



Entramado

ISSN: 1900-3803

ISSN: 2539-0279

Universidad Libre de Cali

Aragón-Moreno, Juan Antonio; Serna-Castaño, Erika Daniela; Solano-Romero, David Steven
Estudio climatológico de los vientos para la ciudad de Bogotá en el periodo 2010 - 2016*

Entramado, vol. 15, núm. 2, 2019, Julio-Diciembre, pp. 286-307

Universidad Libre de Cali

DOI: <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.2.5733>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=265462713021>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en [redalyc.org](https://www.redalyc.org)

UAEH [redalyc.org](https://www.redalyc.org)

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Estudio climatológico de los vientos para la ciudad de Bogotá en el periodo 2010 – 2016 *

Juan Antonio Aragón-Moreno

Docente jornada completa Universidad Libre, Bogotá - Colombia

juan.aragonm@unilibre.edu.co

 <https://orcid.org/0000-0003-2768-9082>

Erika Daniela Serna-Castaño

Universidad Libre, Bogotá - Colombia

erikad-sernac@unilibre.edu.co

 <https://orcid.org/0000-0001-7405-4587>

David Steven Solano-Romero

Universidad Libre, Bogotá - Colombia

davids-solanor@unilibre.edu.co

 <https://orcid.org/0000-0002-7438-1868>

RESUMEN

En Colombia, hay una carencia en los estudios climatológicos del viento, ya que, los que existen actualmente no aplican técnicas estadísticas ni periodos representativos adecuados. Por consiguiente, el presente estudio analiza el comportamiento climatológico del viento en la ciudad de Bogotá, para el periodo 2010 a 2016, buscando describir estadística, espacial y vectorialmente esta variable climatológica. Para empezar, se realizó un análisis estadístico del conjunto de datos, de la velocidad del viento, mediante el software *Windographer*®, utilizando las técnicas exploratorias para la distribución Weibull, describiendo así los parámetros estadísticos de las estaciones en las principales zonas de la ciudad. Del mismo modo, se elaboraron las rosas de los vientos por estación, con el software *WRPLOT*™; y, para finalizar, se realizó un mapa vectorial mediante el método de interpolación Co-Kriging, utilizando el sistema de información geográfica *ArcGis*®. Observando que el régimen de circulación atmosférico en Bogotá está estrechamente relacionado con la presencia de los cerros orientales y con la predominancia de los vientos alisios; así mismo, se encontró que la mayor velocidad del viento se presenta al suroeste, y las magnitudes más débiles, al norte y en cercanía a los cerros orientales.

PALABRAS CLAVE

Velocidad del viento, dirección del viento, rosa de viento, distribución Weibull, interpolación, circulación atmosférica, climatología urbana

Climatological study of the winds for the city of Bogotá in the period 2010-2016

ABSTRACT

In Colombia, there is a lack in wind weather studies, since those that currently exist do not apply statistical techniques or adequate representative periods. Therefore, the present study analyzes the wind weather behavior in the city of Bogotá, for the period 2010 to 2016, seeking to describe this weather variable statistically, spatially and vectorially. To begin with, a statistical analysis of the data set, of the wind speed, was performed using the *Windographer* © software, using the exploratory techniques for the Weibull distribution, thus describing the statistical parameters of the stations in the main areas of the city. Similarly, wind roses were made per season, using the *WRPLOT*™

Recibido: 28/12/2018 Aceptado: 2/06/2019

<http://dx.doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.2.5733> Este es un artículo Open Access bajo la licencia BY-NC-SA (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>) Publicado por Universidad Libre - Cali, Colombia.

Cómo citar este artículo: ARAGÓN-MORENO, Juan Antonio; SERNA-CASTAÑO, Erika Daniela y SOLANO-ROMERO, David Steven. Estudio climatológico de los vientos para la ciudad de Bogotá en el periodo 2010 – 2016. *En:* Entramado, Julio - Diciembre, 2019. vol. 15, no. 2, p. 286-307 <http://dx.doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.2.5733>



software; and, finally, a vector map was made using the Co-Kriging interpolation method, using the ArcGis® geographic information system. Noting that the atmospheric circulation regime in Bogotá is closely related to the presence of the eastern hills and the predominance of trade winds; Likewise, it was found that the highest wind speed is presented to the southwest, and the weakest magnitudes, to the north and in proximity to the eastern hills.

KEYWORDS

Wind speed, wind direction, wind rose, weibull distribution, interpolation, atmospheric circulation, urban climatology

Estudo climatológico dos ventos para a cidade de Bogotá no período de 2010 a 2016

RESUMO

Na Colômbia, há falta de estudos sobre o clima do vento, uma vez que os existentes atualmente não aplicam técnicas estatísticas ou períodos representativos adequados. Portanto, o presente estudo analisa o comportamento do clima eólico na cidade de Bogotá, no período de 2010 a 2016, buscando descrever esta variável climática de forma estatística, espacial e vetorial. Para começar, foi realizada uma análise estatística do conjunto de dados, da velocidade do vento, utilizando o software Windographer ©, utilizando as técnicas exploratórias para a distribuição de Weibull, descrevendo assim os parâmetros estatísticos das estações nas principais áreas da cidade. Da mesma forma, foram feitas rosas de vento por temporada, usando o software WRPLOT™; e, finalmente, foi feito um mapa vetorial usando o método de interpolação Co-Kriging, usando o sistema de informação geográfica ArcGis®. Observando que o regime de circulação atmosférica em Bogotá está intimamente relacionado com a presença dos montes orientais e predominância de ventos alísios; da mesma forma, verificou-se que a maior velocidade do vento é apresentada na região sudeste, e as magnitudes mais fracas, ao norte e nas proximidades das colinas orientais.

PALAVRAS-CHAVE

Velocidade do vento, direção do vento, rosa de vento, distribuição de weibull, interpolação, circulação atmosférica, climatologia urbana

Introducción

El viento constituye una de las variables más importantes al momento de estudiar el clima, pues es el resultado del calentamiento de los gases presentes en la atmósfera, lo que genera un gradiente de temperatura entre distintas masas de aire y por consiguiente, a diferentes presiones (Alemany y Jiménez, 2004), produciendo así movimientos verticales denominados corrientes convectivas, siendo este el principal resultado de la transferencia de energía por convección del calor emitido por el sol hacia la tierra (Albentosa, 1990). A causa de ello, el viento puede considerarse un fluido en constante movimiento sobre la superficie terrestre y debido a esto tiene características vectoriales descritas por su dirección, la cual se representa en rosas de los vientos con una división de 8 o bien 16 rumbos (Brenes y Saborío, 1995), estos últimos los recomendados por la Organización Meteorológica Mundial -WMO por sus siglas en inglés- (WMO, 2014), y por su velocidad según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2005a), clasificada por la escala de Beaufort, cuya importancia radica en que fue la primera clasificación empírica del viento basada en la observación del comportamiento del mar y las hojas de los árboles, para después ser adaptada a las mediciones

de la magnitud del viento con la utilización del anemómetro, tal como lo determina el documento de Manual de claves - Claves internacionales, desarrollado por la WMO (2015). El viento, como se indicó anteriormente, es el flujo de gases en la tierra, que recibe el nombre de circulación atmosférica, la cual puede describirse y estudiarse de manera global mediante el modelo de tres celdas convectivas: Celda de Hadley, Ferrel y Polar (Zuñiga y Crespo, 2010), en las que el movimiento del viento depende de las fuerzas generadas por el gradiente de presión atmosférico, causado por una diferencia de temperatura. Sin embargo, dicha circulación se ve también sometida a distintas fuerzas que influyen de manera determinante en las componentes vectoriales del viento a nivel global. Entre las más importantes está el efecto de Coriolis, “una fuerza aparente que se produce de forma perpendicular a la dirección del movimiento, generando una desviación en la trayectoria del viento por la rotación de la Tierra (alrededor de su eje con una velocidad angular Ω)” (IDEAM, 2017, p.16), esto hace que toda corriente de viento que fluya en sentido norte – sur, sea desviada hacia el oeste, y las que lo hacen en sentido sur – norte, hacia el este (Martínez, 2004). Sin embargo, esta fuerza es muy débil en el trópico, puesto que allí el flujo del viento es regido por lo que se conoce como la Zona de Confluencia Inter-

tropical -ZCIT- (IDEAM, 2017). Así mismo, a nivel global el viento se ve sometido a otras fuerzas como la centrífuga, que se da en sistemas de alta y baja presión, o la fuerza de fricción, que es la causada por el rozamiento del viento con la superficie terrestre.

Prosiguiendo con el tema, el modelo de celdas convectivas, las fuerzas de Coriolis, centrífuga y de fricción, permiten describir el viento a nivel global, no obstante, a menor escala, el flujo del aire originado por sistemas de circulación atmosférica se ve perturbado por las diferencias de temperatura y presión en las capas bajas de la atmósfera, causando así flujos de aire denominados vientos locales, entre los que se encuentran las brisas costeras, vientos de ladera, brisas valle-montaña y vientos de áreas áridas (Tulot, 2000; Rampanelli, Zardi y Rotunno, 2003). Así, pues, otros factores como los cambios en la altura, la rugosidad del terreno, la localización geográfica y la topografía son determinantes en el flujo de vientos locales (IDEAM, 2005a). Del mismo modo, y debido a la acelerada expansión de las urbes desde el siglo XX, las estructuras antropogénicas de las grandes ciudades alteran significativamente la atmósfera urbana (WMO, 1984), ocasionando así fenómenos tales como las islas de calor que modifican el flujo de los vientos locales, tal como lo menciona en su estudio Li et al., (2018), en donde analizaron la interacción de la isla de calor urbano en verano con la polución urbana en Berlín, relacionando el cambio generado al régimen de vientos. En ese mismo contexto, los edificios contiguos y de gran altura dan paso al efecto conocido como cañón urbano, tema de estudio tratado por (Lipp, 2014; Giannopoulou, Santamouris, Livada, Georgakis, y Caouris, 2010), el cual causa ventilación deficiente en algunas zonas y, junto con las emisiones producto de las actividades industriales y la quema de combustibles fósiles, generan problemas en la calidad del aire en la atmósfera colindante (Alemany y Jiménez, 2004).

En efecto, en la actualidad el estudio de los vientos a nivel global es liderado por la WMO a través del programa de vigilancia de la atmósfera global -GAW-, por sus siglas en inglés- (WMO, 2016). Por otra parte, para Latinoamérica, existen algunos estudios sobre la climatología urbana que incluyen al viento, destacando la *Conferencia técnica sobre climatología urbana y sus aplicaciones con especial referencia a las regiones tropicales* (WMO, 1984), en donde describieron y estudiaron el régimen de viento y su relación con la calidad del aire en las ciudades tropicales, igualmente resalta Santana, Olave y Butorovic (2010), quienes realizaron un estudio climatológico en Magallanes, Chile, describiendo el viento de la zona para un posterior análisis de la presión atmosférica y su incidencia en el funcionamiento de un pozo petrolero, así mismo se encuentra a Letelier et al., (2011), quienes realizaron un estudio de la variabilidad local del viento para el golfo Corcovado y la isla Italia en

Chile, y a Osorio (2015), quien analizó la intensificación de los vientos en el puerto de Veracruz en México y sus zonas adyacentes. Pese a esto, los estudios de vientos y su relación con la climatología urbana son escasos en el continente latinoamericano.

Con respecto a Colombia, por ubicarse sobre la línea ecuatorial, recibe a los vientos alisios que soplan desde el noreste en el hemisferio norte y del sureste en el hemisferio sur, aunque en gran medida el movimiento de los vientos en el país se debe a la Zona de Confluencia Intertropical -ZCIT- (IDEAM, 2005a). En contraste con lo anteriormente mencionado para Latinoamérica, dentro de los principales investigadores que han tomado al viento como objeto de estudio en el país, se encuentra como pionero a Eslava (1993), que por medio de las características geográficas tales como la latitud, la distancia litoral y la altitud, estudió y describió la climatología general en Colombia y además, describió la circulación de los vientos locales colombianos a través del efecto valle-montaña, de la misma manera, se encuentra a Pabón, Palomino y Murillo (2005), quienes analizaron el ciclo diario de las principales variables climatológicas y el efecto del fenómeno del Niño y la Niña sobre el régimen de viento en la ciudad de Quibdó, Chocó y, para finalizar, el Atlas de vientos de Colombia desarrollado por el IDEAM (2017), que analizó a grandes rasgos el régimen de vientos a nivel nacional; Sin embargo, debido a su posición geográfica y al complejo montañoso de tres cordilleras, el viento en la superficie del territorio colombiano depende principalmente de la orografía y de las fuerzas de rozamiento, razón por la cual a menores escalas la circulación de este difiere del régimen nacional, pero no solo estos factores afectan el flujo de los vientos locales, también lo son las estructuras antropogénicas de las principales ciudades del país tales como Medellín, Pasto, Tunja y Bogotá D.C., esta última determinada por un patrón de crecimiento hacia el centro de la ciudad (Rueda y Rueda, 2005), y que presenta edificaciones de gran altura que afectan la dirección y la velocidad del viento (WMO, 1984).

