with northward orientations of 40° and 125°. Urban canyons are modeled based on their geometry to define the H/W ratio. Subsequently, simulations are carried out considering the prevailing wind in the area during the day (6:00-12:00) and afternoon (12:00-18:00) periods. The simulations show a pedestrian wind speed between 0,8 and 1,2 m/s, which results in a thermal reduction of 2°C. In addition, ventilation indicators show better performance in shallower canyons.

Keywords: CFD; morphology; urban canyon; apparent temperature; ventilation; Quito.

¹ Agencia Metropolitana de Control (AMC), Quito DMQ (Ecuador).
E-mail: andgobusta@hotmail.com

[fr] Caractérisation du vent local dans la morphologie du centre historique de Quito (Equateur)

Résumé. Le vent local affecte le microclimat urbain, les bâtiments faisant perdre de l'intensité au vent lorsqu'il atteint les rues et les places, ce qui affecte la ventilation et le confort des piétons. La présente étude vise à évaluer le comportement éolien des piétons à l'aide de la morphométrie, de la mécanique des fluides numérique (CFD) et d'indicateurs de ventilation pour une zone du centre historique de Quito dans un rayon de 400 mètres. Le modèle montre des canyons urbains avec des orientations nord de 40° et 125°. Les canyons sont modélisés sur la base de leur géométrie pour définir le rapport H/W. Ensuite, des simulations sont effectuées en tenant compte du vent dominant dans la zone pendant les périodes de la journée (6h00-12h00) et de l'après-midi (12h00-18h00). Les simulations montrent une vitesse du vent pour les piétons comprise entre 0,8 et 1,2 m/s, ce qui se traduit par une réduction thermique de 2°C. En outre, les indicateurs de ventilation montrent une meilleure performance dans les canyons moins profonds.

Mots-clés: CFD; morphologie; canyon urbain; température apparente; ventilation; Quito.

Cómo citar. Bustamante Campoverde, A. (2022): Caracterización del viento local en la morfología del centro histórico de Quito (Ecuador). *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 42(2), 339-361.

Sumario. 1. Introducción. 2. Métodos. 2.1. Área de estudio: ubicación y clima. 2.2. Características geométricas y aerodinámicas del caso de estudio. 2.3. Modelo de simulación CFD y dominio. 2.4. Cálculo de variación térmica y ventilación. 3. Resultados y discusión. 3.1. Morfometría, simulaciones CFD y análisis térmico. 3.2. Ventilación. 4. Conclusiones. 5. Referencias bibliográficas.

1. Introducción

Las investigaciones de clima urbano se han desarrollado ampliamente en las últimas décadas (Arnfield, 2003; Roth, 2007) y entre los aspectos analizados se incluyen los impactos asociados al cambio climático, islas de calor y a la contaminación atmosférica (Harlan y Ruddell, 2011; Hidalgo et al., 2008; Jiang et al., 2017). Estos fenómenos, han tenido relevancia en ciudades del hemisferio norte, pero también se han convertido en un asunto emergente para las ciudades del sur global (Carmin et al., 2012), que además pueden tener una caracterización especial para los fenómenos térmicos de ciudades andinas (Bustamante, 2018).

Por otra parte, independientemente de la situación geográfica de las ciudades, el análisis del clima produce una percepción subjetiva desde variables como: la temperatura, humedad relativa, radiación solar y viento (Lau et al., 2019). La última variable es importante para el estudio de la compacidad urbana (Giridharan y Emmanuel, 2018), que a través de su morfología puede afectar al clima urbano (Ho et al., 2015; Wei et al., 2016). Las áreas urbanas, al ser una de los paisajes más rugosos, hacen que sus propiedades aerodinámicas sean responsables de modificar atributos como el plano de desplazamiento cero (z_d) y la longitud de rugosidad (z_o), los cuales son útiles para generar mapas de ventilación (Suder & Szymanowski, 2014). Además, el estudio del viento puede contribuir como guía para evaluar el diseño y el rol de la ventilación natural (Turkbeyler et al., 2012).

Para estudiar la ventilación se considera el efecto del viento local que afecta el límite urbano inferior, modificado por las obstrucciones de edificios (Ricci et al., 2017), los que dependiendo de su orientación y situación, y según la intensidad y la dirección del viento que los afecta, pueden generar o mitigar el calor urbano (Rajagopalan et al., 2014). De esta forma, el análisis del viento, básicamente se ha basado en técnicas como los túneles de viento y simulaciones CFD (mecánica de fluidos computacional) que buscan simplificar el análisis de uno o varios grupos de edificios (Blocken y Stathopoulos, 2013). La primera técnica está limitada por su costo, mientras que la segunda técnica se ha desarrollado ampliamente para el uso de simulaciones de viento urbano.

Hay varias aproximaciones en CFD, pero las más dominantes son la de grandes elementos de simulación (LES) y simulaciones de promedio Reynolds Navier Stokes (RANS). Indudablemente LES tiene el potencial de proveer resultados más exactos y confiables, pero su costo y complejidad son mayores en comparación a las RANS (Blocken, 2018). Al final ambas aproximaciones se aplican en modelos de turbulencia que constituyen una herramienta útil para evaluar el viento a escala peatonal (Adamek et al., 2017; Janssen et al., 2013). A continuación, se puede mencionar algunos trabajos sobre ventilación en medios urbanos.

Se han evaluado esquemas de diseño urbano para mejorar la intensidad del viento mediante un proceso de predicción que sigue guías prácticas y garantías de estándares para túneles de viento, y simulación CFD (Du y Mak, 2018). También, los escenarios de simulación pueden ser construidos para una zona nueva de desarrollo empleando indicadores morfológicos relacionados al viento y temperatura del aire, que analizados en el programa ENVI-met muestran una relación no lineal del impacto de dichos indicadores sobre el viento (Ku y Tsai, 2020).

Otro estudio optimiza la ventilación usando CFD en configuraciones de edificios, en un escenario de 500 x 500 m en Tokio, cuyos resultados muestran que el escenario optimizado mejora la ventilación un 16% sobre otras configuraciones (Lim y Ooka, 2021). En este sentido, los estudios con CFD pueden abarcar escalas de simulación muy amplias de hasta 1500 x 2500 m, en donde los resultados señalan que la temperatura del aire se puede mitigar al reducir el área de construcción en los terrenos disponibles (Ashie y Kono, 2011).

Por otro lado, la ventilación se analiza en el límite del cañón urbano para condiciones atmosféricas neutras como el tipo de piso y fachada, pero con diferentes formas urbanas, como alturas de edificios y direcciones de viento, y con el empleo del indicador de tasa de cambio por hora (ACH), cuya capacidad de ventilación para una forma urbana cuadrada es mejor en vientos paralelos a la calle, en comparación a la forma urbana rectangular (Lin et al., 2014). Además, la ventilación natural se puede estudiar en relación a valores de ratios H/W entre 0,5 y 3 y el indicador ACH mediante simulaciones numéricas, con resultados de mejor ventilación natural en calles menos profundas (Yang et al., 2019).

También, se analiza el efecto del viento sobre la temperatura aparente de cañones urbanos del centro histórico de Cuenca, usando información climática y simulaciones de viento de cañones urbanos en varias direcciones mediante el programa Flow

Design (Bustamante, 2021). Tal estudio, muestra que el viento influye en la reducción de la temperatura aparente, no solo por la velocidad del mismo, sino también por su dirección que varía por hora y por la morfología descrita en el ratio H/W. Asimismo, en una dimensión más detallada, las simulaciones CFD permiten evaluar el vórtice de vertimiento de dos edificios situados en tándem, cuya relación entre el espaciado del edificio y el ancho del edificio, de valor 2 puede ser la distancia óptima entre los obstáculos para una mejor ventilación natural, que al final incide en un menor consumo energético al interior del edificio (Zhong et al., 2019).

Además, los estudios de CFD pueden complementarse con el uso de sistemas de información georreferenciada (GIS). Así, se puede determinar las coordenadas geográficas y dimensiones geométricas de los edificios y simular la dispersión de contaminantes en diferentes direcciones e intensidades de viento (Chu et al., 2005). De forma similar, se puede integrar y simplificar la información meteorológica y morfológica 3D en GIS con información detallada de la distribución de la permeabilidad urbana para mejorar la ventilación natural exterior (Yuan et al., 2014).

