

# Vientos disponibles para generación eólica a 10 metros de altura en San Francisco, Córdoba.

Presentación: 13 y 14 de septiembre de 2023

## Walter R. Tonini

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Francisco  
wtonini@sanfrancisco.utn.edu.ar

## Héctor O. Mina

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Francisco  
hector.omar.mina@gmail.com

## Alejandro H. A. Bailo

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Francisco  
alejandrosoliddesign.com.ar

## Emanuel A. Giordano

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Francisco  
ema\_giordano@hotmail.com.ar

## Resumen

Este trabajo realiza un análisis sobre una serie de datos medidos en la estación meteorológica de la UTN de la ciudad de San Francisco, provincia de Córdoba, a 10 metros de altura desde el suelo. Se aplicaron herramientas de estadísticas para conocer el comportamiento del viento, como la distribución de Weibull para análisis de energía y potencia disponible en la zona y la distribución de Gumbel para el análisis de vientos máximos. Se realizaron las rosas de los vientos correspondientes a intensidades, direcciones y potencias para describir lo mejor posible el recurso eólico disponible en la zona. El sistema de generación eólica aplicable a la ciudad y zona debe tener en cuenta las bajas velocidades de viento presentes y la variabilidad en su dirección.

**Palabras clave:** Recurso Eólico, Rosas de los Vientos, Distribución Weibull.

## Abstract

This work performs an analysis of a series of data measured at the UTN meteorological station in the city of San Francisco, Córdoba, at 10 meters above ground level. Statistical tools were applied to know the behavior of the wind, such as the Weibull distribution for analysis of energy and power available in the area and the Gumbel distribution for the analysis of maximum winds. The wind roses corresponding to intensities, directions and powers were made to best describe the wind resource available in the area. The wind generation system applicable to the city and area must take into account the low wind speeds present and the variability in its direction.

**Keywords:** Wind Resource, Wind Roses, Weibull Distribution.

## Introducción

Este trabajo trata de exponer la disponibilidad de vientos en la ciudad de San Francisco en la provincia de Córdoba y región central de la república Argentina, para su utilización como recurso eólico. Aprovechando los datos recolectados de la estación meteorológica perteneciente a la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Francisco; se analizó las principales variables que definen los vientos y sus características con el fin de brindar información que ayude a seleccionar cuál es el tipo y capacidad que debe tener un sistema eólico de generación instalado en la ciudad o zona, comparándolo con el modelo SIGEOLICO perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

## Metodología

El lugar seleccionado para el estudio es la ciudad de San Francisco, provincia de Córdoba, ubicada en las coordenadas de Latitud:  $-31^{\circ} 26' 13''$  y en Longitud:  $-61^{\circ} 52' 16''$ , zona central de la Argentina.

Los datos e velocidades y dirección de viento fueron obtenidos por una estación meteorológica marca Davis Instrument, modelo Vantage Pro 2 (manual DAVIS, 2023). Las mediciones de velocidades de viento y ráfagas se realizan en intervalos de 30 minutos y se expresan en km/h, donde el anemómetro está posicionado a 10 metros de altura sobre el nivel del suelo, y el sensor de temperatura ambiente a 2 metros expresada en  $^{\circ}\text{C}$ .

La base de datos seleccionada es del año 2022 completo, donde se analizó su calidad y realización de correcciones según las recomendaciones de Jijón (Jijon, 2015). Todas las velocidades de viento se cambiaron de km/h a m/s que será la unidad que utilizamos en los cálculos. Se procedió a la aplicación de herramientas de estadísticas clásicas para obtener los parámetros estadísticos como la media, desvíos estándares, frecuencias relativas, histogramas y ojivas. La aplicación de distribución de Weibull es la que mejor se ajusta a esto tipos de datos, comparándola con regresión lineal y los gráficos antes descriptos.

El trabajo se centra en comparar los resultados obtenidos al analizar los datos considerando dos escenarios:

1. Los períodos de *calma*
2. y los periodos *sin calma*, donde se excluyen los datos de vientos con velocidad menor a 0,675 m/s.