Teniendo en cuenta lo anterior, las ciudades en Colombia presentan regímenes locales de vientos propios y muy diferenciados del nacional, razón por la cual se requieren de estudios específicos para estas. En este sentido, en el campo de la climatología urbana para la ciudad de Bogotá destaca la investigación de Fondo de Prevención y Atención de Emergencias -FOPAE- e IDEAM (2007) que realizó un estudio de los vientos para Bogotá, pero al analizar una sola estación para la ciudad, puede estar perdiendo información de la dinámica de esta variable, en otras zonas de la ciudad. Avanzando en el tiempo, se encuentra la investigación de la Universidad de Los Andes por parte de Gaitán, Cancino y Behrentz (2007), quienes realizaron un análisis de la calidad del aire en la ciudad, de manera semejante se encuentra el

estudio de calidad del aire realizado por Palacio, Zafra y Rodríguez (2014), en donde desarrollaron un análisis espacial y temporal en el periodo de abril a diciembre del año 2009 para la localidad de Puente Aranda con respecto al PM_{10} y la incidencia del viento sobre este, de tal modo, se encuentra Burgos, Aldana y Rodríguez (2015), quienes evaluaron el potencial eólico para la ciudad de Bogotá mediante el análisis de una estación meteorológica ubicada en la universidad Los Libertadores (Chapinero) y la viabilidad del emplazamiento de un aerogenerador; de igual forma, cabe resaltar los informes anuales de calidad del aire de Bogotá elaborados por la Secretaría Distrital de Ambiente para los años 2013, 2014 y 2015, debido a que presentaron análisis espaciales de la velocidad y dirección del viento de las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), a través de la interpolación Kriging y de mapas vectoriales. En cuanto lo más reciente consultado en esta investigación, se encuentra el estudio de la Universidad Central por Montenegro y Peña (2017), que evaluaron la calidad del aire para la ciudad, correlacionando el material particulado menor a 10 micras (PM_{10}) presente en el céntrico, con el comportamiento del viento.

En contraposición, es pertinente resaltar que de los anteriores estudios citados en su mayoría no presentan un análisis estadístico a profundidad sobre la velocidad y la dirección del viento para Bogotá, lo anterior debido principalmente a la falta de uso de una distribución de probabilidad adecuada para su descripción estadística, como lo es la distribución Weibull, al igual que abarcar periodos de tiempo que no son representativos y que se encuentran fuera de la normal climatológica (WMO, 2007; WMO, 1984), lo que resulta insuficiente para extrapolar el comportamiento del viento en toda el área urbana (Luo, Taylor y Parker, 2008), como para este caso en la ciudad de Bogotá. Del mismo modo, el uso de una o pocas estaciones limita el alcance del análisis, y tal como lo resalta Gaitán *et al.*, (2007), quienes afirman que se requiere una mejor descripción de la variable del viento en la ciudad, siendo la más relevante la investigación desarrollada por FOPAE & IDEAM (2007), pero que debido a su antigüedad y a que solo se utilizó la estación Aeropuerto El Dorado para la descripción de la velocidad, se requiere entonces de un estudio a mayor profundidad de esta variable en la ciudad. Las características anteriormente nombradas se tuvieron en cuenta para el desarrollo de la presente investigación, lo que permite realizar una rigurosa descripción estadística, vectorial y espacial del régimen de vientos para la ciudad de Bogotá.

Por otra parte, para el estudio de las series temporales de vientos se requiere de un análisis estadístico debido a que este se comporta como una variable aleatoria continua (Wilks, 2006), para ello se disponen de numerosos softwares,

entre los que destaca *Windographer*®, que permite analizar simultáneamente datos de dirección y velocidad del viento de varias bases de datos en múltiples formatos, además, relaciona variables como la temperatura, presión, humedad relativa y altura con las series de vientos y permite el cálculo de los estadísticos principales tales como la media, los máximos y la desviación estándar (AWS Truepower, 2018). *Windographer*® ha sido empleado con éxito por EL-Shimy (2008), el cual utilizó el software para realizar distribuciones de probabilidad Weibull y control de calidad de los datos del viento de las estaciones meteorológicas del Cairo-Egipto, del mismo modo Kalpage, Peiris, Perea, Siriwardana y Lidula (2015), quienes analizaron y modelaron los datos de velocidad y dirección del viento para una turbina en la ciudad de Mannar-Sri Lanka, continuando Fazelpour, Markarian y Soltani (2017), que realizaron un análisis de la prevalencia de la dirección del viento para el potencial de energía eólica en cuatro localidades de Irán y, por último, Tavares, Moita, Lopes, Mariano y Brabo (2017), que hicieron una caracterización del régimen de los vientos para identificar los posibles sitios de generación de energía eólica en las regiones del estado Piauí-Brasil. Por lo anterior, *Windographer*® resulta ser un software robusto para el control de calidad e imputación de datos en las series temporales de velocidad y dirección del viento. Como ya se mencionó, el viento se describe mediante una dirección debido a su naturaleza vectorial, que es representada y analizada mediante gráficos circulares que muestran la frecuencia de la velocidad del viento distribuida en 8 o 16 sectores, cabe resaltar que a mayor división de sectores se puede observar de manera más detallada la distribución de las direcciones del viento (WMO, 2014; WMO, 2011; de la Cruz, 2009).

En lo que respecta al análisis espacial para los vientos en Colombia, resalta el desarrollado por Eslava (1993), quien describió la circulación general atmosférica a través de los principales fenómenos que afectan al país; de igual manera, se encuentra el Atlas de vientos de Colombia desarrollado por el IDEAM (2017), donde se representó espacio temporalmente los datos a nivel nacional mediante el uso del Software *ArcGis*®, utilizando la herramienta de interpolación *spline* regularizado, donde los autores establecen que dicha interpolación es adecuada para abarcar grandes áreas y suavizar la superficie de estudio. Por otro lado, después de realizar la respectiva búsqueda de investigaciones, artículos, libros y demás recursos bibliográficos, para la ciudad de Bogotá no se encuentran suficientes estudios geoestadísticos y de climatología urbana para la variable del viento, entre los más representativos se encuentra el mapa general para el flujo del viento de FOPAE & IDEAM (2007), y los informes anuales de calidad del aire de la SDA para los años 2014 y 2015, en donde se analiza espacialmente al viento en la ciudad, se interpola la magnitud y la dirección mediante

el método de Kriging y se correlaciona con los principales contaminantes atmosféricos.

I. Marco teórico

Puesto que las series temporales de velocidad y dirección del viento presentan características asimétricas, unimodales y varían con el tiempo, se requiere de una descripción estadística para su estudio y análisis (Wilks, 2006). La distribución de probabilidad de Weibull es la que se ajusta de manera adecuada a las series temporales de velocidad del viento (WMO, 2014; Wilks, 2006; WMO, 1986; WMO, 1984), lo cual puede ser comprobado mediante un histograma que compara las distribuciones de frecuencia de la velocidad dispuestas en barras, con la curva de la función de probabilidad de Weibull, cuyo nivel de confiabilidad de este ajuste se puede medir con el coeficiente de determinación R^2 , el cual establece la calidad del modelo estadístico utilizado para representar los datos, siendo este un estadístico que adquiere valores entre 0 y 1, donde un valor de R^2 más cercano a 1 indica una mejor representación entre los datos observados y el modelo empleado (Pobočíková, Sedláčková y Michalková, 2017). La distribución Weibull “describe los tiempos transcurridos entre fenómenos a lo largo de un proceso en el que estos se producen continua e independientemente a un ritmo variable” (WMO, 2011, p. 2-4). Así mismo, la distribución Weibull permite analizar gráficamente el comportamiento temporal de la velocidad del viento, así como determinar su media y estadísticos principales (Ozay y Soner, 2016). La distribución de probabilidad de Weibull viene dada por la ecuación (1), descrita a continuación:

$$f(x; \lambda; k) = \left\{ \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda} \right)^k} \right\} x, \lambda > 0 \quad (1)$$

Dónde $f(x)$ corresponde a la probabilidad que el viento sople con una magnitud de velocidad x . Este tipo de función de probabilidad requiere del cálculo de dos parámetros, el de forma k , que representa la pendiente de la distribución Weibull y permite modelar la curva y medir el grado de variación de la variable aleatoria, en este caso para el viento (IDEAM, 2017), al igual que el de escala λ , que representa el grado de dispersión de los datos alrededor de la media. Si el parámetro de forma es menor a dos ($k < 2$), indica que la distribución tiene una cola hacia la derecha y se presenta una mayor variación del viento; si $2 < k < 3$ muestra que la velocidad del viento es más estable, y $k > 3$ muestra una aproximación a la distribución normal con notable simetría, tal como lo muestra Wang, Zhang, Waring y Lo (2017) en su metodología empleada, así como la empresa de distribución de software Homer Energy (2018).

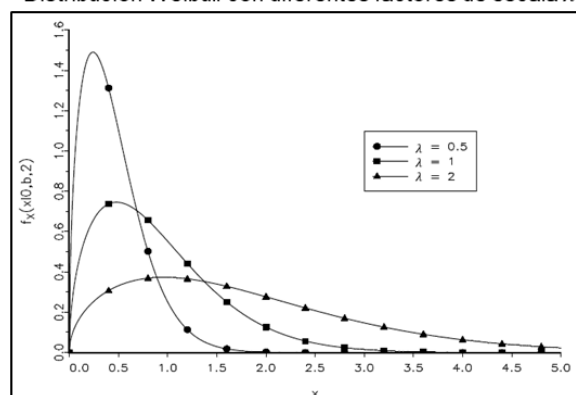
Debido a que la media no permite observar cuan dispersos están los datos de la distribución (medida de variación), la desviación estándar indica cuán lejos se encuentran los datos de la media muestral (Orellana, 2001). Cuando el valor de este parámetro estadístico es igual a 0 indica que la distancia entre los datos de la distribución es equivalente entre sí; por otro lado si el valor difiere de 0, su valor indica la distancia de los datos a la media de la distribución. La desviación estándar de la distribución Weibull viene descrita por la ecuación (2):

$$f(x; \lambda; k) = \sqrt{\lambda^2 \left\{ \Gamma \left(\frac{2}{k} + 1 \right) - \left[\Gamma \left(\frac{1}{k} + 1 \right) \right]^2 \right\}} \quad (2)$$

Dónde $f(x)$ representa la desviación estándar para la distribución Weibull, Γ corresponde la función Gamma de Euler y k y λ los parámetros de forma y escala descritos anteriormente (Rinne, 2008).

En las siguientes gráficas se puede observar los cambios ocasionados en la distribución producto de diferentes valores de los factores forma k y escala λ :

Distribución Weibull con diferentes factores de escala λ



Distribución Weibull con diferentes factores de forma k

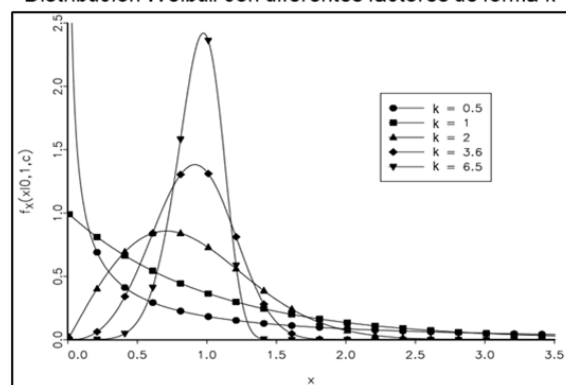


Figura 1. Variación de la gráfica de la Distribución Weibull con diferentes parámetros de forma y escala
Fuente: (Rinne, 2008).

Tal como lo muestra la Figura 1, al variar el parámetro de escala (λ) varía la dispersión de los datos, lo que altera la densidad de la variable aleatoria en dirección de la ordenada (IDEAM, 2017); por otra parte, al alterar el parámetro de forma (k) se modifica la pendiente de la distribución, generando un cambio en la asimetría de la misma (Rinne, 2008).

El uso de la distribución Weibull para describir el régimen de vientos resulta fundamental debido a su carácter de variable aleatoria. De acuerdo con esto, se encuentra que para el caso de Colombia, dicha distribución fue empleada en el atlas de vientos de Colombia por el IDEAM (2017) para modelar el comportamiento del viento en el territorio nacional, y realizaron el respectivo cálculo de los parámetros de forma y escala para la estación Aeropuerto El Dorado en la ciudad de Bogotá, además extrapolaron con esta el comportamiento del viento para toda el área urbana; sin embargo, una estación meteorológica resulta insuficiente si se desea describir la circulación atmosférica en otras áreas de la ciudad, debido a que el viento se ve fuertemente influenciado por la topografía y la incidencia de estructuras urbanas, lo que hace que se presente una variación significativa en el espacio de un punto a otro (Berndt y Haberlandt, 2018).

Como se mencionó anteriormente, dentro de los estudios más relevantes de vientos para Bogotá está el de FOPAE & IDEAM (2007), donde se desarrolló un estudio del comportamiento de los vientos en la ciudad de Bogotá con la estación Aeropuerto El Dorado, por medio de una descripción semestral de los periodos secos y húmedos, así mismo, determinaron que para el régimen de vientos de la ciudad se presenta una confluencia de las corrientes provenientes del sur y del norte hacia el centro de la ciudad, siendo los vientos provenientes del noreste los de mayor predominancia con una velocidad media general de 1,5 m/s. Sin embargo, los estudios que incluyen análisis de la variable del viento en Bogotá son principalmente de calidad del aire, de los cuales destaca el realizado por Gaitán *et al.*, (2007), quienes determinaron que hay una relación inversa entre la velocidad y dirección del viento con el material particulado menor a 10 micras (PM_{10}) en la ciudad, estableciendo de igual forma que a mayor velocidad del viento, menor concentración de dicho contaminante, además, establecen que la velocidad media del viento para la zona urbana de Bogotá es de 1 m/s y que predominan vientos en sentido este-oeste y, de la misma manera, identifican un aumento gradual de la velocidad del viento de la estación ubicada en la zona industrial en la ciudad de Bogotá entre el periodo de 1999 y 2006. De la misma manera, se encuentra la evaluación de la calidad del aire en Bogotá realizada por Palacio *et al.*, (2014), donde determinan una dirección predominante proveniente del suroeste para la estación

Puente Arada, pero cuyo estudio no toma a profundidad el comportamiento estadístico del viento.