Finalmente, lo mencionado con anterioridad demuestra que la simulación CFD es una herramienta potente, versátil y confiable para ser empleada en la investigación del viento urbano asociado a variables como la morfología, el microclima y ventilación a escala peatonal. El objetivo del estudio es caracterizar el viento local en un contexto específico. Para este propósito, se recrean cañones urbanos que mediante su análisis morfológico resumen las condiciones aerodinámicas del sitio (ventilación). Después, la información es complementada con simulaciones CFD para periodos de día y tarde considerando la variación térmica y la ventilación peatonal.

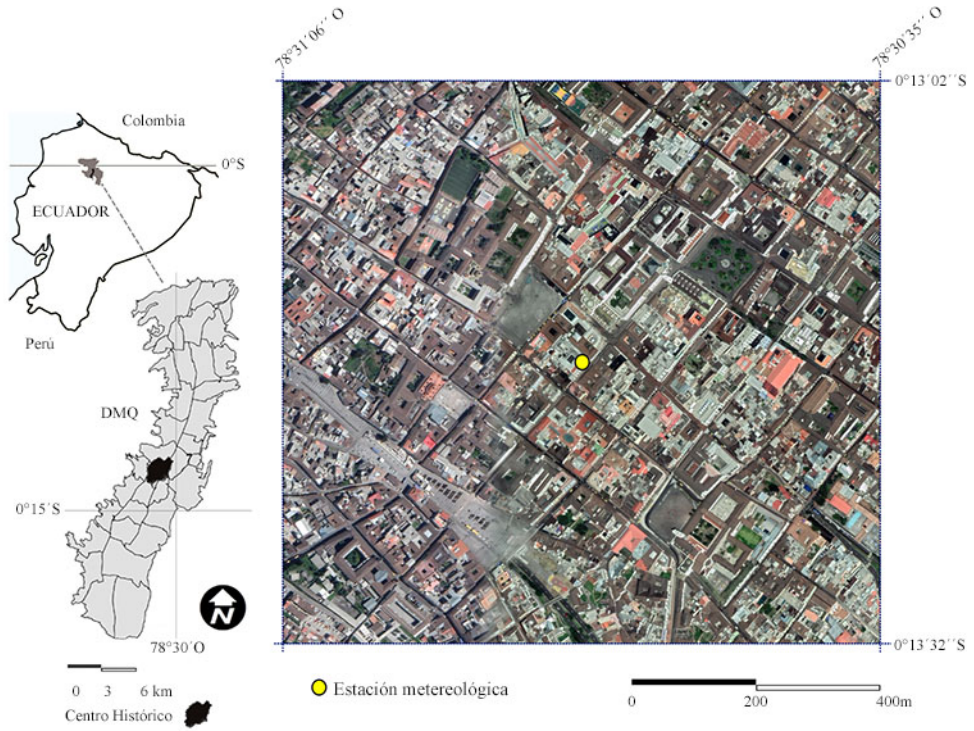
2. Métodos

2.1. Área de estudio: ubicación y clima

El distrito metropolitano de Quito (DMQ) es el conglomerado más importante de Ecuador y está situado en el sistema montañoso andino al norte del país (Figura 1). El estudio se enfoca en la morfología del centro histórico de Quito, para lo cual emplea información climática de la estación ubicada en las coordenadas 78°30'50'' oeste, 0°13'17'' sur, y con una altitud de 2820 m.s.n.m (Figura 1). Por otra parte, el clima de Quito de acuerdo a la clasificación climática de Koppen-Geiger, es de tipo Cfb, que corresponde a una ciudad de latitud media, temperada y caliente (Kottek et al., 2006).

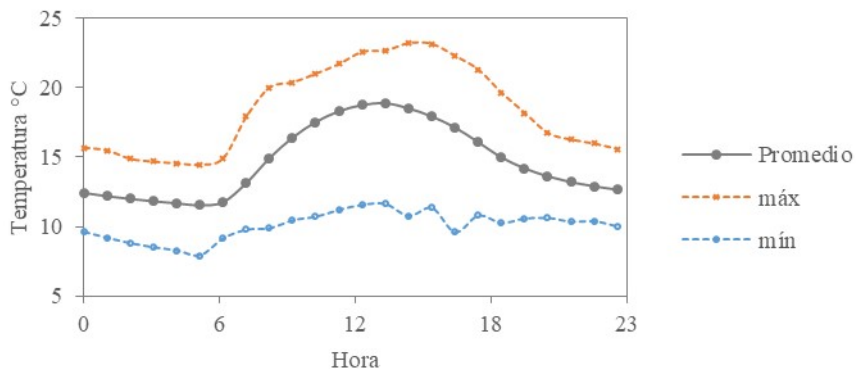
La información climática uso registros de los años 2018 a 2021 (Secretaría de Ambiente DMQ, 2020). En general el clima de Quito, presenta temperaturas inferiores a los 10 °C (previo al amanecer), mientras que las temperaturas máximas pueden superar los 20 °C (próximo al medio día), de forma que se puede obtener una oscilación térmica diaria de 10 °C (Figura 2).

Figura 1. Ubicación de Ecuador y del DMQ, y delimitación del área de estudio en el centro histórico de Quito.



Fuente: Elaboración propia, e, Imagen de *Google Earth*.

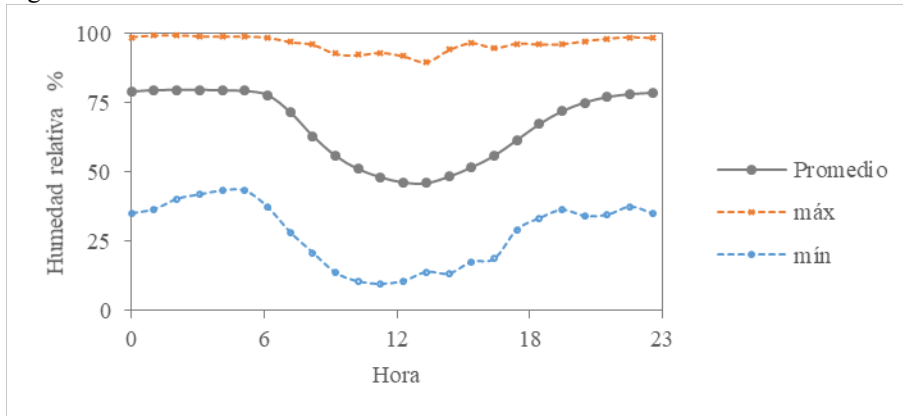
Figura 2. Temperatura.



Fuente: Elaboración propia, a partir de los datos de la estación meteorológica de la zona.

Por otro lado, la humedad relativa máxima coincide en horas antes del amanecer (80%), mientras que, la humedad relativa mínima está cerca del mediodía (50%) (Figura 3).

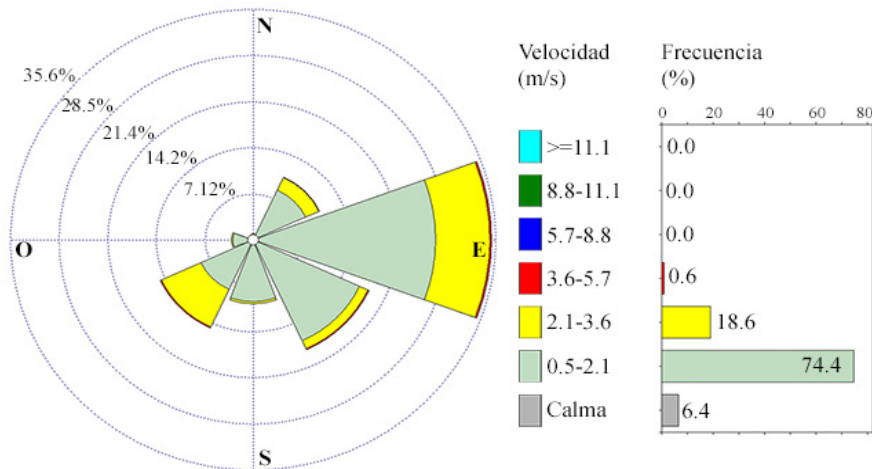
Figura 3. Humedad relativa.