Para el análisis de vientos extremos se utilizó la distribución de Gumbel, tomando los vientos máximos mensual de un periodo más amplio de datos: entre los años 2021 y 2022 con el fin de aumentar la cantidad de datos disponibles.

Para contemplar la dirección predominante, se calcularon y crearon las Rosas de los Vientos como gráficos que ayuden al análisis de direcciones e intensidades, agregando la Rosa de Energía disponible.

## Resultado y discusión

Como primer paso se obtuvieron los parámetros estadísticos básicos para la serie de datos seleccionada para el año 2022, los que se muestran en la tabla 1.

Parámetro	Con Calma	Sin Calma
Media	3,220	3,412
Error típico	0,015	0,014
Desviación estándar	1,948	1,834
Varianza de la muestra	3,793	3,364
Curtosis	1,088	1,491
Coefficiente de asimetría	0,717	0,918
Rango	13,861	13,417
Mínimo	0,000	0,444
Máximo	13,861	13,861
Cuenta: Cantidad de datos	17520	16532

Tabla 1: Parámetros obtenidos de estadística descriptiva sobre la base de datos de velocidades de viento a 10 metros de altura durante el año 2022 en la ciudad de San Francisco.

El truncado en los datos quitando los períodos de calma cambian algunos parámetros estadísticos como son la media y la desviación estándar.

En las Figuras 1 a 3 se realizaron las rosas de los vientos correspondientes a dirección, intensidad y potencia eólica disponible para cada dirección de viento, comparando los periodos de calma con los datos sin contemplar los mismos (periodos sin calma).

En la comparación correspondiente a la Rosa de los vientos (frecuencias porcentuales) de las direcciones (Figura 1) y la Rosa de los vientos de las intensidades (Figura 2); no hay cambios muy apreciables al quitar los datos de calma. Los vientos predominantes son del NE (Noreste) y del SO (Suroeste). Esta región céntrica es afectada por el Anticiclón del Atlántico cuyos vientos predominantes son del NE en invierno y anual; mientras que en verano el anticiclón cambia haciendo que se desplace hacia el Este (NCEP/NCAR, 2023). También se puede superponer el efecto de continente, donde las temperaturas presentes en la superficie de la tierra pueden originar diversos centros de Alta Presión (AP) y Baja Presión (BP) que afecten la dirección de los vientos, diferenciándolos entre las estaciones de verano e invierno.

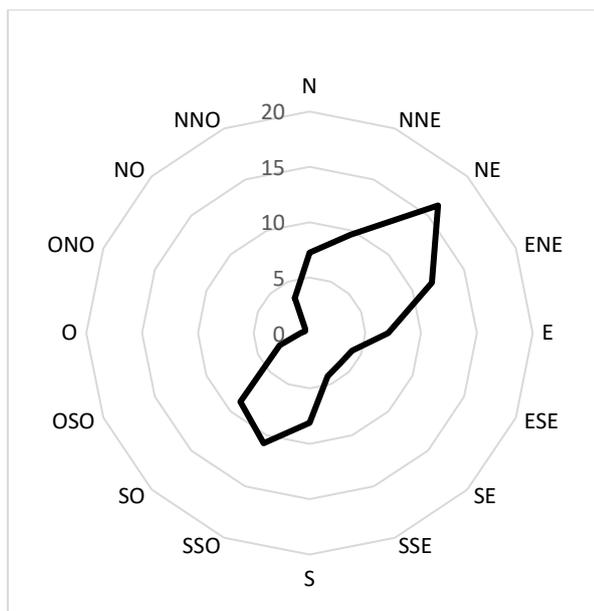


Figura 1: Rosa de los vientos (frecuencias porcentuales) de las direcciones del viento anual considerando los estados de calma (14%) para la ciudad de San Francisco, a 10 metros de altura durante el período 2022.