Así mismo, se encuentra a Burgos *et al.*, (2015) que modelaron el comportamiento del viento a través de la distribución Weibull durante los meses de diciembre y enero para una estación ubicada en la universidad Los Libertadores, estableciendo que la velocidad media para dicha estación es de 1,72 m/s y que la dirección predominante en la misma es de vientos que vienen del sureste. Consiguientemente, resaltan los informes anuales de calidad del aire de Bogotá de la SDA para los años 2013, 2014 y 2015, que muestran que para un promedio de los valores registrados por los tres informes, la menor media se da hacia el norte de la ciudad, según lo presentado por la estación Guaymaral con una magnitud de 1,06 m/s, y la media más alta hacia el sur de la ciudad, según lo mostrado en la estación Kennedy con un valor de 2,63 m/s. Del mismo modo, dichos informes muestran velocidades medias significativas para las estaciones Puente Aranda (2,16 m/s) y Carvajal (2,46 m/s), además, determinan que los valores más altos de la velocidad del viento se presentan en horas de la tarde. Igualmente, en los informes de los años 2014 y 2015 se observa que para las 11 estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), 7 presentan predominancia de vientos provenientes del este y 3 del sur. Sin embargo, para los informes anteriormente mencionados, la estación Centro de Alto Rendimiento registra predominancia de vientos del oeste para el año 2014, para luego presentar un cambio en el 2015 con mayor incidencia de vientos del oeste. Conjuntamente, la SDA identificó la predominancia de la dirección de las corrientes mediante el uso de rosas de los vientos con ocho rumbos colaterales, encontrando que hacia el norte de la ciudad preponderan vientos del norte y del este, con excepción de la estación de Usaquén que presenta una mayor incidencia del sur, de igual forma, hacia el sur de la ciudad identifican una predominancia de vientos del sur y del este registrados en las estaciones Tunal y San Cristóbal respectivamente, para así concluir que las corrientes que soplan del sur y del norte de la ciudad confluyen hacia el centro de la misma, mostrando una amplia variabilidad en la dirección del viento en el centro geográfico de la ciudad, tal como se observa en las estaciones Puente Aranda y Centro de Alto Rendimiento de los informes publicados. Finalmente se encuentra, la investigación de la Universidad Central por Montenegro y Peña (2017), quienes a través de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) establecieron que la media más baja es para la estación Guaymaral, en la zona norte, con un valor de 0,97 m/s y la mayor para la estación Kennedy, zona sur, con 2,48 m/s con direcciones predominantes del este y sur sureste respectivamente.

Por último, en cuanto a la espacialización de los datos, partiendo del hecho que los registros de la velocidad y direc-

ción del viento son tomados generalmente por estaciones meteorológicas estáticas en un amplio periodo de tiempo, los datos se registran en una ubicación puntual, por consiguiente, para representar la variable viento en un área determinada se requiere del uso de herramientas de interpolación geoestadística (Luo *et al.*, 2008). La interpolación geoestadística es más precisa si se cuenta con una cantidad suficiente de estaciones meteorológicas que abarquen de manera uniforme al área de estudio, por ejemplo, la velocidad del viento es más variable de un punto a otro que otras variables como la presión o la temperatura, por lo anterior resulta necesario determinar que interpolación con sus respectivos parámetros se adecuan mejor con el comportamiento espacial del viento (Berndt y Haberlandt, 2018), tal como lo determinó Luo *et al.*, (2008), quienes compararon distintos métodos de interpolación para la magnitud del viento en Inglaterra y Gales, concluyendo que para esta variable meteorológica el método Co-Kriging produce la mejor estimación de una superficie continua para la velocidad del viento, y hace que el resultado tenga una consistencia temporal, evitando errores de puntos de concentración de datos conocidos como ojos de buey (Fortis *et al.*, 2010).

2. Metodología

En esta sección se esbozan los fundamentos que se requieren para comprender los procedimientos utilizados en el desarrollo de la presente investigación, que se desarrolla con un enfoque cuantitativo exploratorio. Para empezar, se realizó una búsqueda y selección de estaciones meteorológicas y climatológicas que contaran con una adecuada homogeneidad en los datos disponibles, siendo las 11 estaciones fijas meteorológicas de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) las que presentaban una mejor disponibilidad y calidad de los datos de velocidad y dirección del viento para el periodo comprendido entre el 2010 y el 2016. Posteriormente, se desarrolla un análisis estadístico descriptivo de la distribución de probabilidad de Weibull para el viento mediante el software *Windographer*®, que ha sido empleado con éxito por Kalpage, *et al.*, (2015), además, se utilizó el software *WRPLOT*™ donde se elaboraron las rosas de los vientos para su respectiva descripción vectorial y finalmente, se desarrolló el análisis espacial de la magnitud y dirección del viento mediante el software *ArcGis*® y la herramienta de interpolación Co-Kriging.

2.1. Periodo y estaciones meteorológicas seleccionadas para el estudio

En cuando a la determinación del periodo de análisis representativo para el estudio, se consultó la guía de prácticas meteorológicas (WMO, 2011), la cual establece que

un periodo de registro reciente de cinco a diez años tiene una óptima representatividad al igual que la normal climatológica de treinta años. Además, las ciudades son espacios geográficos de constante intervención humana, lo que hace que se generen continuos cambios en el régimen del viento (WMO, 1984), razón por la cual los estudios dentro del periodo de tiempo determinado por la guía de prácticas meteorológicas (WMO, 2011) también permiten realizar análisis climatológicos urbanos, como lo es el presente estudio. Posteriormente, se consultaron a las entidades públicas encargadas de monitorear las variables meteorológicas dentro de la ciudad de Bogotá y a sus alrededores tales como el IDEAM, la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), la SDA y la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB-ESP), debido a que esta última solo cuenta con estaciones hidrológicas y por ende no monitorea la variable del viento, fue descartada. Por otra parte, se le solicitó al IDEAM los datos de velocidad y dirección del viento de la estación más representativa para la ciudad que es la del Aeropuerto El Dorado tal como lo menciona FOPAE & IDEAM (2007), sin embargo, una vez suministrada la información, dicha estación no contaba con un registro continuo de datos de la magnitud y dirección del viento. Por último, la SDA fue la única institución donde se encontró una amplia disponibilidad de datos para el desarrollo del estudio, siendo el periodo comprendido entre 2010 y 2016 el cual contaba con la menor cantidad de datos faltantes (Tabla 1) en las series temporales, al igual que una buena homogeneidad de los mismos, siendo estos a su vez datos con frecuencia horaria, cada estación contando con 61.368 de registros de velocidad y dirección del viento. Consecuentemente, se estableció un porcentaje máximo de datos faltantes de 30% por estación tal como lo menciona el estudio para la descripción de dos métodos de rellenado de datos ausentes en series de tiempo meteorológicas (Alfaro y Soley, 2009). En suma, la SDA monitorea las variables climatológicas de Bogotá desde el año 1999, no obstante, se decidió no ampliar la línea de partida de la serie temporal a un tiempo anterior al 2010, debido a que de hacerse se aumentaría el porcentaje de datos faltantes por estación.

Tabla. 1
Porcentaje de datos faltantes por estación

| Estación | Porcentaje (%) |
|-------------------------|----------------|
| San Cristóbal | 17,79 |
| Tunal | 4,41 |
| Carvajal – Sevillana | 6,46 |
| Kennedy | 7,74 |
| Puente Aranda | 4,79 |
| Ministerio de Ambiente | 29,53 |
| Centro Alto Rendimiento | 5,08 |

Continúa en la siguiente página

| Estación | Porcentaje (%) |
|------------|----------------|
| Las Ferias | 11,68 |
| Usaquén | 13,55 |
| Suba | 6,43 |
| Guaymaral | 12,32 |

Fuente: Los autores

Del mismo modo, las 11 estaciones de la SDA permiten abarcar de manera significativa a la ciudad, por otra parte, se seleccionaron 4 estaciones climatológicas de la CAR en el mismo periodo con datos mensuales. Es importante aclarar que los datos mensuales correspondientes a las estaciones de la CAR no fueron incluidos en el análisis estadístico y vectorial de la ciudad, ya que estas solo fueron utilizadas en la interpolación para la elaboración del mapa vectorial. En la Tabla 2 se puede observar los nombres y las coordenadas geográficas de las estaciones seleccionadas para el estudio:

Tabla 2.

Ubicación geográfica de estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RM/CAB) seleccionadas para el estudio

| Estación y abreviatura | Coordenadas | |
|---------------------------------|-------------|-------------|
| | Latitud | Longitud |
| San Cristóbal (S.C) | 4.572500° | -74.083600° |
| Tunal (T) | 4.576190° | -74.130930° |
| Carvajal – Sevillana (C) | 4.595800° | -74.148550° |
| Kennedy (K) | 4.624900° | -74.161350° |
| Puente Aranda (P.A) | 4.631870° | -74.117570° |
| Ministerio de Ambiente (M.A) | 4.625304° | -74.066798° |
| Centro Alto Rendimiento (C.A.R) | 4.658370° | -74.084000° |
| Las Ferias (F) | 4.690600° | -74.082560° |
| Usaquén (U) | 4.709390° | -74.031990° |
| Suba (S) | 4.762510° | -74.093430° |
| Guaymaral (G) | 4.783740° | -74.044170° |
| Doña Juana (DJ) | 4.526566° | -74.134278° |
| Guatavita (G) | 4.908153° | -73.865633° |
| Subachoque (SB) | 4.866575° | -74.211847° |
| Sibaté (ST) | 4.538305° | -74.246198° |

Fuente: Los autores

Para facilitar el análisis de la investigación se agruparon las estaciones en función del comportamiento vectorial como se puede observar en la Figura 14 y de las principales calles

de la ciudad, incluyendo también sus respectivas localidades en tres zonas características:

Zona Norte: De la calle 100 a la calle 245 desde los cerros orientales hasta el límite con el río Bogotá, comprendiendo las localidades de Usaquén y Suba, comprendiendo las estaciones Guaymaral, Suba y Usaquén.

Zona Centro: De la calle 100 a la avenida primera de mayo desde los cerros orientales hasta el límite con el río Bogotá, agrupando las localidades de Engativá, Candelaria, Barrios Unidos, Teusaquillo, Puente Aranda, Los mártires, Chapinero, Santa Fe y Fontibón, agrupando las estaciones de Centro de Alto Rendimiento, Puente Aranda, Ministerio de Ambiente y Las Ferias.

Zona Sur: De la avenida primera de mayo hasta el Cerro Doña Juana, uniendo las áreas urbanas de Usme y Ciudad Bolívar, y las localidades de Antonio Nariño, Tunjuelito, Rafael Uribe Uribe, San Cristóbal, Bosa y Kennedy, contemplando las estaciones de Kennedy, Carvajal-Sevillana, Tunal y San Cristóbal.

Debido a que la localidad de Sumapaz es completamente rural, no se tuvo en cuenta en el campo de la climatología urbana y por ende para este estudio.

En la Figura 2 se puede observar tanto la ubicación espacial de las estaciones seleccionadas, como la división de la ciudad en tres zonas por medio de sus localidades.

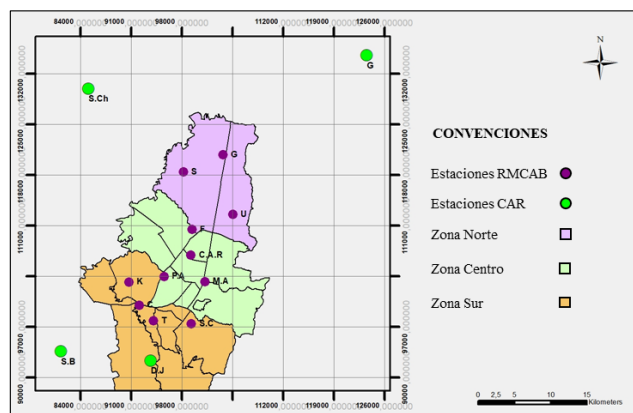


Figura 2. Ubicación espacial de las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RM/CAB) y las del SICLICA- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR)

Fuente: Los autores

2.2. Control de calidad de los datos

En lo que respecta al control de calidad de los datos de velocidad y dirección de viento, se consultó la directriz sobre el control de calidad de datos climatológicos de la WMO

(1986), en donde menciona que durante el proceso de observación, medición y almacenamiento de datos climatológicos se pueden presentar errores cuyas causas pueden ser muy variadas: instrumentos defectuosos, codificación incorrecta, transcripción y transmisión errada, etc., estos errores, dependiendo del tipo de datos recolectados, podrían afectar de manera considerable sus estadísticos, restando confiabilidad a la medición. Por lo anterior, es necesario desarrollar un control de calidad para descartar posibles datos que no concuerden con la realidad medida, y asegurar una homogeneidad en la serie temporal estudiada y por consiguiente una alta confiabilidad en el análisis estadístico.