Fuente: Elaboración propia, a partir de los datos de la estación meteorológica de la zona.

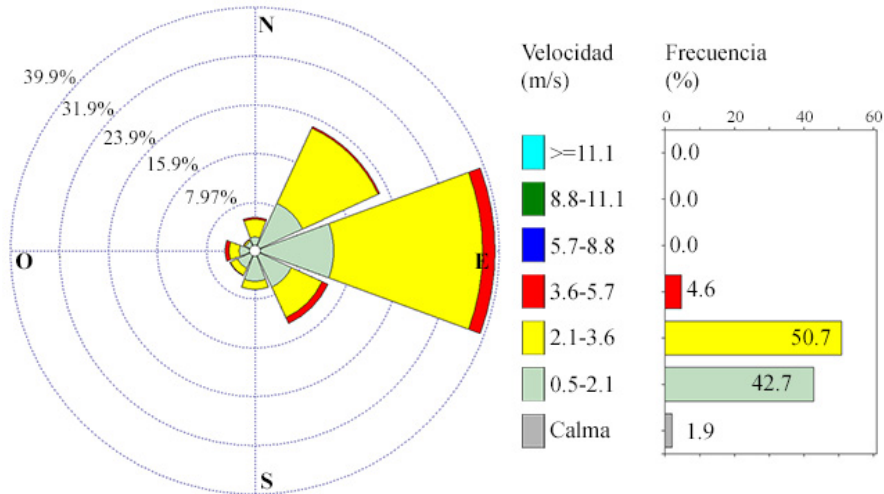
De la descripción previa de temperatura y humedad, fue posible dividir el estudio en dos periodos: día (6:00-12:00) y tarde (12:00-18:00), los mismos que coinciden en horas de actividad a escala peatonal.

Figura 4. Clases, velocidad y frecuencia de viento en el periodo día (6:00-12:00).



Fuente: Elaboración propia, a partir de los datos de la estación meteorológica de la zona.

Figura 5. Clases, velocidad y frecuencia de viento en el periodo tarde (12:00-18:00).



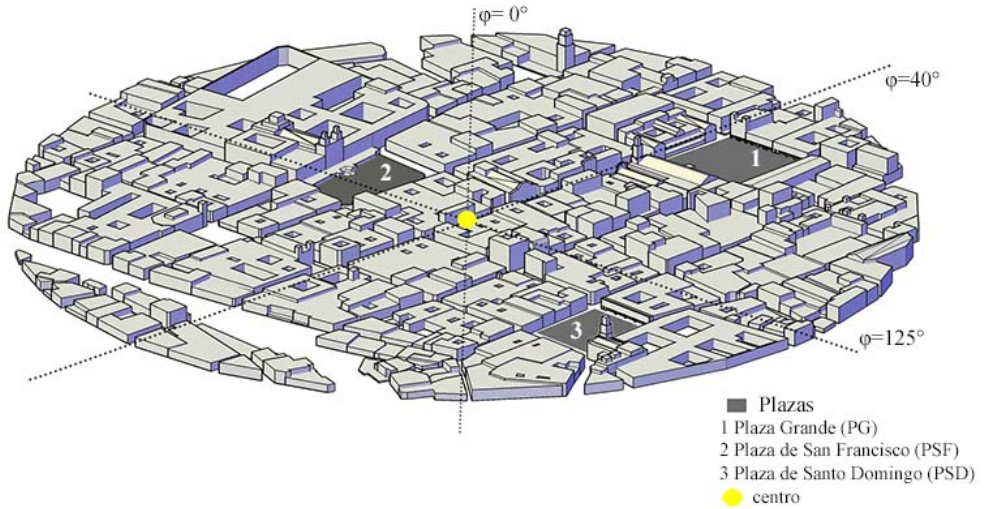
Fuente: Elaboración propia, a partir de los datos de la estación meteorológica de la zona.

El viento representativo durante el día, corresponde a la clase de 0,5 a 2,1 m/s con una velocidad promedio de 1,40 m/s y con una frecuencia del 74,4% (Figura 4), mientras que, en la tarde, la clase de viento de 2,1 a 3,6 m/s da una velocidad promedio de 2,14 m/s y con una frecuencia del 50,7% (Figura 5). Además, en los dos periodos la mayor frecuencia de vientos viene de la dirección este.

2.2. Características geométricas y aerodinámicas del caso de estudio

Respecto al área delimitada para el estudio se considera un modelo radial de 400 m (City of London Corporation, 2019) con centro en la estación mencionada anteriormente (Figura 6). El mapeo del área de estudio uso información predial (Secretaría de Territorio Habitat y Vivienda, 2020) e información de la herramienta de Google Street View. El modelado de los cañones urbanos se realizó en AutoCAD con las medidas del mapeo y otras mediciones in situ. El principal tipo de edificios varia de 2 a 3 pisos y las calles se orientan en dos direcciones principales ($\varphi=40^\circ$ y 125°) (Figura 6).

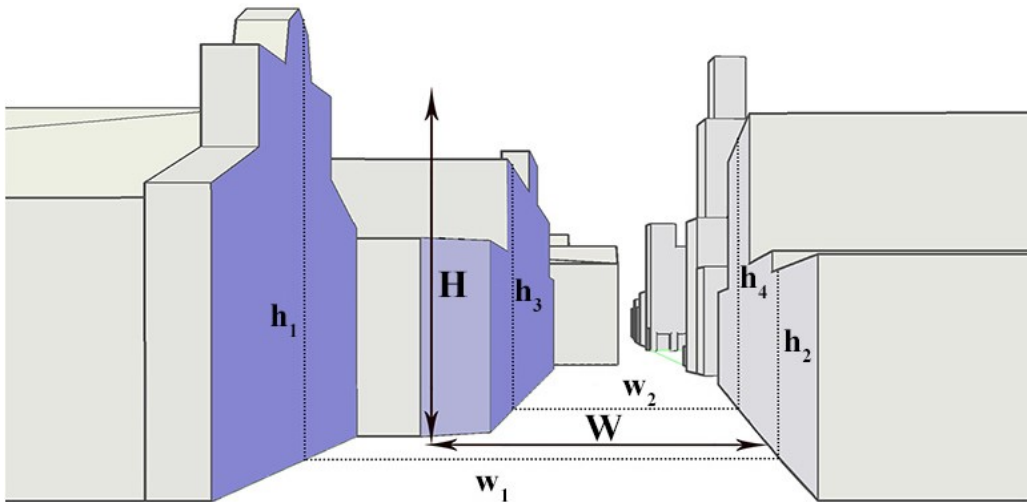
Figura 6. Caso de estudio en un radio de 400m.



Fuente: Elaboración propia.

Además, sobresalen tres plazas principales: las plazas de San Francisco (PSF), Santo Domingo (PSD), y la plaza Grande (PG) con vegetación.

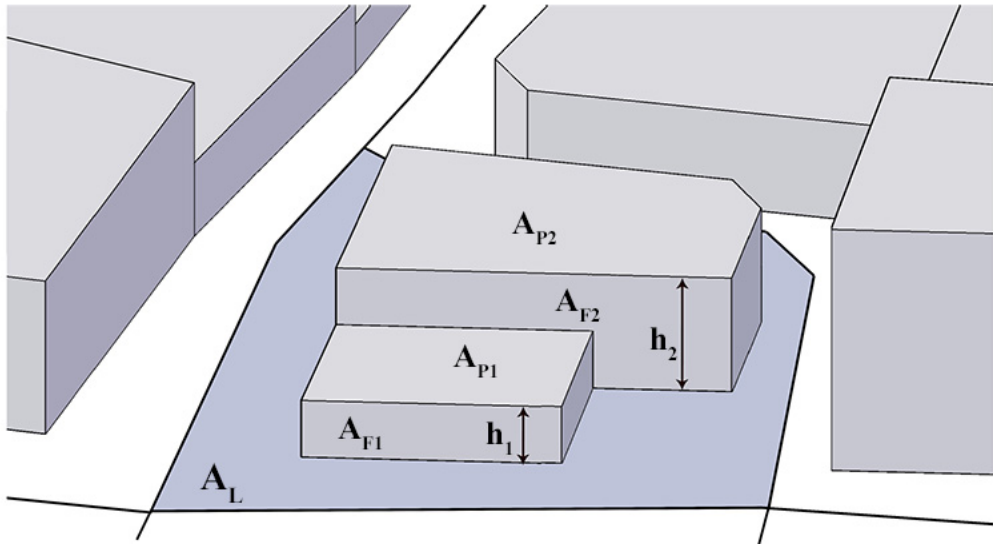
Figura 7. Valores de H/W.