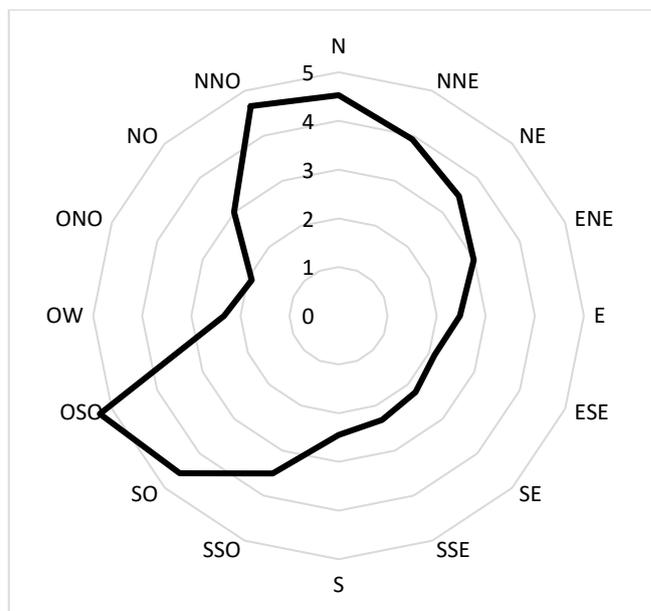


Figura 2: Rosa de los vientos de las intensidades en m/s del viento anual para la ciudad de San Francisco, a 10 metros de altura durante el período 2022.

Respecto a la potencia teórica disponible en el viento de la ciudad, se observa que existe una pequeña variación en sus Rosas de los vientos, pero se mantiene la dirección predominante de la misma y el valor de su intensidad, como se compara en la figura 3:

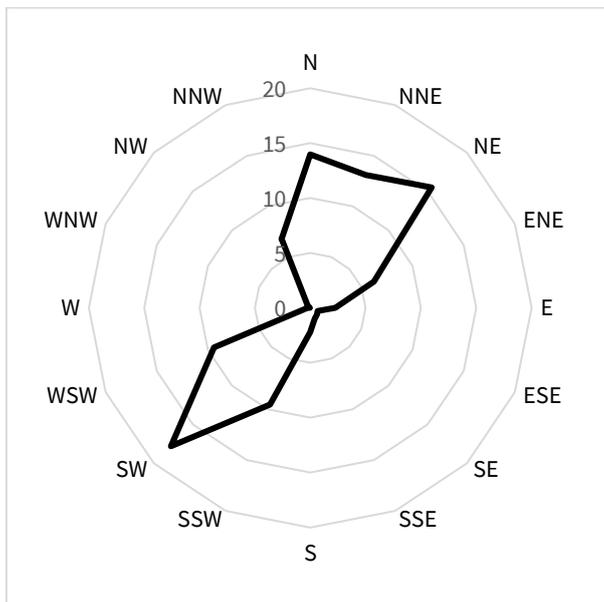


Figura 3: Rosa de los vientos de la potencia disponible en (%) del viento anual para la ciudad de San Francisco, a 10 metros de altura durante el período 2022.

En la Figura 4 se traza el histograma de las frecuencias relativas y la acumulada de los datos de viento anual para la ciudad de San Francisco, a 10 metros de altura durante el período 2022, para continuar con el análisis estadístico. Desde aquí se considera que la calma no aporta demasiado al análisis para el aprovechamiento del recurso eólico por lo que se quitan los datos que son considerados como calmas, en este caso para velocidades de viento menores a los 0,4 m/s en cualquiera de sus direcciones.

Los datos se sincretizaron en intervalos estadísticos o BIN según la siguiente ecuación de (Panofsky, 1958):

$$5 \log_{10}(N) \tag{1}$$

Donde N es la cantidad de datos disponibles.