Hay que mencionar además, que en la presente investigación se desarrolló un control básico de calidad a través de la consistencia interna de los datos, es decir, una comprobación para asegurar que la observación sea coherente dentro de la misma serie temporal, debido a que los datos se encuentran relacionados entre sí, además, se empleó una comprobación espacial que consiste en una comparación entre datos de otras estaciones, lo anterior es aplicado por el IDEAM (2005) en su metodología de la operación estadística de variables meteorológicas. En consecuencia, durante el control de calidad de los datos se observó, identificó y descartó registros de velocidades negativas del viento, direcciones del viento por fuera del rango de 0° y 360° , valores inusuales de velocidad de viento que no corresponden tanto a los valores de la media como a los máximos de los estudios previamente consultados. Este proceso se realizó mediante el uso de hojas de cálculo que permitieron su revisión manual (Microsoft Excel®). Posteriormente, se realizó el proceso de imputación de datos faltantes por medio del software *Windographer*® (AWS Truepower, 2018), el cual utiliza un modelo basado en cadenas de Markov para procesos estocásticos, con el fin de generar datos sintéticos de la velocidad y dirección del viento. Así pues, estos modelos vienen definidos mediante la propiedad de Markov, que establece que la probabilidad de ocurrencia de un suceso futuro depende única y exclusivamente del estado inmediatamente anterior, característica que es aplicable a las variables meteorológicas, que son consideradas procesos estocásticos (Masseran, 2015).

2.3. Descripción estadística de los datos

Para la descripción estadística se elaboraron las distribuciones Weibull y se calcularon sus respectivos parámetros de forma y escala con el método de máxima verosimilitud (Saboor, Bakouch y Khan, 2016) mediante el software de análisis de datos de viento R^2 , este método fue seleccionado para la actual investigación por ser el que presenta un mejor ajuste en el histograma, tal como lo demuestran Chaurasiya, Ahmed y Warudkar (2017), y además por ser mucho más eficiente, según lo determinado por Jablonski,

Barszcz, Bielecka y Breuhaus (2012). En adición, se identificó gráficamente la asimetría de la distribución Weibull, lo que permite observar el sesgo que presentan los datos en cuestión, indicando si se presenta una mayor distribución de los datos a la derecha o la izquierda de la media (Mazzeo, Oliveti y Labonia, 2017), indicando una mayor probabilidad de presentar valores de la velocidad del viento por encima de la media (derecha) o por debajo de esta (izquierda).

2.4. Descripción de la dirección del viento

Para desarrollar la descripción de la dirección del viento, se elaboraron las rosas de los vientos con el software libre WRPLOT™ (Thé, Thé y Johnson, 2016) de las 11 estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) y de 4 estaciones de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) dentro del periodo de estudio, las cuales permiten determinar la dirección predominante, así como representar las frecuencias de ocurrencias de la velocidad del viento en áreas equivalentes divididas por colores en 16 rumbos co-colaterales (Ramírez, Vivanco y Moreno, 2007). Las rosas de los vientos para las estaciones del estudio fueron realizadas con datos horarios desde el mes de enero de 2010 hasta el mes de diciembre de 2016. De igual forma, el software WRPLOT™ permite graficar la dirección del flujo de vientos tanto hacia donde se dirigen como de donde provienen (FOPAE & IDEAM, 2007), siendo esta última la seleccionada para la descripción de la dirección del viento en la ciudad de Bogotá, ya que resulta más práctico para el desarrollo del análisis espacial de las rosas de los vientos.

2.5. Descripción espacial del viento

Posteriormente, se realizó una georreferenciación de los gráficos de las rosas de los vientos en el sistema de coordenadas planas proyectadas MAGNA - Ciudad Bogotá con el software *ArcGis*®, y se elaboró un mapa que permitió observar de manera conjunta el comportamiento de la dirección del viento en Bogotá para el periodo analizado, permitiendo establecer tanto la dirección predominante de los vientos, como otras direcciones con importante incidencia en cada estación.

2.6. Descripción vectorial de los datos.

Una vez determinada la media de la velocidad del viento por intermedio de la distribución Weibull y la dirección predominante para cada estación con la rosa de los vientos, se realizó la georreferenciación de estos datos en el mismo sistema de coordenadas mencionado anteriormente para las rosas de los vientos. Consecutivamente, se realizó la interpolación geoestadística con el método Co-Kriging de los

datos de la velocidad media del viento y la predominancia de la dirección para la construcción de un mapa con áreas de igual intensidad del viento (Gozdowski *et al.*, 2015), y una representación vectorial de su dirección, permitiendo así identificar parámetros de flujo del viento en la ciudad de Bogotá, su posible relación con la orografía y la densidad urbana, así como comparar la información resultante de este mapa con lo determinado en los estudios de calidad del aire para el material particulado y el régimen de vientos en la ciudad.

3. Análisis y resultados

A continuación, se pueden encontrar los resultados obtenidos, en cuanto a lo estadístico, espacial y vectorial; así como las comparaciones y discusiones con los estudios previos realizados a este.

3.1 Análisis estadístico

En principio, para determinar el grado de relación existente entre la distribución de los datos y la función de probabilidad de Weibull, se empleó un histograma que permite comparar las frecuencias de la velocidad del viento con la función de probabilidad de Weibull, y además el estadístico de coeficiente de determinación (R^2), que puede tomar un valor en el conjunto $[0,1]$, siendo que un valor de 1 indica una perfecto ajuste de la distribución de los datos al modelo estadístico comparado. En la Figura 3 se puede observar el histograma para la estación San Cristóbal y el estadístico R^2 con un valor de 0,9637.

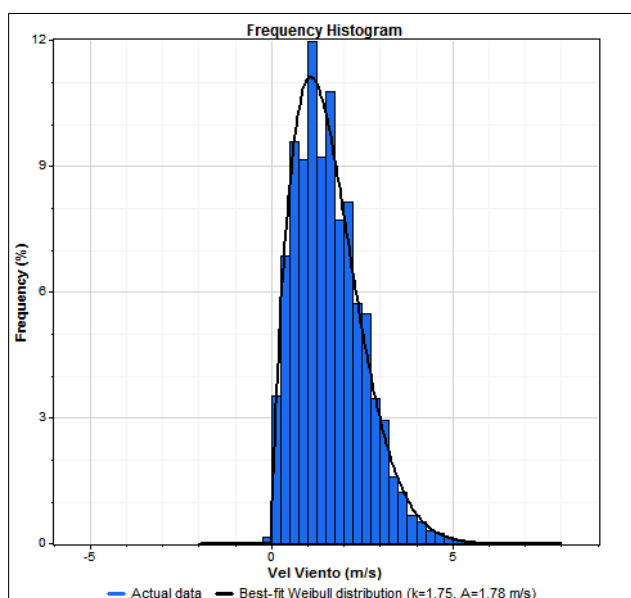


Figura 3. Histograma estación San Cristóbal $R^2 = 0,9637$

Fuente: Los autores

Como se mencionó anteriormente, la Figura 3 permite comparar el histograma de la magnitud de velocidad, con la función de probabilidad de Weibull, permitiendo observar e identificar la similitud gráfica existente entre los datos y el modelo empleado. De la misma manera, el valor R^2 muy cercano a 1, que para la estación San Cristóbal es de 0,9637, denota un error en la distribución del 3,36% de ajuste, permitiendo establecer que el comportamiento de los datos del viento para la estación de San Cristóbal sigue una relación matemática semejante a la distribución de Weibull, por lo que esta última es la más adecuada para la descripción del R^2 viento. El uso de histogramas y la revisión del R^2 se desarrolló con todas las estaciones de la RMCAB, asegurando así que la distribución de Weibull es la más idónea para la descripción del comportamiento del viento en las estaciones (Pobočíková, Sedláčková y Michalková, 2017).

En lo que respecta al análisis estadístico, se agrupó y observó el factor de forma Weibull " k " para las 11 estaciones de las tres zonas, identificando que el valor más alto para dicho estadístico se registra en la distribución de Carvajal, zona sur, con un valor de $k = 2,022$, y el más bajo para la estación Guaymaral, zona norte, con un valor de $k = 1,279$, de acuerdo a lo anterior, y conforme a lo establecido en la teoría de la presente investigación por el atlas de viento de Colombia del IDEAM (2017), así como por la empresa de software Homer Energy (2018) y la metodología empleada por Wang *et al.* (2017), que afirman que valores bajos del factor forma indican una amplia variación en la velocidad del viento y los altos una mayor estabilidad, la estación Carvajal debería ser la más estable con respecto a su magnitud para la ciudad; no obstante, la anterior condición no se cumple, ya que según lo observado en las tablas de frecuencias y los gráficos de rosa de los vientos para Carvajal (Tabla 8 y Figura 12), se presenta una frecuencia de 52,9% de velocidades del viento por fuera del intervalo de clase correspondiente su media $[2,4]$ m/s, mostrando así una amplia variabilidad de la velocidad en el tiempo analizado. De igual forma, la estación Guaymaral, que según los autores citados anteriormente debería ser la más variable para la ciudad de Bogotá, registra 12,7% de frecuencia de velocidades del viento por fuera del intervalo de clase en donde se encuentra su media $[0,2]$ m/s (Tabla 6 y Figura 8), lo que denota una menor variabilidad en la velocidad del viento. Está relación entre el factor de forma y la variabilidad no se cumple para ninguna de las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) y se requiere de otros estudios más específicos y locales que permitan completar las causas de esta relación.

En contra posición, sí se puede identificar una relación entre el factor de forma y la asimetría de las distribuciones de probabilidad, tal como lo determina Burgos *et al.*, (2015), siendo que para Guaymaral, al ser la distribución con el

factor de forma más bajo, presenta el mayor sesgo hacia la izquierda o asimetría positiva (Tamayo, 2008), indicando que la mayor frecuencia de velocidades bajas se presenta en esta estación. De la misma manera, la distribución de Carvajal al presentar el mayor factor de forma, denota una mayor simetría en sus datos, lo cual puede observarse en el gráfico para dicha estación (Figura 7) e indica una distribución de datos similar tanto a la izquierda como a la derecha de la media. Lo anterior permite observar una tendencia a presentar bajas velocidades del viento hacia la zona norte de la ciudad, y una mayor amplitud de la misma en la zona sur de la ciudad; no obstante, la estación Puente Aranda y Ministerio de Ambiente para la zona centro presentan amplias colas hacia la derecha con notable asimetría hacia la izquierda, lo que indica que la mayor dispersión de los datos de velocidad se presenta en la zona centro.

Por otra parte, tal como se menciona en el atlas de vientos del IDEAM (2017), los factores de escala “ λ ” si muestran una clara relación con la concentración de los datos en las distribuciones, tal como se puede observar en la gráfica de la distribución para Guaymaral (Figura 4), que, al presentar el menor factor de escala, presenta la mayor concentración de los datos de velocidad dentro del rango de clase para su media (Tabla 6) con más del 80% de ocurrencias. Así mismo, la estación que presenta el mayor factor de escala, presenta la mayor dispersión de sus datos, que para el caso del presente estudio se registró en la estación Kennedy, tal como se puede observar en la tabla de frecuencia (Tabla 8) con un 60,6% de ocurrencias fuera del rango de clase de su media, lo que indica una amplia dispersión de sus datos, característica que también se puede observar en la cola y forma achatada del gráfico de la distribución (Figura 7).

A continuación, se mostrarán las estadísticas principales, los factores de forma k y escala λ y la velocidad máxima para las estaciones de la zona norte, centro y sur:

Zona Norte

Para la zona norte de la ciudad se identifica una tendencia a presentar valores bajos en la velocidad del viento, al igual que en los estudios citados previamente, coincidiendo tal como se mencionó anteriormente con el criterio de las asimetrías y como se puede observar en Figura 4, en donde las distribuciones de probabilidad muestran un sesgo hacia la izquierda para todas las estaciones, y en la Tabla 4 en la cual se puede observar el mayor porcentaje de ocurrencias en el primer rango de clase $[0,2)$ m/s.

También se puede observar una relación entre las desviaciones estándar y los máximos registrados en este conjunto de estaciones (Tabla 3), siendo que la estación que registra los valores más altos de desviación estándar (1,660 m/s) y de velocidad máxima (7,7 m/s), corresponden a la estación Suba, así mismo, los valores más bajos de desviación estándar y de la velocidad máxima se presentan para la estación Guaymaral, con valores de 0,761 m/s y 5,4 m/s respectivamente, además dichos eventos de vientos máximos se dieron en horas de la tarde (Tabla 3). De la misma manera, las tablas de frecuencias de la zona norte (Tabla 4) y las desviaciones estándar permiten establecer que la estación Guaymaral presenta la mayor estabilidad en la magnitud del viento con 87,2% datos dentro del rango correspondiente a la media, en contraste con la estación Suba, que con el mismo criterio se determina que es la más variable con un 34% de velocidades por fuera del intervalo de la media $[(0,2)$ m/s.

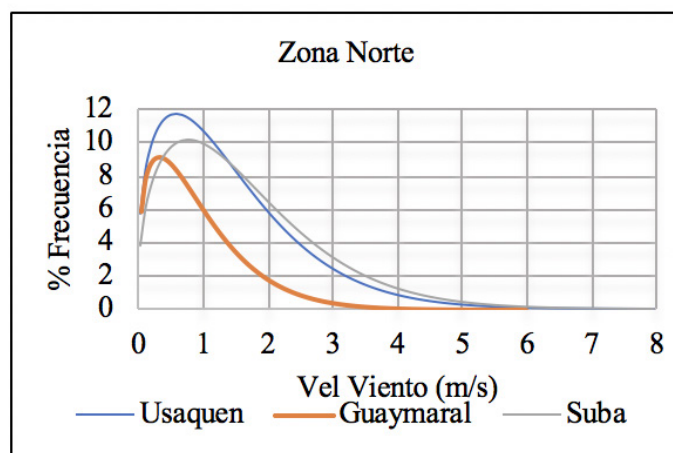


Figura 4. Distribuciones de probabilidad Weibull para la zona norte de la ciudad de Bogotá
Fuente: Los autores

Tabla 3.