Fuente: Elaboración propia.

El estudio mostró diferentes morfologías contenidas en cada bloque (grupo de edificios) los cuales, a la vez definen el ratio H/W que considera el valor promedio de las alturas y anchos de los cañones urbanos (Figura 7).

Figura 8. Variables para cálculo de rugosidad.



Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, la morfología permite determinar la rugosidad aerodinámica que muestra un valor del rol del viento, para ello se empleó el método morfo métrico (Suder & Szymanowski, 2014), cuyas variables se describen a continuación (Figura 8). Un factor de peso se determina para cada grupo de edificios, y estos muestran la relación del área en planta (A_p) ocupada por cada edificio por su altura respecto al área de todo el grupo. Como resultado, la altura promedio del bloque entero (H) muestra la contribución de las alturas individuales de los edificios (h), y de acuerdo al número de elementos (i) dadas por:

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n A_{p_i} x h_i}{\sum_{i=1}^n A_{p_i}} \quad (1)$$

Para calcular la longitud de rugosidad y la altura del plano de desplazamiento cero para los grupos de edificios, se usó la expresión:

$$z_o = (H - z_d) \exp\left(-\frac{k}{\sqrt{0.5 \alpha C_D H \lambda_F}}\right) \quad (2)$$

Donde H es la altura promedio de los edificios, z_d es el plano de desplazamiento cero, k es la constante de von Karman (0.4), CDH es el coeficiente de arrastre para elementos aislados (0.8) y λ_F es la relación de área frontal calculada por:

$$\lambda_F = \frac{\sum_{i=1}^n A_{Fi}}{A_L} \quad (3)$$

Donde A_F es el área frontal y A_L es el área del lote.

El área de las fachadas se considera como obstrucciones, que se oponen al paso del viento. Además, el cálculo de la rugosidad para grupos irregulares de edificios emplea:

$$z_d = H \times (\lambda_P)^{0.6} \quad (4)$$

Donde λ_P es la relación del área plana, que a la vez se calcula por:

$$\lambda_P = \frac{\sum_{i=1}^n A_{Pi}}{A_L} \quad (5)$$

2.3. Modelo de simulación CFD y dominio

En la presente investigación se usó el software SimScale, que se basa en el modelo de turbulencia k-omega ($k-\omega$) de la familia RANS de Navier-Stokes, y que uso un número de Reynolds para flujo bajo. Este modelo aparte de las ecuaciones de conservación, resuelve dos ecuaciones de transporte que son la energía de turbulencia cinética (k), que determina la energía en la turbulencia, y la tasa específica de disipación de turbulencia (ω), que determina la tasa de disipación por unidad de turbulencia cinética. Finalmente, se emplea una variación del modelo k- ω , el k-omega SST (transporte de esfuerzo de corte).

La expresión matemática de este modelo se describe a continuación (SimScale, 2020).

La energía turbulenta es dada por:

$$k = \frac{3}{2} (UI)^2 \quad (6)$$

Donde U es el flujo medio de la velocidad e I es la intensidad de turbulencia.

La intensidad de turbulencia da el nivel de turbulencia y se define como:

$$I = \left(\frac{u'}{U} \right) \quad (7)$$

Donde u' es la raíz cuadrada media de las fluctuaciones de la velocidad de turbulencia, dada por:

$$u' = \sqrt{\frac{1}{3}(u'_x{}^2 + u'_y{}^2 + u'_z{}^2)} = \sqrt{\frac{2}{3}}k \quad (8)$$

La velocidad media U puede ser calculada como sigue:

$$U = \sqrt{U_x{}^2 + U_y{}^2 + U_z{}^2} \quad (9)$$

La tasa de disipación específica de turbulencia se calcula mediante:

$$\omega = C_\mu \frac{\epsilon}{k} \quad (10)$$

Donde C_μ es el modelo de turbulencia constante el cual usualmente toma valores de 0.09, k es la energía de turbulencia, l es la escala de longitud de turbulencia.

La escala de longitud de turbulencia describe el tamaño del largo de la energía contenida en los remolinos de un flujo turbulento.

La viscosidad turbulenta ν_t se calcula:

$$\nu_t = \frac{k}{\omega} \quad (11)$$

Por otra parte, para determinar el dominio se consideraron los siguientes aspectos (Antoniou et al., 2017; Zhong et al., 2020; Zhong et al., 2019). Primero, el dominio se define a partir de las dimensiones B y H (Figura 9). Las medidas referenciales corresponden al lado B de 800 m y la altura H del elemento más alto del área de estudio 40 m (torre de iglesia). Segundo, las condiciones de los límites de las superficies se definen a partir de la interacción con el viento: el viento que entra en una superficie inicial (entrada); la superficie superior que establece los flujos y componentes normales de las variables a cero (simetría); la base y las superficies laterales con velocidad cero en las paredes (sin deslizamiento); y finalmente, se establece una superficie para la presión exterior (salida de presión) (Figura 9).

Para el viento entrante, se usó la siguiente expresión (Richards y Hoxey, 1993):

$$U = \frac{U^*}{k} \ln \left(\frac{z+z_0}{z_0} \right) \quad (12)$$

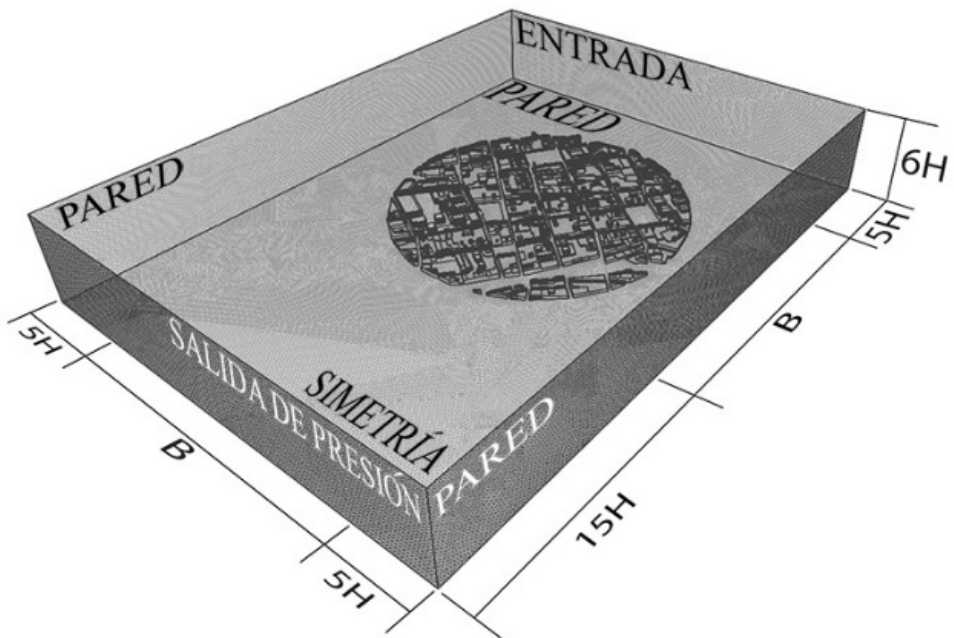
Donde U es la velocidad del viento a una altura z sobre el nivel del suelo, k es la constante de von Karman (0,4), U^* es la velocidad de fricción, \ln es la función de logaritmo natural, y z_0 es la longitud de rugosidad de la superficie.