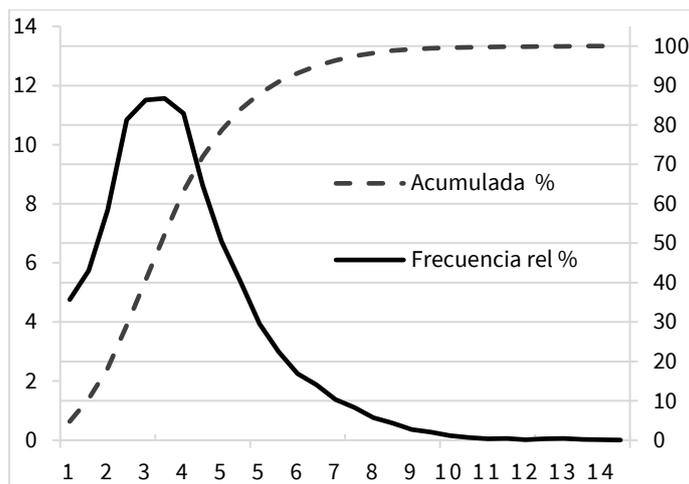


Figura 4: Histograma y Ojiva de la serie de datos correspondiente a la intensidad de vientos (en m/s) anuales SIN los estados de calma para la ciudad de San Francisco, a 10 metros de altura durante el período 2022.

Con el objeto de lograr un mejor ajuste en los datos, se utiliza la distribución estadística de Weibull y se comparan su ajuste con la frecuencia relativa de los datos, en la figura 5 se puede observar que si se considera los periodos de calma, la distribución pierde un poco de precisión en los vientos más bajos. Al quitar las calmas, el grafico se ajusta mucho mejor y se aprecia una distribución de Weibull con trazado suave que abarca todos los datos con muy buen ajuste.

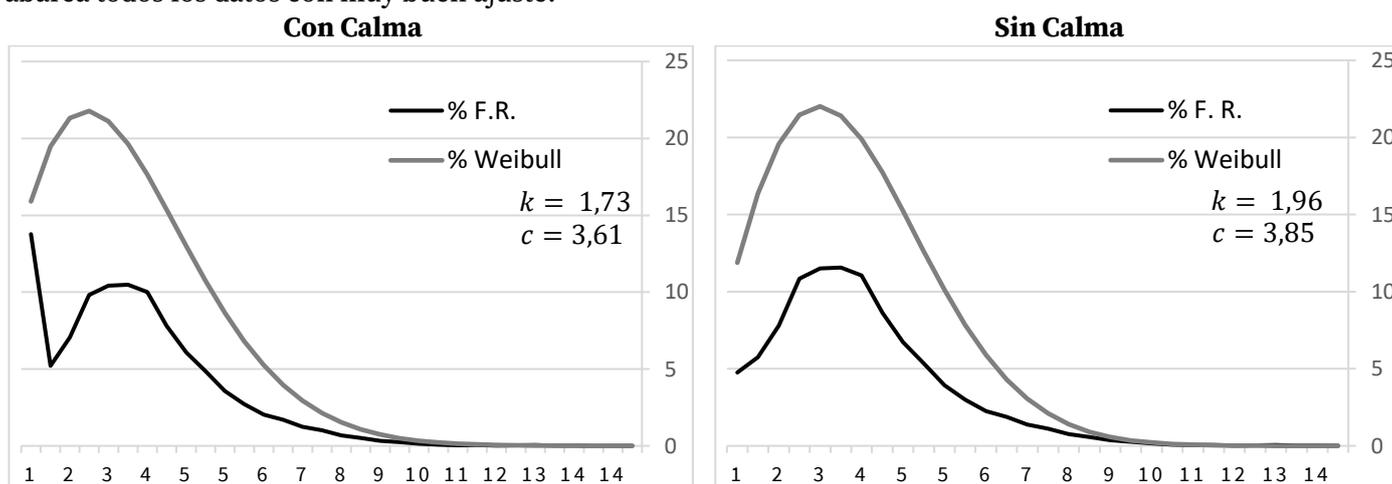


Figura 5: Comparación entre frecuencias relativas y su ajuste por Weibull, ambas en %, de la serie de datos correspondiente a la intensidad de vientos (en m/s) anual para la ciudad de San Francisco, a 10 metros de altura durante el período 2022.