Parámetros estadísticos de las estaciones de la zona norte

| Estación | Media (m/s) | Desviación Estándar (m/s) | K | Λ | Vel. máx. (m/s) | Hora máx. |
|-----------|-------------|---------------------------|-------|-----------|-----------------|-----------|
| Guaymaral | 0,941 | 0,762 | 1,279 | 1,016 | 5,4 | 12:00 |
| Usaquén | 1,433 | 1,025 | 1,362 | 1,56 | 7,0 | 14:00 |
| Suba | 1,644 | 1,660 | 1,43 | 1,81 | 7,7 | 14:00 |

Fuente: Los autores

Tabla 4.

Frecuencias de velocidad del viento para la zona norte

| Estación | Intervalos de clase (Viento m/s) | | | | |
|-----------|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|----------|
| | [0,00, 2,00) | [2,00, 4,00) | [4,00, 6,00) | [6,00, 8,00) | ≥ 8 |
| Guaymaral | 87,2 % | 12,6 % | 0,1 % | 0,0 % | 0,0 % |
| Suba | 66,0 % | 28,7 % | 5,2 % | 0,1 % | 0,0 % |
| Usaquén | 72,6 % | 25,1 % | 2,2 % | 0,1 % | 0,0 % |

Fuente: Los autores

Esta zona de la ciudad registra la media más baja en la estación Guaymaral, con un valor de 0,941 m/s, el cual es un valor cercano pero que se encuentra por debajo con respecto a lo determinado por los informes de la SDA para los años 2013, 2014 y 2015, seguido por las estaciones Usaquén y Suba (en orden ascendente). Así mismo, la media general para esta zona es de 1,33 m/s, siendo la zona más baja de la ciudad en cuanto a la magnitud de la velocidad del viento.

Zona Centro

Contrario a lo encontrado en la zona norte, en la zona centro no se presenta una relación directamente proporcional entre el valor más alto de velocidad máxima y la mayor desviación estándar (Tabla 5), ya que la velocidad máxima se registró en la estación Ministerio de Medio Ambiente con un valor de 9,2 m/s, esto debido posiblemente a su cercanía con los cerros orientales y por consiguiente al efecto valle montaña (Tullot, 2000), lo que puede influenciar el aumento de la magnitud de la velocidad en la zona; y la mayor desviación estándar registrada se encontró en la estación Puente Aranda, con un valor máximo de velocidad de 8,5 m/s, lo que también se puede observar con un 69,3% (Tabla 6) de ocurrencias por fuera de la media, seguramente guardando relación con las amplias colas hacia la derecha y la notable asimetría hacia la izquierda (Figura 6), descritas previamente en el análisis estadístico, indicando la mayor dispersión de los datos de velocidad en esta zona. Por último y contrario a las estaciones anteriormente descritas, la estación Centro de Alto Rendimiento, si cumple dicha relación teórica teniendo la menor desviación estándar y la velocidad máxima más baja registrada para la zona centro, lo cual es atípico debido a las condiciones de ubicación de esta estación (Figura 5). Con las anteriores desviaciones estándar se puede determinar que la estación más estable en su velocidad es

la de Centro de Alto Rendimiento, y la más variable la de Puente Aranda.



Figura 5. Estación Centro de Alto Rendimiento

Fuente: SDA (2018)

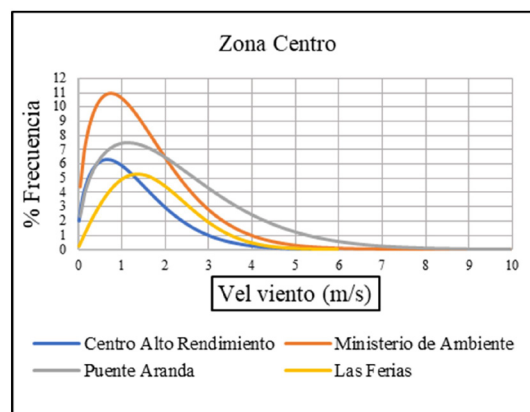


Figura 6. Distribuciones de probabilidad Weibull para la zona centro de la ciudad de Bogotá

Fuente: Los autores

Tabla 5.

Parámetros estadísticos de las estaciones de la zona central

| Estación | Media (m/s) | Desviación Estándar (m/s) | K | Λ | Vel máx (m/s) | Hora máx |
|-----------------------------------|-------------|---------------------------|-------|-----------|---------------|----------|
| Centro de Alto Rendimiento | 1,325 | 0,916 | 1,47 | 1,464 | 5,6 | 15:00 |
| Ministerio de Ambiente | 1,531 | 1,115 | 1,45 | 1,689 | 9,2 | 13:00 |
| Las Ferias | 1,757 | 0,947 | 1,952 | 1,982 | 6,0 | 14:00 |
| Puente Aranda | 2,233 | 1,528 | 1,475 | 2,468 | 8,5 | 14:00 |

Fuente: Los autores

Tabla 6.

Frecuencias de velocidad del viento para la zona centro

| Estación | Intervalos de clase (Viento m/s) | | | | |
|----------------------------|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|----------|
| | [0,00, 2,00) | [2,00, 4,00) | [4,00, 6,00) | [6,00, 8,00) | ≥ 8 |
| Centro de Alto Rendimiento | 76,1 % | 22,8 % | 1,0 % | 0,0 % | 0,0 % |
| Ministerio de Ambiente | 71,8 % | 24,1 % | 3,9 % | 0,3 % | 0,0 % |
| Las Ferias | 61,6 % | 36,0 % | 2,4 % | 0,0 % | 0,0 % |
| Puente Aranda | 52,5 % | 30,7 % | 14,9 % | 1,9 % | 0,0 % |

Fuente: Los autores

En lo que respecta a las medias de la velocidad del viento y en relación con la zona norte, no se reconoce un patrón claramente identificable, ya que se observa un incremento de velocidad en la estación Las Ferias, seguido de una reducción que se presenta en la estación Centro de Alto Rendimiento, para darse nuevamente un aumento de la velocidad en Puente Aranda, siendo esta estación la que presenta la mayor media para la zona, en concordancia con lo mostrado por los informes de la SDA de los años 2013, 2014 y 2015. Con lo anterior, y teniendo en cuenta que Puente Aranda registra tanto la media como la desviación más alta para esta zona, se puede identificar un comportamiento anómalo para la velocidad del viento en la zona industrial de la ciudad, el cual puede estar en relación con el incremento gradual de la velocidad del viento encontrado por el estudio de la calidad del aire para Bogotá (Gaitán, *et al.*, 2007). Finalmente, la media general para la zona centro es de 1,71 m/s, e igualmente se puede identificar que los máximos se presentaron en horas de la tarde.

Zona sur

Al igual que en la zona norte, y contrario a lo encontrado en la centro, la zona sur también presenta una relación directamente proporcional entre la desviación estándar y los máximos presentados, ocurridos también en horas de la

tarde, siendo la estación Tunal la que posee la menor desviación estándar y el máximo más bajo, con valores de 0,710 m/s y respectivamente, en contraste con Kennedy que presenta los más altos para estos valores (Tabla 7). Por consiguiente, se puede identificar que la mayor estabilidad en la velocidad del viento se da en la estación Tunal, con un 10,7% de ocurrencias por fuera del rango de la media (Tabla 8).

Según lo analizado para las medias en la zona sur de la ciudad, se puede identificar un incremento gradual de la velocidad media desde la estación Tunal, seguido por la estación Carvajal y finalizando en la estación Kennedy, esta última presentando el valor más alto para todas las estaciones analizadas, lo que concuerda con lo determinado por los informes de calidad del aire de la SDA en los años 2013, 2014 y 2015. Por último, la media general para esta zona es de 1,84 m/s, siendo así la media general más alta de las tres zonas y en la cual se presentan mayores variaciones en la velocidad del viento, tal como se mencionó anteriormente en el análisis general de las asimetrías. En contraposición, la estación San Cristóbal se encuentra por fuera de este incremento gradual, debido a la influencia que ejercen los cerros orientales sobre la misma.

En general, las medias promedio de cada zona permiten establecer un incremento de la velocidad del viento del norte

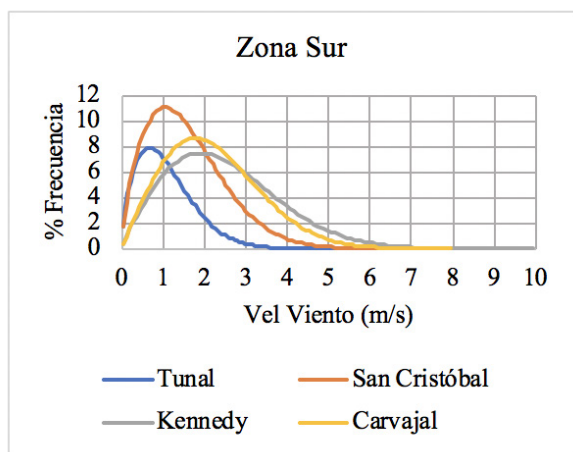


Figura 7. Distribuciones de probabilidad Weibull para la zona sur de la ciudad de Bogotá

Fuente: Los autores

al sur de la ciudad, ya que, para la zona norte, centro y sur, se presentan medias generales de 1,33 - 1,71 - 1,84 m/s, las cuales se clasifican como ventolinillas según la escala Beaufort (WMO, 2015). Igualmente, la media general para la ciudad es de 1,65 m/s, valor que se encuentra muy próximo a lo determinado por el estudio de FOPAE & IDEAM (2007) y por Burgos *et al.*, (2015); no obstante esta media difiere del análisis de la calidad del aire realizado por Gaitán, *et al.*, (2007), esto debido posiblemente a un inadecuado tratamiento estadístico de los datos de la velocidad del viento, y a la poca selección de estaciones para el estudio.

4.2 Análisis de la dirección del viento

A continuación, se muestran los gráficos de las rosas de los vientos multianuales y mapas con las rosas de los vientos georreferenciadas espacialmente para la zona norte, centro y sur de la ciudad:

Zona Norte

Para la zona norte de la ciudad, se identifica una predominancia de vientos del sursureste en la estación Usaquén (U) con una distribución de frecuencia de 18,66%, y velocidades de hasta 8 m/s (Tabla 4), respecto al rumbo predominante, sursureste, se observa una mayor ocurrencia de vientos de hasta 4 m/s, representando el 94,5% de eventos en esa dirección y del norte para Guaymaral (G) con un conteo de eventos de 11,85%, con vientos hasta los 6 m/s, de los cuales para ese rumbo el 99,73% de los vientos tienen magnitud de hasta 2 m/s, además se resalta que en esta estación existe una importante incidencia de vientos del este tal como se puede ver en la rosa de vientos (Figura 8), donde se presentan las mayores velocidades, hasta los 4 m/s. Situación que permite observar dos importantes corrientes, la primera proveniente de los cerros orientales debido al efecto valle montaña (IDEAM, 2017), y la segunda del norte, según lo observado por la rosa de vientos para Guaymaral (Figura 8). De la misma manera, la corriente de norte es recibida por la estación de Suba (S) que presenta una dominancia de vientos del nornoreste, con una ocu-

Tabla 7.

Parámetros estadísticos de las estaciones de la zona sur

| Estación | Media | Desviación Estándar (m/s) | K | Λ | Vel máx (m/s) | Hora Max |
|---------------|-------|---------------------------|-------|-----------|---------------|----------|
| Tunal | 1,089 | 0,710 | 1,624 | 1,216 | 5,2 | 14:00 |
| San Cristóbal | 1,577 | 0,939 | 1,704 | 1,768 | 7,5 | 14:00 |
| Carvajal | 2,215 | 1,143 | 2,022 | 2,5 | 6,5 | 15:00 |
| Kennedy | 2,485 | 1,353 | 1,93 | 2,802 | 8,2 | 15:00 |

Fuente: Los autores

Tabla 8.

Frecuencias de velocidad del viento para la zona sur

| Estación | Intervalos de clase (Viento m/s) | | | | |
|---------------|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|----------|
| | [0,00, 2,00) | [2,00, 4,00) | [4,00, 6,00) | [6,00, 8,00) | ≥ 8 |
| Tunal | 89,2 % | 10,5 % | 0,2 % | 0,0 % | 0,0 % |
| San Cristóbal | 68,4 % | 29,9 % | 1,6 % | 0,1 % | 0,0 % |
| Carvajal | 44,6 % | 47,1 % | 8,3 % | 0,0 % | 0,0 % |
| Kennedy | 42,9 % | 39,4 % | 17,2 % | 0,5 % | 0,0 % |

Fuente: Los autores

rencia del 18%, y magnitudes hasta los 6 m/s, un 99,72% de los eventos, en contraste también se observa que en esta estación los máximos de velocidad se encuentran más hacia el este de la estación, con velocidades de hasta 8 m/s, lo que puede ser originado por un posible rozamiento de los vientos provenientes del este con el Cerro La Conejera (Figura 9), originando un efecto cañón local que reduce el área superficial de contacto con el fluido, aire, aumentando su velocidad.