La velocidad de fricción es usualmente calculada de una velocidad específica U_h a una altura de referencia h :

$$U^* = \frac{kU_h}{\ln\left(\frac{h+z_0}{z_0}\right)} \quad (13)$$

Además, la malla generada para el dominio se basa en un algoritmo estándar, que es común para simulaciones de fluidos y sólidos en simulaciones mecánicas. La malla generada obtiene 6 400 000 elementos y 2 900 000 nudos, que dan una alta finura.

Figura 9. Dominio computacional con las principales dimensiones.



Fuente: Elaboración propia.

El tiempo de simulación para cada caso fue de 1000 segundos y, además se empleó una inicialización del flujo potencial con algoritmo de descomposición Scotch. Finalmente, los modelos para SimScale deben cargarse en formato de objeto 3D (.stl).

2.4. Cálculo de variación térmica y ventilación

La oficina australiana de meteorología mide la temperatura de confort exterior usando la ecuación de la temperatura aparente (TA) (Steadman, 1994), cuya definición fue diseñada como un índice de confort para representar de forma precisa la respuesta humana al cambio de temperaturas (Jacobs et al., 2013).

TA se define como:

$$TA = T + 0.33\rho - 0.7v - 4 \quad (14)$$

Donde T es la temperatura del aire en °C, ρ es el vapor de agua (hPa) y v es la velocidad de viento a 10 m de altitud (m/s). El valor de ρ se calcula de la siguiente manera:

$$\rho = \left(\frac{RH}{100}\right) * 6.105 * \exp^{\frac{17.27 * T}{237.7 + T}} \quad (15)$$

Donde RH es la humedad relativa (%).

Al final se usa la expresión de temperatura resultante (Tr):

$$Tr = T - TA \quad (16)$$

Esta última resume de forma directa el gradiente térmico, al comparar la temperatura del aire en comparación a la temperatura aparente que incluye el efecto del viento. El valor de Tr a la vez se calcula mediante las imágenes de viento simuladas del programa SimScale para que se puedan procesar en el programa QGIS. Primero, se utiliza la herramienta de calculadora raster, para transformar los valores de pixel en valores de velocidad de viento, que a la vez permiten calcular el valor de TA. La segunda herramienta usada fue píxeles raster a puntos para analizar los valores contenidos en cada punto del raster. Y la tercera herramienta usada fue la estadística zonal, que permite analizar la zona de interés.

Respecto a la ventilación, se usó el flujo volumétrico Q (m³/s), el cual está definido como el producto del flujo de velocidad v (m/s) y el área transversal atravesada A (m²). Este valor se obtiene por la integración de la velocidad por la velocidad por el área limitada a una altura peatonal (1.5m):

$$Q = \int_0^H v dA \quad (17)$$

Por otro lado, la ventilación natural es evaluada basada en la tasa de intercambio de aire ACH (1/h) (van Hooff y Blocken, 2010), cuya cantidad de aire entre en un cuarto o cañón urbano durante cierto periodo de tiempo, y se divide para el volumen interior del mismo cuarto o cañón urbano V (m³), y se calcula como:

$$ACH = \frac{Q \times 3600}{V} \quad (18)$$

La renovación de aire en un cañón urbano depende de las dimensiones de la altura en fachada, el ancho y el largo de la calle. La última dimensión es la más importante ya que en la presente morfología alcanza dimensiones entre 60 m a 150 m. Por esta razón, se considera la tasa de ventilación adimensional Q' para hacer una comparación de acuerdo al potencial de cada cañón urbano (Zhong et al., 2020). Q' es definida por:

$$Q' = \frac{Q}{U_{ref} A_{ref}} \quad (19)$$

Donde U_{ref} es la velocidad de referencia, A_{ref} es el área de apertura efectiva, que es H por W .

3. Resultados y discusión

3.1. Morfometría, simulaciones CFD y análisis térmico

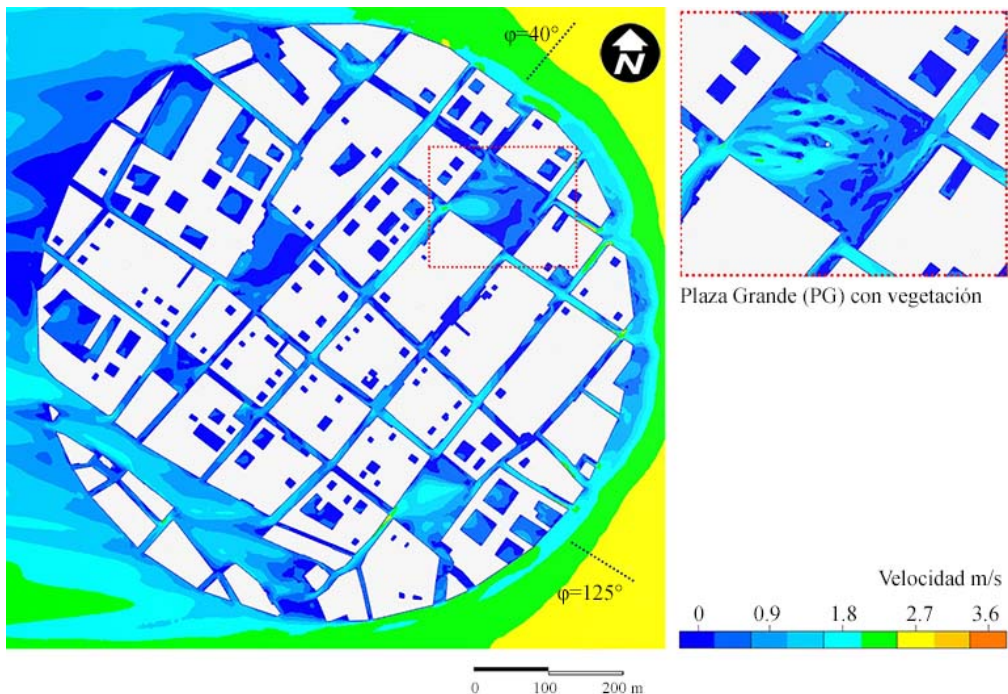
Esta parte comienza con los resultados de la morfometría, ya que permitió calcular el valor de z_0 para el área de estudio. El menor porcentaje (14%) corresponden a valores $z_0 > 0,5$ m que se asocian a cañones urbanos con ratios $H/W > 1$. Por otro lado, el resto del área (86%) presenta valores $z_0 < 0,5$ m, que básicamente constituyen cañones urbanos con ratios $H/W < 1$ y en algunos casos son ratios $H/W < 0.5$. Finalmente, el promedio general de valores z_0 para el área de estudio es de 0.4 m. Este último valor fue útil para calcular las velocidades de fricción, y que a la vez permitieron calcular las velocidades de simulación para el periodo de (6:00-12:00) y (12:00-18:00) con valores de 2,7 y 4,2 m/s, respectivamente.

A continuación, se explican los resultados obtenidos en las simulaciones. De forma general, se observa una reducción de viento debido a las obstrucciones por morfología, y, por la altura de análisis a una sección peatonal (1,5 m) que varía según el perfil logarítmico del viento. Por otro lado, la evaluación en los periodos de 6:00-12:00 y 12:00-18:00 obtienen promedios de velocidades interiores entre 0,8 m/s y 1,2 m/s respectivamente (Figuras 10 y 11). Los resultados muestran que el principal comportamiento del viento retiene mayores velocidades cuando atraviesa cañones de menor de ratio H/W . Es decir, para la relación H/W , W es más importante, ya que este canaliza el viento, mientras que H restringe con obstrucciones verticales que no limitan en la parte superior. En adición, la propagación del viento se distribuye de sentido este a oeste, y es similar en ambos periodos de simulación, aunque en el periodo de tarde (12:00-18:00) se mantiene la mayor velocidad de viento. Finalmente, el viento simulado no presenta un patrón uniforme de intensidad en los cañones urbanos, tanto en la dirección opuesta al viento ($\varphi=40^\circ$) así como en la dirección alineada al viento ($\varphi=125^\circ$) (Figuras 10 y 11).