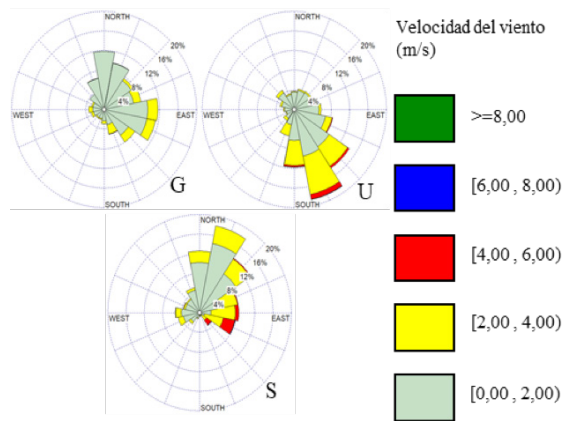


Figura 8. Rosas de los vientos para la zona norte de la ciudad de Bogotá
Fuente: Los autores

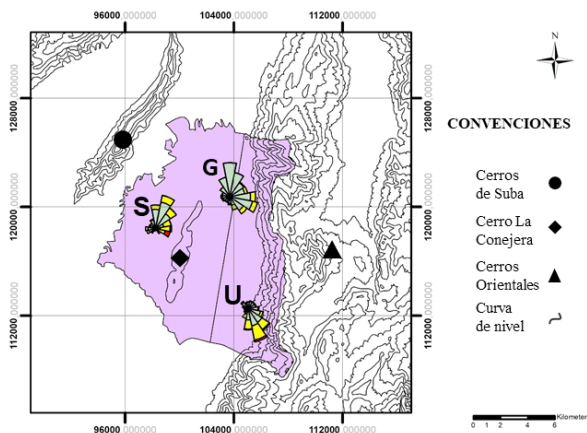


Figura 9. Rosas de los vientos georreferenciadas espacialmente para la zona norte
Fuente: Los autores

Las anteriores direcciones predominantes difieren levemente de las determinadas por los informes de calidad del aire de la SDA para los años 2014 y 2015, siendo que para las estaciones de Guaymaral (G), Usaquén (U) y Suba (S) se registran vientos con direcciones predominantes hacia el este, sur y noreste respectivamente, debido a que emplean una división de ocho rumbos, y no por las 16 divisiones utilizadas en el presente estudio, las cuales permiten identificar con mayor precisión pequeños cambios en la dirección del viento (de la Cruz, 2009), algo que es fundamental para los

estudios en la ciudad, debido a que la rugosidad del terreno influye fuertemente en el régimen de vientos (Berndt y Haberlandt, 2018).

Zona centro

Para la zona centro de la ciudad, se identifica que la estación Las Ferias (F) muestra una mayor predominancia de vientos que soplan del noreste, lo que coincide con los informes desarrollados por la SDA en los años 2014 y 2015, con una frecuencia de 13,64% con respecto al total registrado para la estación, y en cuanto a esta dirección se observa una frecuencia de 75,87% de velocidades de hasta 2 m/s (Figura 10), igualmente, se observa una importante incidencia de vientos del este con 13,19% de frecuencias y un registro de 64,89% de velocidades hasta de 4 m/s, de igual forma se observa que para este rumbo se dieron las velocidades más altas con 7,42% de ocurrencias hasta de 6 m/s magnitud. Así mismo, se observa que la estación Ministerio de Ambiente (M.A), presenta predominancia de vientos que soplan del este, con una frecuencia de 76,48% de velocidades de hasta 2 m/s (Figura 10). Con lo anterior, se puede establecer una importante influencia de vientos provenientes del este para las estaciones anteriormente mencionadas, debido principalmente al efecto valle – montaña (IDEAM, 2017), producto de la cercanía con los cerros orientales.

A diferencia de las estaciones anteriormente expuestas, la estación de Centro de Alto rendimiento (C.A.R), presenta una amplia variabilidad en las direcciones (Figura 10), siendo su predominancia el oeste con un 9,51% de frecuencia con respecto al total de datos para la estación, y magnitudes de hasta 2 m/s que representan el 74,97% de registros para esta dirección, en la cual también se presentan las máximas velocidades que no sobrepasan los 6 m/s y representan un 3,6% de frecuencia. Igualmente, se observan incidencia de vientos provenientes del este sureste, dirección que representa el 7,58% en frecuencia, pero en la cual se presenta una mayor ocurrencia de vientos no mayores a 6 m/s. La situación descrita anteriormente, permite observar que la mayor predominancia en las direcciones para la estación de Centro de Alto Rendimiento son del oeste, pero que las mayores velocidades se presentan del este, tal como lo determinan los informes anuales de la SDA para los años 2014 y 2015.

Por último, la estación de Puente Aranda (P.A) presenta el comportamiento mas variable de todas las estaciones en esta zona, ya que su rosa de los vientos muestra amplias variaciones en la magnitud y dirección del viento, siendo su dirección predominante del sur sureste (Figura 10), para la cual le corresponde una frecuencia de 10,64% del total para la estación, con un 38,14% de velocidades de hasta 4 m/s.

Del mismo modo, se puede observar una una ocurrencia de 35,90% para velocidades entre el intervalo $4 < 6$ m/s, así como de velocidades de hasta 8 m/s para las cuales corresponde una frecuencia de 5,54% del total de vientos registrados en esta dirección. Al respecto es importante señalar que esta predominancia en la dirección no concuerda con el estudio realizado por Palacio *et al.*, (2014) y difiere ligeramente con los informes de la SDA.

Al igual que la estación Centro de Alto Rendimiento (C.A.R.), la estación Puente Aranda (P.A) presenta una variación en su regimen de vientos con importante incidencia de vientos provenientes del oeste noroeste y noroeste (Figura 11), lo que indica una convergencia de los vientos hacia el centro de la ciudad, originando una recirculación de los flujos del mismo, provenientes tanto del sur como del norte, tal como lo menciona FOPAE & IDEAM (2007) y lo muestra la Figura 15, que para su adecuada explicación se requiere del desarrollo de un estudio que analice a profundidad situaciones locales u otros factores que influyan en dicho comportamiento. Con lo anterior, se puede afirmar que en la zona centro de la ciudad se presentan ciertas anomalías en las direcciones del viento, siendo las estaciones Centro de Alto Rendimiento y Puente Aranda las que mas varían en su dirección debido posiblemente a factores locales tales como la rugosidad, isla de calor o la contaminación atmosférica que pueden alterar las principales variables de la atmósfera (WMO, 1984), por lo tanto se requieren otro tipo de estudios o una profundización para explicar estos fenómenos locales.

Con respecto a los estudios encontrados para esta zona, cabe destacar el estudio realizado por Burgos *et al.*, (2015) que al analizar la dirección predominante en los meses de diciembre de 2014 a enero de 2015 para la estación

meteorológica ubicada en la Universidad Los Libertadores que se encuentra en la localidad de Chapinero, concuerda con lo registrado por la estación Centro de Alto Rendimiento (C.A.R.), que presenta vientos predominantes hacia el este y este sureste.

Zona Sur

Para la Zona Sur se identifica que la estación San Cristóbal (S.C) presenta una predominancia de los vientos del este, lo que concuerda con los informes anuales de calidad del aire para la ciudad realizados por la SDA en los años 2014 y 2015, además, cuenta con una distribución de frecuencia del 33,27% para esta dirección, donde las velocidades de hasta 4 m/s son las que presentan un mayor porcentaje de ocurrencia, 97,50%, también, se pueden observar velocidades hasta de 8 m/s, esto debido al efecto valle - montaña (Rampanelli *et al.*, 2003) tal como se identificó en las zonas norte y centro de la ciudad debido a su cercanía a los cerros orientales. Por otro lado, la estación Tunal (T) presenta una predominancia de vientos que provienen del sur, lo que corresponde con lo mostrado por los informes de la SDA anteriormente citados, y con un porcentaje de ocurrencia de 27,59% correspondientes a velocidades no mayores a 4 m/s, sin embargo, el 96,16% de los eventos que se presentan son velocidades por debajo de 2 m/s. En contraste, la estación Carvajal (C) recibe una influencia del viento con dirección sur sureste y un porcentaje de ocurrencia para este rumbo de 30,23%, siendo el 64,24% vientos con mayor incidencia de velocidades entre 2 y 4 m/s. Así mismo, la estación Kennedy (K), también recibe vientos provenientes del sureste (Figura 12) con una frecuencia de 17,98%, donde el 62,96% de las velocidades se encuentran en el rango de [2, 4) m/s.

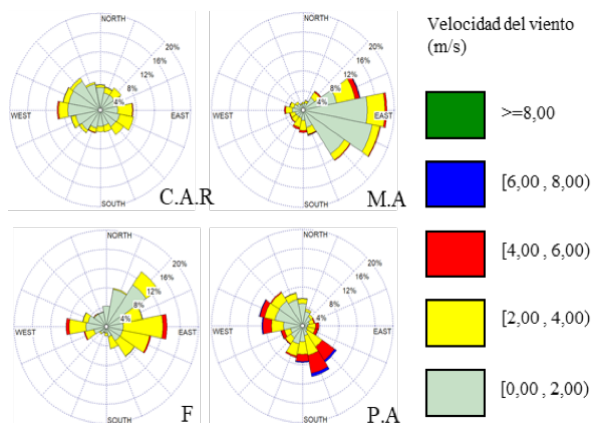


Figura 10. Rosas de los vientos para la zona centro de la ciudad de Bogotá
Fuente: Los autores

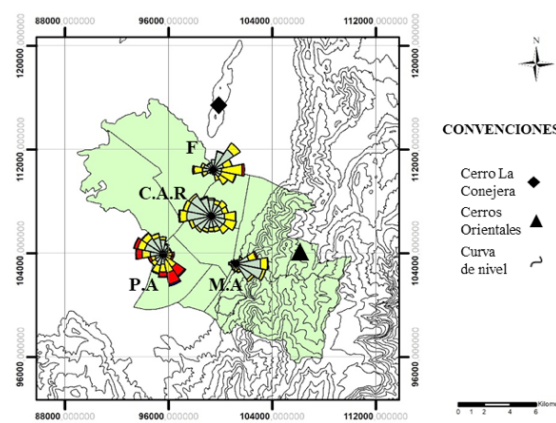


Figura 11. Rosas de los vientos georreferenciadas espacialmente para la zona centro
Fuente: Los autores

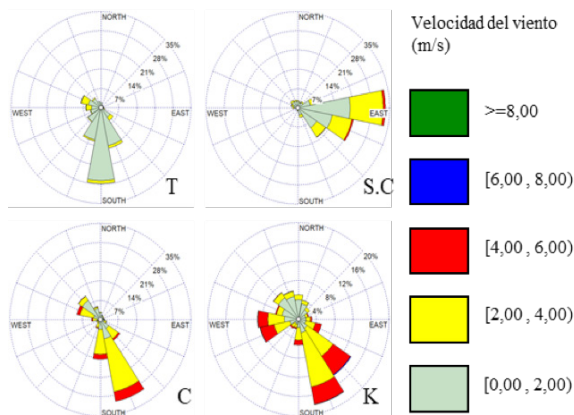


Figura 12. Rosas de los vientos para la zona sur de la ciudad de Bogotá
Fuente: Los autores

Finalmente, lo anterior permite identificar dos corrientes de vientos que influyen en el comportamiento de la dirección en esta zona de la ciudad, siendo estos vientos que soplan del este tal como lo indica la estación San Cristóbal y vientos provenientes de sur como muestra la estación Tunal (Figura 13), lo que coincide con los informes de calidad del aire de la SDA.

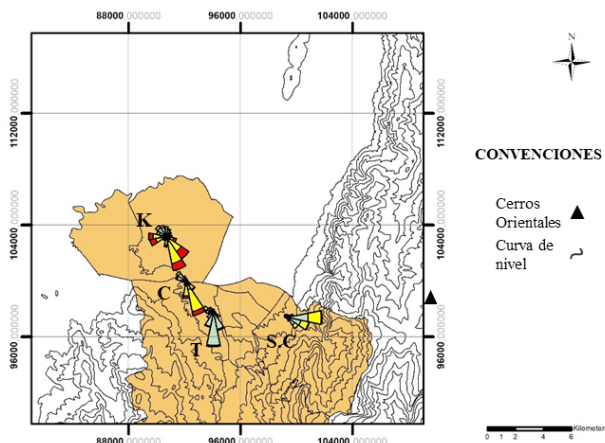


Figura 13. Rosas de los vientos georreferenciadas espacialmente para la zona sur
Fuente: Los autores

4.3. Análisis espacial

Para el análisis espacial multianual se puede afirmar que en la ciudad de Bogotá se identificaron tres corrientes de vientos (Figura 14): la primera proveniente del noreste tal como se puede observar en las estaciones Guaymaral (G) y Suba (S). La segunda con las estaciones más cercanas a los cerros orientales siendo estas Usaquén (U), Ministerio de Ambiente (M.A) y San Cristóbal (S.C), que muestran predominancia de vientos que soplan del este y sus respectivas subdirecciones. Y la tercera, de vientos provenientes del sureste, tal

como lo muestran las estaciones Tunal (T), Carvajal (C) y Kennedy (K).