Por otro lado, en los espacios abiertos de plazas, al tener ratios $H/W < 0,2$, y canalizar el viento de este a oeste con más velocidad hacia las calles más estrechas, este puede disipar más energía que se traduce en un incremento de velocidad (Figuras 10 y 11). Este último comportamiento puede constituir un efecto especial a diferencia del resto del estudio, ya que la tendencia muestra que calles estrechas con edificios altos adquieren más intensidad de viento al interior.

Continuando con el resultado de plazas, el caso de la Plaza Grande (PG) merece un análisis puntual debido a la presencia de su vegetación. Para este propósito se realizan simulaciones en ambos periodos día y tarde, y para escenarios con y sin vegetación. Al final las simulaciones de viento de los escenarios de vegetación y sin vegetación, difieren en $0,3 \text{ m/s}$. Esto quiere decir que, si bien esta plaza presenta vegetación, no es lo suficientemente importante para modificar el comportamiento del viento. Además, se puede destacar que la configuración de la plaza presenta arcadas, que en alguna medida incrementan la sección de circulación de viento y que puede incrementar la velocidad de viento (Du y Mak, 2018).

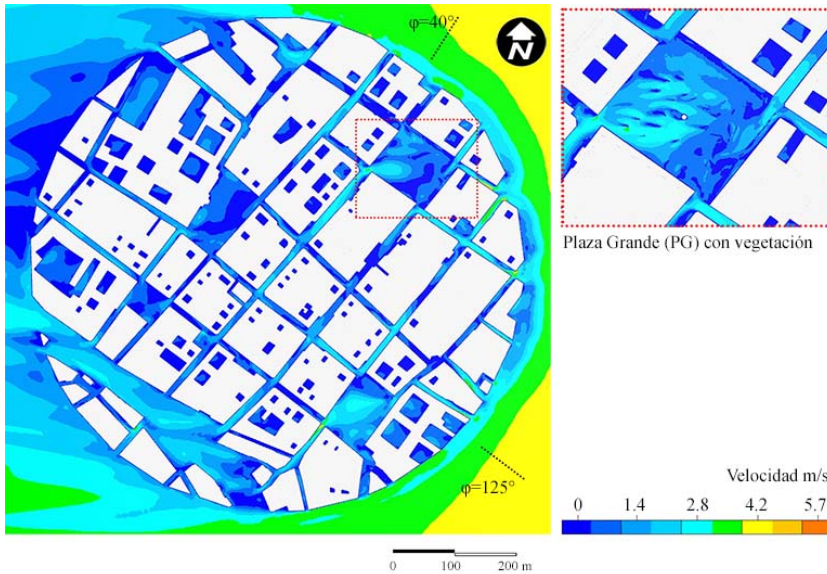
Figura 10. Viento simulado en el periodo día (6:00-12:00) con plano de corte de 1,5 m.



* A la izquierda caso de estudio sin vegetación. A la derecha Plaza Grande (PG) con vegetación.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 11. Viento simulado en el periodo tarde (12:00-18:00) con plano de corte de 1,5 m.



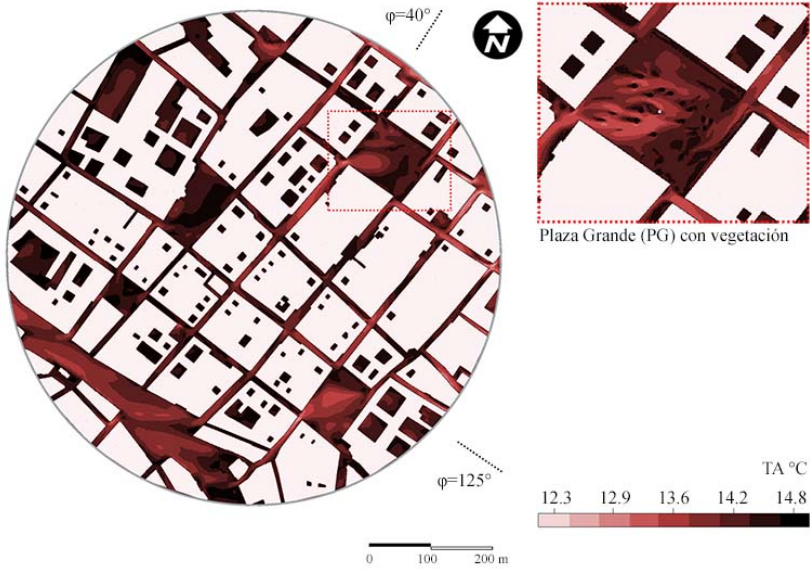
* A la izquierda caso de estudio sin vegetación. A la derecha Plaza Grande (PG) con vegetación.

Fuente: Elaboración propia.

Los valores del viento simulado permiten identificar la variación térmica en los cañones urbanos, mediante el empleo de TA. Para el periodo de 6:00-12:00 (Figura 12) una TA promedio de 14,3 °C se alcanza cuando T es 15,3 °C, mientras que para el periodo de 12:00-18:00 (Figura 13) la TA promedio es de 16,6 °C cuando T es 17,9 °C. Esto indica que para ambos periodos, la temperatura se reduce entre 1 y 1,3 °C. Este comportamiento de reducción térmica se explica por el incremento en la velocidad del viento y la variación en el porcentaje de humedad relativa en ambos periodos de análisis.

Los valores del viento simulado al interior de los cañones de Quito limitan los 2 m/s, es decir están por debajo de los límites de velocidad de viento para confort peatonal en actividades como tomar asiento (2,7 m/s) y caminar (3,8 m/s) (Adamek et al., 2017). De esta forma, en el área de estudio se pueden realizar las actividades mencionadas para un confort de bueno a moderado (Janssen et al., 2013). Por otra parte, se pueden citar valores de confort térmicos de espacio exterior para la zona de estudio que va de los 18,3 a 23,9 °C (Guillen, 2014). De lo anterior, deriva que en el periodo de día, la TA es menor con una sensación de frío mayor y dista más de los valores de confort, mientras que en la tarde se tiene una TA más alta, que se aproxima a los rangos de confort.

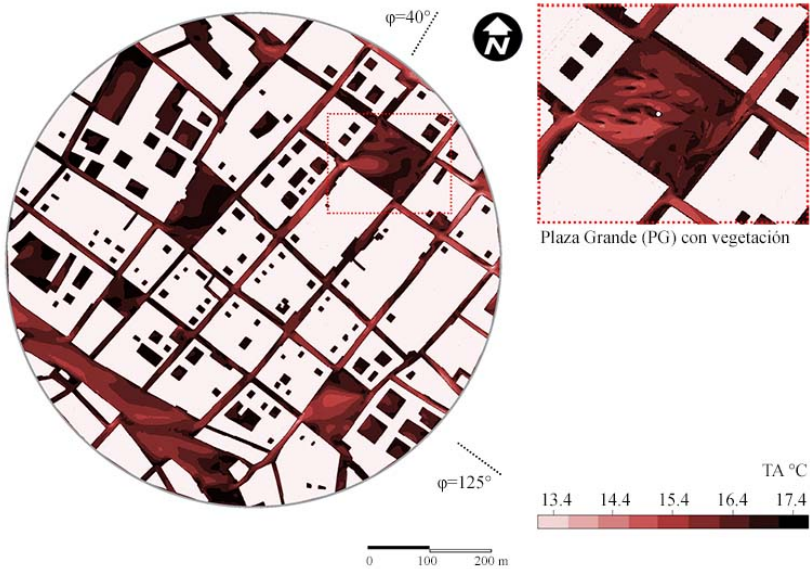
Figura 12. TA calculada en el periodo día (6:00-12:00) con plano de corte de 1,5 m.



* A la izquierda caso de estudio sin vegetación. A la derecha Plaza Grande (PG) con vegetación.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 13. TA calculada en el periodo tarde (12:00-18:00) con plano de corte de 1,5 m.



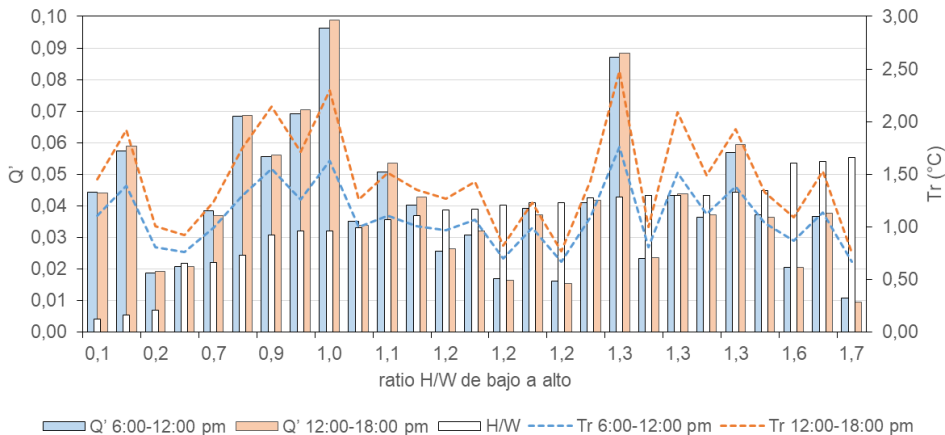
* A la izquierda caso de estudio sin vegetación. A la derecha Plaza Grande (PG) con vegetación.

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Ventilación

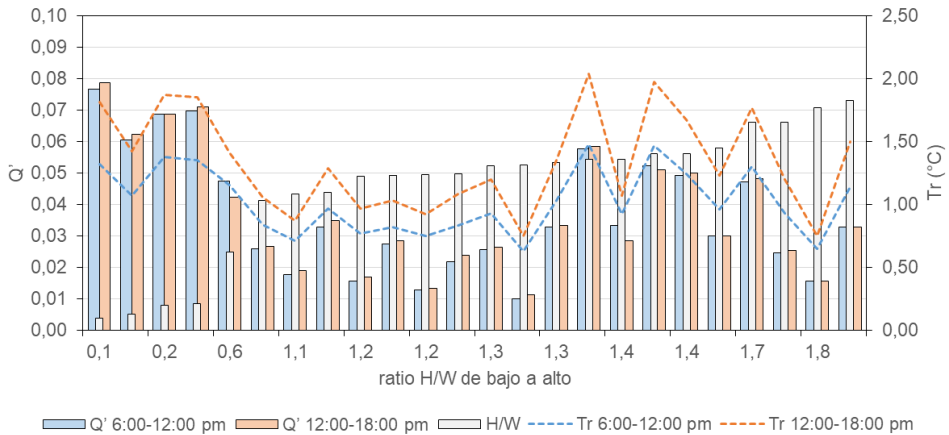
En la Figura 14 se obtienen resultados de Tr , Q' y ratios H/W para cañones urbanos de alineación opuesta al viento, mientras que la Figura 15 describe las mismas variables para los cañones que siguen la dirección del viento. La variable Q' es un indicador de la capacidad de ventilación, que para el área de estudio tiene un valor medio de 0,04. Este valor es cercano al mejor valor (0,05) cuando la relación entre la separación y la base de edificios es igual a 1 (Zhong et al., 2020). Por otro lado, valores atípicos de Q' (0,1) pueden existir para ratios H/W entre 1 y 1,3 cuando la longitud de las calles son menores a 80 m, que define un volumen más pequeño, y por lo tanto incrementa el valor de Q' (Figuras 14 y 15). Adicionalmente, en los gráficos se puede observar que los perfiles descritos son similares para Q' y Tr , ya que ambos son función de la velocidad de viento analizada, de esta manera la oscilación de Q' varía entre 0,02 y 0,08, cuando Tr oscila entre 0,5 a 2 °C (Figuras 14 y 15). Por último, la zona de estudio presente ratios H/W entre 0,1 a 1,8, que se traducen en edificios de 2 y 3 pisos, que permiten ventilación a escala peatonal (Ku y Tsai, 2020).

Figura 14. ACH, Tr y valores de H/W para cañones con alineación opuesta al viento $\phi=40^\circ$.



Fuente: Elaboración propia.

Después de analizar los valores numéricos y gráficos, se realizan algunas consideraciones al aspecto metodológico. El valor preliminar de z_0 (0,4) obtenido del análisis morfo métrico constituye un indicador aproximado para el grado de ventilación. Después, en la segunda parte con el cálculo de las simulaciones de viento, el cálculo de la variación térmica y del indicador de ventilación Q' (0,04), se obtienen resultados más detallados. Al final, el análisis morfo métrico constituye el paso preliminar para calcular z_0 .

Figura 15. ACH, Tr y valores de H/W y para cañones alineados al viento $\phi=125^\circ$.

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, el esquema presentado permitió analizar periodos de interés puntual. Es decir, para Quito, al estar en una zona ecuatorial, en donde la oscilación térmica es similar al largo del año, resulta más conveniente un análisis diario, antes que un análisis estacional (meses de calor) comúnmente realizados para ciudades de latitud norte. Además, la presente investigación empleó herramientas de simulación y análisis como SimScale y Qgis, que facilitan el proceso de cálculo, la información numérica y la representación gráfica de distintas variables. Finalmente, el presente estudio tiene una aproximación experimental, que básicamente emplea la geometría implícita de los cañones urbanos, la información de la estación meteorológica de la zona estudiada, y expresiones matemáticas para describir el comportamiento de las variables de interés.

4. Conclusiones

La presente investigación resalta el rol del viento a nivel local, cuya velocidad afecta en la modificación de la ventilación peatonal. Parte de los resultados son influenciados por las variables del microclima como la humedad relativa, y por las obstrucciones morfológicas de edificios, y en menor medida por vegetación. Se concluye que el estudio del espacio urbano (calles y plazas) a través de su geometría implícita permite identificar el rol del viento, que puede ocasionar una mitigación térmica de 2 °C. Este último resultado, es importante dentro de edificios de baja altura en el centro histórico de Quito, que a pesar de tener similares alturas, pueden encontrarse variaciones en las características aerodinámicas (valores de zo). Por otro lado, las vías más anchas o plazas, que están orientadas según la dirección del viento permiten mejor ventilación.

El estudio de Quito considero diferentes orientaciones de cañones urbanos: opuestos al viento ($\varphi=40^\circ$) y alineados al viento ($\varphi=125^\circ$). La segunda orientación alcanza un 50 % de incremento en la velocidad respecto a la primera orientación, que deriva en un incremento de la tasa promedio de ventilación adimensional Q' de 0,03 en la segunda orientación, frente a un Q' de 0,01 para la primera orientación. Además, Q' describe la tasa de ventilación adimensional para cada cañón, el promedio general de este valor es 0,04 que produce una diferencia térmica ($T_r=T-T_A$) de 1°C , evidenciando la capacidad de ventilación en la morfología estudiada.

5. Referencias bibliográficas

- Adamek, K., Vasan, N., Elshaer, A., English, E., & Bitsuamlak, G. (2017). Pedestrian level wind assessment through city development: A study of the financial district in Toronto. *Sustainable Cities and Society*, 35, 178-190. doi:10.1016/j.scs.2017.06.004
- Antoniou, N., Montazeri, H., Wigo, H., Neophytou, M. K.-A., Blocken, B., & Sandberg, M. (2017). CFD and wind-tunnel analysis of outdoor ventilation in a real compact heterogeneous urban area: Evaluation using "air delay". *Building and Environment*, 126, 355-372. doi:10.1016/j.buildenv.2017.10.013
- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International journal of climatology*, 23(1), 1-26. doi:10.1002/joc.859
- Ashie, Y., & Kono, T. (2011). Urban-scale CFD analysis in support of a climate-sensitive design for the Tokyo Bay area. *International Journal of Climatology*, 31(2), 174-188. doi:10.1002/joc.2226
- Blocken, B. (2018). LES over RANS in building simulation for outdoor and indoor applications: A foregone conclusion? *Building Simulation*, 11(5), 821 - 870. doi:10.1007/s12273-018-0459-3
- Blocken, B., & Stathopoulos, T. (2013). CFD simulation of pedestrian-level wind conditions around buildings: Past achievements and prospects. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 121, 138-145. doi:10.1016/j.jweia.2013.08.008
- Bustamante, A. (2018). Análisis de la isla de calor urbana en el entorno andino de Cuenca-Ecuador. *Investigaciones Geográficas*(70), 167-179. doi:10.14198/INGEO2018.70.08
- Bustamante, A. (2021). Caracterización del viento y temperatura aparente en los cañones urbanos del centro histórico de Cuenca, Ecuador. *Conservar Património*, 36, 90-105. doi:10.14568/cp2019034
- Carmin, J., Anguelovski, I., & Roberts, D. (2012). Urban Climate Adaptation in the Global South: Planning in an Emerging Policy Domain. *Journal of Planning Education and Research*, 32(1), 18-32. doi:10.1177/0739456X11430951
- Chu, A., Kwok, R., & Yu, K. (2005). Study of pollution dispersion in urban areas using Computational Fluid Dynamics (CFD) and Geographic Information System (GIS). *Environmental Modelling & Software*, 20(3), 273-277. doi:10.1016/j.envsoft.2004.05.007