Con el mapa, se permite ver una confluencia de estas tres corrientes al centro de la ciudad, tal como se muestra en Figura 14 y por el análisis desarrollado por la investigación de FOPAE & IDEAM (2007). Dicha confluencia ocurre en las estaciones Puente Aranda (PA) y Centro de Alto Rendimiento (C.A.R), al ser estas las estaciones que muestran una mayor variación en su dirección a través de los años analizados. Dicho comportamiento anómalo de estas estaciones puede deberse a la presencia de factores locales como cañones urbanos en las áreas con mayor densificación de edificios altos (Lipp, 2014), que para el caso de Bogotá es el centro histórico según lo mencionado por Rueda y Rueda (2005), lo que altera el régimen de los vientos, tal como se menciona en el informe sobre la conferencia de la climatología urbana y sus aplicaciones con especial referencia a las regiones tropicales por la WMO (1984).

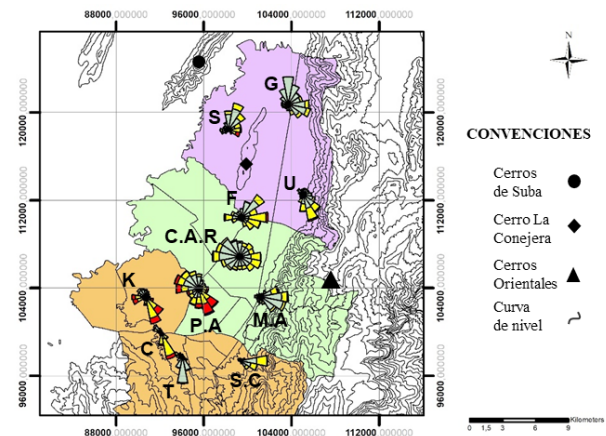


Figura 14. Rosas de los vientos georreferenciadas espacialmente para la ciudad de Bogotá
Fuente: Los autores

4.4 Análisis vectorial

A continuación, se muestra el mapa geoestadístico elaborado a través del método de interpolación Co-Kriging para la velocidad del viento, así como el campo vectorial que representa la predominancia de la dirección del viento en el periodo analizado (2010 – 2016).

Se puede evidenciar que la mayor incidencia de vientos débiles, se presenta hacia el norte de la ciudad y en cercanías a los cerros orientales, así como en el centro geográfico de la ciudad, que es donde se concentra la mayor cantidad de edificaciones de gran altura, según lo establecido por Rueda y Rueda (2005), lo que modifica la rugosidad de la superficie por donde fluye el viento y por consiguiente se da un aumento gradual de su magnitud hacia el suroeste de

la ciudad, identificándose las mayores velocidades sobre las localidades de Kennedy y Bosa con valores promedio entre 2,2 y 2,4 m/s, en concordancia con lo mencionado por los informes de calidad del aire de la SDA para los años de 2014 y 2015. Sin embargo, cabe resaltar que la interpolación Co-Kriging (Luo *et al.*, 2008) utilizada para la construcción del mapa vectorial (Figura 15) muestra una mejor representación del comportamiento del viento en cercanías a los cerros orientales, en comparación con el mapa mostrado en los informes por la Secretaría, elaborado con el método Kriging simple, en donde se pueden identificar errores en la interpolación en forma de punto de concentración de datos -ojo de buey- (Fortis *et al.*, 2010), evidenciando que el método utilizado por la SDA no logra relacionar los valores de las estaciones cercanas a los cerros orientales con otros puntos donde el viento sopla con la misma magnitud de velocidad. De igual forma, lo determinado por el mapa vectorial difiere de lo establecido por la investigación desarrollada por Burgos *et al.* (2015) que determinaron que la velocidad media para el área urbana de Bogotá es de 1,72 m/s, razón por la cual resulta necesario ampliar los estudios de energía eólica hacia el sureste de la ciudad, incluyendo más estaciones para el análisis y ampliando el periodo de estudio.

Por otra parte, y teniendo en cuenta lo mencionado por el estudio desarrollado por Aragón, Castañeda y Espinosa (2019), se puede evidenciar que las áreas de mayor concentración de se presentan alrededor de la estación Carvajal (Figura 16), al oeste de la zona sur en este estudio, lo que coincide con las áreas en donde se presenta mayor velocidad del viento (Figura 15). En consecuencia y según la

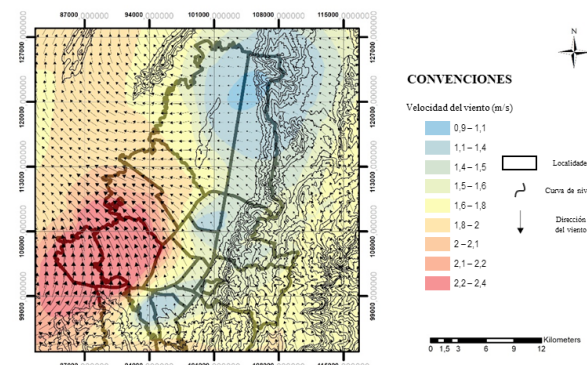


Figura 15. Interpolación Co-Kriging del vector viento

Fuente: Los autores

evidencia, se encuentra algo diferente a lo establecido por Gaitán *et al.*, (2007), quienes establecen que en esa zona no hay mayor concentración de material particulado PM_{10} por la relación entre el viento y la dispersión de este, que si bien este concepto es constante en muchos literatura, se requiere de nuevos estudios específicos de la ciudad que permitan complementar y relacionar otras variables meteorológicas con los resultados obtenidos en dicha investigación, para que tomen como objeto de estudio factores locales que puedan influenciar en los altos niveles de contaminación por PM_{10} en esta área de la ciudad.

Finalmente, los resultados obtenidos por la presente investigación permiten corroborar e identificar con mayor precisión lo afirmado por FOPAE & IDEAM (2007), con respecto al régimen de vientos para la ciudad de Bogotá, ya que en dicho estudio el análisis vectorial es muy simple y de baja

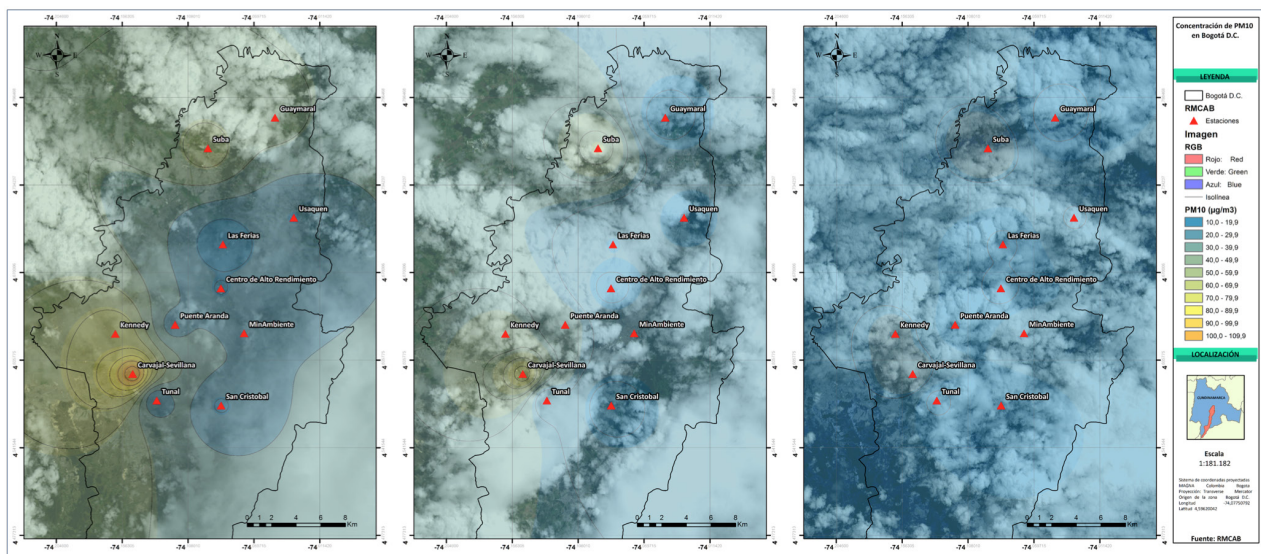


Figura 16. Mapa PM_{10} en Bogotá (27/09/2013, 31/07/2015, 04/07/2017)

Fuente: Aragón *et al.*, (2019)

resolución, perdiéndose así detalles locales, especialmente en Puente Aranda (P.A) y Centro de Alto Rendimiento (C.A.R). En consecuencia, tal como se pudo determinar en los resultados, la utilización de un periodo amplio, así como de una adecuada selección de estaciones meteorológicas que abarquen una mayor cobertura espacial, permiten analizar con mayor precisión la variable del viento. Además, se sienta una base para el desarrollo de futuras investigaciones que tengan como objetivo identificar diferencias entre zonas urbanas y rurales para la sabana de Bogotá y fenómenos locales tales como cañones urbanos, recirculación de corrientes de viento, entre otras, producto de la transformación antropogénica, así como diversos estudios que requieran de un análisis climatológico urbano de la variable viento tales como la dispersión de contaminantes, emplazamiento de aerogeneradores eléctricos, planeación urbana, etc.

5. Conclusiones

Según lo observado por el análisis estadístico de la distribución Weibull, para la ciudad de Bogotá no se da la relación teórica establecida para el factor de forma k , ya que no se presenta una estabilidad en la velocidad del viento según lo encontrado para la amplitud de datos en el análisis estadístico, no obstante, el factor de escala λ , que permite medir la medida de dispersión de la distribución, si mostró una clara relación con la dispersión de los datos, tal como lo sustenta la teoría y en concordancia con lo observado por las desviaciones estándar. Así mismo, las medias promedio de cada zona permiten establecer un incremento de la velocidad del viento del norte al sur de la ciudad, ya que, para la zona norte, centro y sur, se presentan medias generales de 1,33 - 1,71 - 1,84 m/s, respectivamente. De igual forma, se identifica que los máximos para la magnitud del viento se presentan en horas de la tarde, posiblemente relacionado a que en este periodo de tiempo se alcanza la mayor temperatura en todas las estaciones.

En cuanto a la dirección del viento se identificó que un análisis mediante la división de 16 rumbos co-colaterales, permite establecer con mayor exactitud la procedencia de los vientos, debido a lo anterior, se logró identificar una amplia variabilidad en las estaciones C.A.R y P.A, debido al paso de los vientos por las altas edificaciones del centro geográfico de la ciudad, dando paso al cañón urbano y a otros factores locales, en contraste con las demás estaciones, las cuales presentan una mayor predominancia de los este, debido a la influencia del efecto valle - montaña que ejercen los cerros orientales.

Por último, el método de interpolación Co-Kriging permitió identificar una confluencia de los vientos, así como de las mayores velocidades, en el sur-oeste de la ciudad,

lo que permite describir de una manera más adecuada el comportamiento del régimen de vientos en la ciudad de Bogotá, mostrando una menor presencia de errores en la interpolación conocidos como “Ojos de buey”, como se ha observado en estudios previos.

En contraste con el tratamiento estadístico y espacial utilizado por los otros estudios de vientos para Bogotá, el que se desarrolló en la presente investigación logra describir de manera más detallada el régimen de circulación atmosférica en la ciudad de Bogotá, lo que da lugar a que futuras investigaciones en las que el comportamiento del viento resulta indispensable, tales como la energía eólica o la dispersión de contaminantes, puedan desarrollarse de una forma más consistente. ■■■

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias bibliográficas

1. ALEMANY, Vicent Espert y JIMÉNEZ, P. Amparo López. Dispersión de contaminantes en la atmósfera. *Meteorología y Climatología* Valencia: Alfaomega, 2004. p. 47-50
2. ALBENTOSA SÁNCHEZ, Luis Miguel. *Climatología y Medio Ambiente*. Barcelona: Universidad de Barcelona, 1990. p. 611
3. ALFARO MARTÍNEZ, Eric J. y SOLEY, Francisco J. Descripción de dos métodos de rellenado de datos ausentes en series de tiempo meteorológicas. *En: Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*. 2009, vol. 16, no. 1, p. 60-75 <https://doi.org/10.15517/RMTA.V16I1.1419>
4. ARAGÓN, Juan; CASTAÑEDA, Paula y ESPINOSA, Laura. An approach for the identification of particulate matter in the clouds of Bogotá using satellite imagery analysis. *En: INGENIERÍA Y UNIVERSIDAD: ENGINEERING FOR DEVELOPMENT*. Junio, 2019. vol. 23, no. 2, p. 1-26 <https://doi.org/10.11144/javeriana.iyu23-2.aipm>
5. AWS TRUEPOWER. Windographer. 2018. [En línea] Disponible en: <https://bit.ly/2AiEzCk>
6. BERNDT, C y HABERLANDT, Uwe. Spatial interpolation of climate variables in Northern Germany—Influence of temporal resolution and network density. *En: Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2018. vol. 15, p. 184-202 <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.02.002>
7. BRENES, Álvaro y SABORÍO, Víctor. Elementos de climatología: Su aplicación didáctica a Costa Rica. [s.l.]: Universidad Estatal a Distancia, 1995. p. 20
8. BURGOS GUTIÉRREZ, Mónica; ALDANA ÁVILA, Sergio y RODRÍGUEZ PATARROYO, Diego. Análisis del recurso energético eólico para la ciudad de Bogotá DC para los meses de diciembre y enero. *En: AVANCES Investigación en Ingeniería*, 2015. vol. 12, no. 2. <http://>