- City of London Corporation. (2019). City of London. Obtenido de <https://www.cityoflondon.gov.uk/assets/Services-Environment/wind-microclimate-guidelines.pdf>
- Du, Y., & Mak, C. M. (2018). Improving pedestrian level low wind velocity environment in high-density cities: A general framework and case study. *Sustainable Cities and Society*, 42, 314-324. doi:10.1016/j.scs.2018.08.001
- Giridharan, R., & Emmanuel, R. (2018). The impact of urban compactness, comfort strategies and energy consumption on tropical urban heat island intensity: a review. *Sustainable Cities and Society*, 40, 677-687. doi:10.1016/j.scs.2018.01.024
- Guillen, V. (2014). Metodología de evaluación de confort térmico exterior para diferentes pisos climáticos en Ecuador. CONAMA2014 Congreso nacional del medio ambiente. Obtenido de www.conama2014.org
- Harlan, S. L., & Ruddell, D. M. (2011). Climate change and health in cities: impacts of heat and air pollution and potential co-benefits from mitigation and adaptation. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 3(3), 126-134. doi:10.1016/j.cosust.2011.01.001
- Hidalgo, J., Masson, V., Baklanov, A., Pigeon, G., & Gimeno, L. (2008). Advances in Urban Climate Modeling. Trends and Directions in Climate Research: *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, 1146, 354-374. doi:10.1196/annals.1446.015
- Ho, J. C., Ren, C., & Ng, E. (2015). A review of studies on the relationship between urban morphology and urban climate towards better urban planning design in (sub)tropical regions. ICUC9 - 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment.
- Jacobs, S. J., Pezza, A., Barras, V., Bye, J., & Vihma, T. (2013). An analysis of the meteorological variables leading to apparent temperature in Australia: Present climate, trends, and global warming simulations. *Global and Planetary Change*, 107, 145-156. doi:10.1016/j.gloplacha.2013.05.009
- Janssen, W., Blocken, B., & van Hooff, T. (2013). Pedestrian wind comfort around buildings: Comparison of wind comfort criteria based on whole-flow field data for a complex case study. *Building and Environment*, 59, 547-562. doi:10.1016/j.buildenv.2012.10.012
- Jiang, Y., Hou, L., Shi, T., & Gui, Q. (2017). A Review of Urban Planning Research for Climate Change. *Sustainability*, 9(12). doi:10.3390/su9122224
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259-263. doi:10.1127/0941-2948/2006/0130
- Ku, C.-A., & Tsai, H.-K. (2020). Evaluating the Influence of Urban Morphology on Urban Wind Environment Based on Computational Fluid Dynamics Simulation. *International Journal of Geo-Information*, 9(6). doi:10.3390/ijgi9060399
- Lau, K. K.-L., Chung, S. C., & Ren, C. (2019). Outdoor thermal comfort in different urban settings of sub-tropical high-density cities: An approach of adopting local climate zone (LCZ) classification. *Building and Environment*, 154, 227-238. doi:10.1016/j.buildenv.2019.03.005
- Lim, J., & Ooka, R. (2021). A CFD-Based Optimization of Building Configuration for Urban Ventilation Potential. *Energies*, 14(5). doi:10.3390/en14051447

- Lin, M., Hang, J., Li, Y., Luo, Z., & Sandberg, M. (2014). Quantitative ventilation assessments of idealized urban canopy layers with various urban layouts and the same building packing density. *Building and Environment*, 79, 152-167. doi:10.1016/j.buildenv.2014.05.008
- Rajagopalan, P., Lim, K. C., & Jamei, E. (2014). Urban heat island and wind flow characteristics of a tropical city. *Solar Energy*, 107, 159-170. doi:10.1016/j.solener.2014.05.042
- Ricci, A., Kalkman, I., Blocken, B., Burlando, M., Freda, A., & Repetto, M. P. (2017). Local-scale forcing effects on wind flows in an urban environment: Impact of geometrical simplifications. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 170, 238-255. doi:10.1016/j.jweia.2017.08.001
- Richards, P. J., & Hoxey, R. P. (1993). Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using k-e turbulence model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 46-47, 145-153. doi:10.1016/0167-6105(93)90124-7
- Roth, M. (2007). Review of urban climate research in (sub)tropical regions. *International journal of climatology*, 27(14), 1859–1873. doi:10.1002/joc.1591
- Secretaría de Ambiente DMQ. (2020). Datos históricos REMMAQ descarga 2004 - 2020. Obtenido de <http://www.quitoambiente.gob.ec/>
- Secretaría de Territorio Habitat y Vivienda. (2020). Visor geográfico del Plan de Uso y Ocupación del suelo. Obtenido de Plan de Uso y Ocupación del Suelo: <https://www.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=47ccc16154584d458d7e657dba576855>
- SimScale. (2020). K-Omega and K-Omega SST. Obtenido de <https://www.simscale.com/docs/simulation-setup/global-settings/k-omega-sst/>
- Steadman, R. G. (1994). Norms of apparent temperature in Australia. *Australian Metereological Magazine*, 43.
- Suder, A., & Szymanowski, M. (2014). Determination of Ventilation Channels In Urban Area: A Case Study of Wrocław (Poland). *Pure and Applied Geophysics*, 171(6), 965–975. doi:10.1007/s00024-013-0659-9
- Turkbeyler, E., Yao, R., Nobile, R., Bentham, T., & Lim, D. (2012). The Impact of Urban Wind Environments on Natural Ventilation. *International Journal of Ventilation*, 11(1), 17-28. doi:10.1080/14733315.2012.11683967
- van Hooff, T., & Blocken, B. (2010). On the effect of wind direction and urban surroundings on natural ventilation of a large semi-enclosed stadium. *Computers & Fluids*, 39(7), 1146–1155. doi:10.1016/j.compfluid.2010.02.004
- Wei, R., Song, D., Wong, N., & Martin, M. (2016). Impact of Urban Morphology Parameters on Microclimate. *Procedia Engineering*, 169, 142-149. doi:10.1016/j.proeng.2016.10.017
- Yang, X., Zhang, Y., Hang, J., Lin, Y., Mattsson, M., Sandberg, M., . . . Wang, K. (2019). Integrated assessment of indoor and outdoor ventilation in street canyons with naturally-ventilated buildings by various ventilation indexes. *Building and Environment*, 169. doi:10.1016/j.buildenv.2019.106528
- Yuan, C., Ren, C., & Ng, E. (2014). GIS-based surface roughness evaluation in the urban planning system to improve the wind environment – A study in Wuhan, China. *Urban Climate*, 10(3). doi:10.1016/j.uclim.2014.06.005

- Zhong, H.-Y., Jing, Y., Liu, Y., Zhao, F.-Y., Liu, D., & Li, Y. (2019). CFD simulation of “pumping” flow mechanism of an urban building affected by an upstream building in high Reynolds flows. *Energy & Buildings*, 202. doi:10.1016/j.enbuild.2019.07.047
- Zhong, H.-Y., Jing, Y., Sun, Y., Kikumoto, H., Zhao, F.-Y., & Li, Y. (2020). Wind-driven pumping flow ventilation of highrise buildings: Effects of upstream building arrangements and opening area ratios. *Science of the Total Environment*, 722. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.137924.