- www.unilibre.edu.co/revistaavances/14/analisis-del-recurso-energetico-eolico-para-la-ciudad-de-bogota.pdf
9. CHAURASIYA, Prem Kumar; AHMED, Siraj y WARUDKAR, Vilas. Study of different parameters estimation methods of Weibull distribution to determine wind power density using ground based Doppler SODAR instrument. *En: Alexandria Engineering Journal*, 2017. vol. 57, p. 2299-2311 <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.08.008>
 10. DE LA CRUZ, Reyes Arenales. Vientos, rumbos y direcciones en el horizonte: el nacimiento de una terminología científica en el Renacimiento. *En: Cuadernos del Instituto de Historia de la Lengua*, 2009, no. 3, p. 165-200 <https://www.cilengua.es/sites/cilengua.es/files/book/5457/6cilengua-vientosrumbosydirecciones.pdf>
 11. EL-SHIMY, M. Adequacy-based placement of WECS in Egypt. *En: Power System Conference*, 2008. MEPCON 2008. 12th International Middle-East. IEEE, 2008. p. 617-623 <https://doi.org/10.1109/MEPCON.2008.4562325>
 12. ESLAVA RAMÍREZ, Jesús Antonio. Climatología y Diversidad Climática de Colombia. *En: Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. Marzo, 1993. vol. 18, no. 71, p. 507-538 http://accefyn.com/revista/Volumen_18/71/508-538.pdf
 13. FAZELPOUR, Farivar; MARKARIAN, Elin y SOLTANI Nima. Wind energy potential and economic assessment of four locations in Sistan and Baluchestan province in Iran. *En: Renewable Energy*. Marzo, 2017. vol. 109, p. 646-667 <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.072>
 14. FOPAE & IDEAM. Estudio de la caracterización climática de Bogotá y cuenca alta del río Tunjuelo. Bogotá D.C.: [s.n.], 2007 [En línea] Disponible en: < <https://bit.ly/2KwLFb9> >. p. 116
 15. FORTIS-HERNÁNDEZ, Manuel; HUERTA GARCÍA, Alexis; SEGURA CASTRUITA, Miguel Ángel; GARCÍA HERNÁNDEZ, José Luis; LEOS RODRÍGUEZ, Juan A.; GARCÍA SALAZAR, Alberto; VALDEZ CEPEDA, Ricardo. Validación de cuatro modelos de interpolación para cartografiar nitrato y amonio en suelo. *En: Terra Latinoamericana*, 2010. vol. 28, no. 4, p. 371-379
 16. GAITÁN, Mauricio; CANCINO, Juana y BEHRENTZ, Eduardo. Análisis del estado de la calidad del aire en Bogotá. *En: Revista de ingeniería*. Universidad de los Andes. Noviembre, 2007. no. 26, p. 81-92 <http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n26/n26a11.pdf>
 17. GIANOPOULOU, K.; SANTAMOURIS, M.; LIVADA, I.; GEORGAKIS, C. y CAOURIS, Y. The impact of canyon geometry on intra urban and urban: Suburban night temperature differences under warm weather conditions. *En: Pure and applied geophysics*, 2010. vol. 167, p. 1433-1449 <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0099-8>
 18. GOZDOWSKI, J.; STĘPIEŃ, M.; SAMBORSKI, S.; DOBERS, E. S.; SZATYŁOWICZ, J. y CHORMAŃSKI, J. Prediction accuracy of selected spatial interpolation methods for soil texture at farm field scale. *En: Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2015. vol. 15, no. 3, p. 639-650 <https://doi.org/10.4067/S0718-95162015005000033>
 19. HOMER ENERGY. HOMER Pro 3.11. 2018. [En línea] Disponible en: <<https://bit.ly/2r4VNpP>>
 20. IDEAM. Protocolo para el control de calidad de la información meteorológica en las etapas de obtención, evaluación, verificación, cálculo y procesamiento, 2005. [En línea] Disponible en: <<https://bit.ly/2GtKqZA>>
 21. IDEAM. Atlas Climatológico de Colombia. Distribución espacio-temporal de las variables del clima, (2005a). [En línea] Disponible en: <<https://goo.gl/BpcNAA>> p. 49
 22. IDEAM. Atlas de viento de Colombia, 2017. [En línea] Disponible en: <<https://goo.gl/6FNmig>> p. 157
 23. JABLONSKI, A.; BARSZCZ, T.; BIELECKA, M. y BREUHAUS, P. Modeling of probability distribution functions for automatic threshold calculation in condition monitoring systems. *En: Measurement*, 2013. vol. 46, no. 1, p. 727-738 <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.09.011>
 24. JOHNSON, Richard W. Handbook of Fluid Dynamics. CRC Press, 2016. p. 7-1
 25. KALPAGE, K. M. T., PEIRIS, K. R. D., PERERA, K. A. I. R. P., SIRIWARDANA, M. G. C. I., LIDULA, N. W. A. y WICKRAMARATHNA, M. T. A. P. Wind Resource Assessment and Turbine Selection: Case Study for Mannar Sri Lanka. *En: Electrical Engineering Conference (EEcon)*, University of Moratuwa, Sri Lanka. 2015. p. 8 <http://www.eesoc.lk/eeconweb/EECon%202015%20Proceedings/TP2.pdf>
 26. LETELIER, Jaime; SOTO MARTONES, Luis; SALINAS, Sergio; OSUNA, Pedro; LÓPEZ, Diego; H. SEPULVEDA, Héctor; PINILLA, Elías; RODRIGO, Cristian. Variabilidad del viento, oleaje y corrientes en la región norte de los fiordos patagónicos de Chile. *En: Revista de biología marina y oceanografía*, 2011. vol. 46, no. 3, p. 363-377 <http://doi.org/10.4067/S0718-19572011000300007>
 27. LI, H.; MEIER, F.; LEE, X.; CHAKRABORTY, T.; LIU, J.; SCHAAP, M. y SODOUDI, S. Interaction between urban heat island and urban pollution island during summer in Berlin. *En: Science of the total environment*, Abril, 2018. vol. 636, p. 818-828 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.254>
 28. LIPP, Daniel. El cañón urbano su incidencia en la contaminación del aire. *En: Congreso Internacional de Geografía*, San Juan. 2014. [En línea] Disponible en: <<https://bit.ly/2ApuMKS>>
 29. LUO, W., TAYLOR, C. y PARKER, S. A comparison of spatial interpolation methods to estimate continuous wind speed surfaces using irregularly distributed data from England and Wales. *En: INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY*, 2008. vol. 28, no. 7, p. 947 – 959 <https://doi.org/10.1002/joc.1583>
 30. MARTÍNEZ DE OSÉS, Xavier. Meteorología aplicada a la navegación. Catalunya: Ediciones UPC, 2004. p. 55
 31. MASSERAN, Nurulkamal. Markov chain model for the stochastic behaviors of wind-direction data. *En: Energy conversion and management*, 2015, vol. 92, p. 266-274 <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.12.045>
 32. MAZZEO, Domenico; OLIVETI, Giuseppe; LABONIA, Ester. Estimation of wind speed probability density function using a mixture of two

- truncated normal distributions. En: Renewable Energy, 2018. vol. 115, p. 1260-1280 <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.043>
33. MONTENEGRO CIFUENTES, Andrés Felipe y PEÑA RODRIGUEZ, Brainer Nicolas. Análisis espacio-temporal del Material Particulado menor a 10 micras (PM10) en Bogotá y su conurbano entre los años 2010-2016. Trabajo de grado Ingeniero Ambiental. Bogotá D.C. Universidad Central, 2017. p. 26
34. ORELLANA, Liliana. Estadística Descriptiva. 2001. [En línea] Disponible en: <<https://bit.ly/2izQ9Qk>>
35. OSORIO TAI, María Elena. Estudio de la intensificación de los vientos en el puerto de Veracruz mediante modelación numérica. Maestría en ciencias de la tierra. México D.F. Universidad Nacional Autónoma de México, 2015. p. 89
36. OZAY, Can y SONER CELIKTAS, Melih. Statistical analysis of wind speed using two-parameter Weibull distribution in Alaçati region. En: Energy Conversion and Management. Abril, 2016. Vol. 121, p. 49-54 <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.026>
37. PABÓN, José Daniel, PALOMINO LEMUS, Reiner y MURILLO LÓPEZ, William. Sobre el régimen diario de las variables climatológicas en el municipio de Quibdó. En: Meteorología Colombiana. Marzo, 2005. no. 9, p. 55-66
38. PALACIO SOTO, Daniel; ZAFRA MEJIA, Carlos y RODRIGUEZ MIRANDA, Juan. Evaluación de la calidad del aire mediante un laboratorio móvil: Puente Aranda (Bogotá D.C., Colombia). En: Revista Facultad de Ingeniería. Febrero, 2014. no. 71, p. 153-166 http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302014000200014
39. POBOČÍKOVÁ, Ivana; SEDLIÁČKOVÁ, Zuzana; MICHÁLKOVÁ, Mária. Application of four probability distributions for wind speed modeling. En: Procedia engineering, 2017, vol. 192, p. 713-718 <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.123>
40. RAMÍREZ LARA, Evangelina y VIVANCO MORENO, Sonia Fabiola. Análisis de parámetros meteorológicos utilizando el modelo de la rosa de los vientos. En: Congreso Regional. 2007. [En línea] Disponible en: <<https://bit.ly/2QjnNx6>>
41. RAMPANELLI, Gabriele; ZARDI, Dino y ROTUNNO, Richard. Mechanisms of up-valley winds. En: Journal of the atmospheric sciences, 2004. vol. 61, no 24, p. 3097-3111 <https://doi.org/10.1175/JAS-3354.1>
42. RINNE, Horst. The Weibull Distribution A Handbook. CRC Press. Taylor and Francis Group. 1 ed., 2008. p. 32-34
43. RUEDA GARCÍA, Nicolas y RUEDA SINISTERRA Diego. Desarrollo Urbano y Pobreza en Bogotá D.C. Bogotá D.C: Ediciones Uniandes, 2005. p. 40-41
44. SABOOR, Abdus; BAKOUCH, Hassan S. y KHAN, Muhammad Nauman. Beta Sarhan-Zaindin modified Weibull distribution. En: Applied Mathematical Modelling, 2016. vol. 40, no. 13-14, p. 6604-6621 <https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.01.033>
45. SANTANA, Ariel; OLAVE, Carlos y BUTOROVIC, Nicolás. Estudio climatológico con registros de alta resolución temporal en campamento posesión. En: Anales del Instituto de la Patagonia (ENAP), 2010. vol. 38, no. 1, p. 5-34 <http://doi.org/10.4067/S0718-686X2010000100001>
46. SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE. Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá – RMCAB, 2017. [En línea] Disponible en: <<https://bit.ly/2IkEbZB>>
47. SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE. Informe Anual de calidad del aire de Bogotá para el año 2013. 2014. [En línea] Disponible en: <<https://bit.ly/2w8RG60>>
48. SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE. Informe Anual de calidad del aire de Bogotá para el año 2014. 2015. [En línea] Disponible en: <<https://bit.ly/2w8RG60>>
49. SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE. Informe Anual de calidad del aire de Bogotá para el año 2015. 2016. [En línea] Disponible en: <<https://bit.ly/2w8RG60>>
50. TAMAYO VÁSQUEZ, León Gustavo. Estadística. Medellín: Universidad de Medellín, 1 ed., 2008. p. 64-67
51. TAVARES LIRA, Marcos; MOITA NETO, José; LOPES DE LOIOLA, Victor; MARIANO DA SILVA, Emerson y BRABO ALVES, José. Caracterização do Regime de Ventos no Piauí Para o Aproveitamento de Energia Eólica. En: Revista Brasileira de Meteorologia. 2017. vol. 32, no. 1, p. 77-88 <https://doi.org/10.1590/0102-778632120150712>
52. THÉ, Jesse, THÉ, Cristiane y JOHNSON, Michael. WRPLOT View User Guide. Lakes Environmental Software, 2016. [En línea] Disponible en: < <https://bit.ly/2DMgJTa> >
53. TULLOT, Inocencio Font. Climatología de España y Portugal. 2. ed. Salamanca: Universidad de Salamanca, 2000. p. 86
54. WANG, Sheng; ZHANG, Yun; WARING, Michael; LO, L. James. Statistical analysis of wind data using Weibull distribution. En: Science and Technology for the Built Environment. Philadelphia. 2018. p. 1-11 <https://doi.org/10.1080/23744731.2018.1432936>
55. WILKS, Daniel S. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. 2. ed. California, Estados Unidos, Academic Press, 2006.
56. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Global Atmosphere Watch. GAW. 2016. [En línea] Disponible en: <<https://goo.gl/zoYjdi>>
57. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Guide to Climatological Practices. (Vols. WMO-No. 100) Geneva: [s.n.], 2011 https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_100_en.pdf
58. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. La climatología urbana y sus aplicaciones con especial referencia a las regiones tropicales. (Vols. OMM-N° 652) Ciudad de México: [s.n.], 1984.
59. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Manual de claves - Claves internacionales. (Vols. OMM-N° 306). Ginebra: [s.n.], 2015. p. 464 https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=9815
60. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. The role of climatological normals in a changing climate. (Vols. WCDMP-No. 61) Geneva: [s.n.], 2007. p. 8 https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4546

61. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos. (Vols. OMM-N° 8). Ginebra: [s.n.], 2014 https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_8-2014_es.pdf
62. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Guidelines on the quality control of surface climatological data. (Vols. WMO/TD-No. 111). Reino Unido: [s.n.], 1986 https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo-td_111.pdf
63. ZUÑIGA LÓPEZ, Ignacio y CRESPO DEL ARCO, Emilia. Meteorología y Climatología. Madrid: UNED, 2010.