En la distribución de Weibull,  $f(v)$  es la frecuencia relativa de ocurrencia de la velocidad  $v$  del viento,  $k$  es un parámetro de forma y  $c$  es un parámetro de escala. Entonces esta distribución está dada por:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2)$$

Se implementaron 2 métodos para poder calcular los parámetros  $k$  y  $c$  correspondientes a la distribución de Weibull: el primero es un cálculo utilizando tablas y el segundo se aplicó una regresión lineal, siendo esta última menos precisa y se manifiesta una diferencia. Se expresa en la siguiente tabla los resultados obtenidos.

	k	c
método por tabla	1,90	3,851
método por regresión lineal	1,35	3,838

Tabla 2: Parámetros  $k$  y  $c$  calculados para Weibull

En la figura 6 se grafican las curvas correspondientes al resultado de cada método, y se comparan con la frecuencia relativa porcentual de la base de datos 2022

Se puede observar que la distribución de Weibull calculada a partir de tablas es mejor, se adapta a toda la serie de datos de forma correcta. Cabe destacar que no se consideraron las velocidades de calma y se truncó la serie de datos para velocidades mayores a 11 m/s (NCEP/NCAR, 2023).

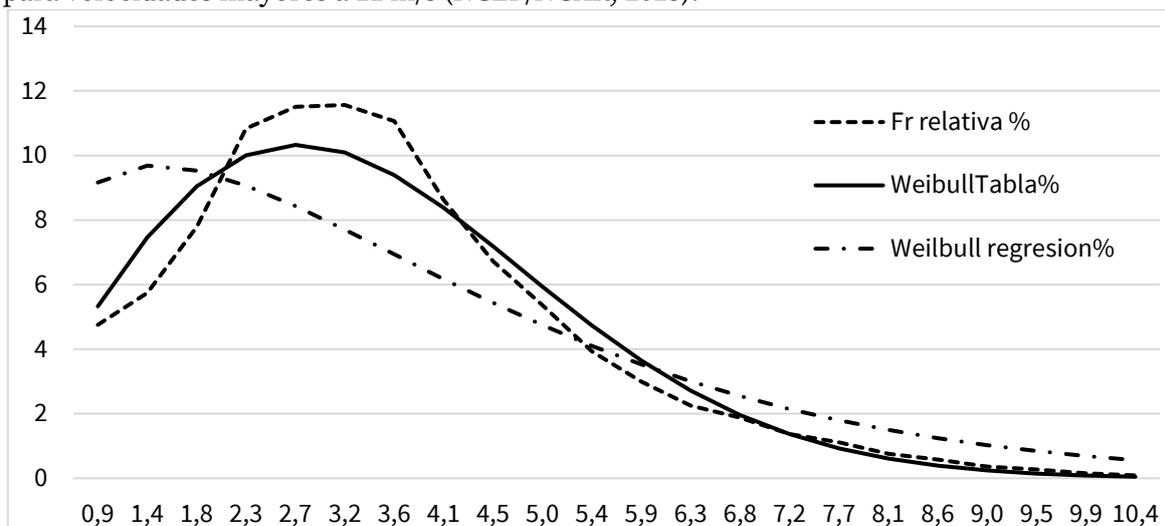


Figura 6: Comparación entre frecuencias relativas y su ajuste por Weibull (calculado por método de tablas y el método de regresión lineal) en %, de la serie de datos correspondiente a la intensidad de vientos (en m/s) anual para la ciudad de San Francisco, a 10 metros de altura durante el período 2022.

Como referencia, se expone en la figura 7 a continuación los datos generados por el (SIGEOLICO, 2023) para dicha ciudad. Los datos expresados aquí difieren en los analizados anteriormente. Esto puede deberse al modelo que utiliza el sistema para interpolar los datos sobre la ciudad ya que no existe mediciones sobre la misma que se incorpore directamente.

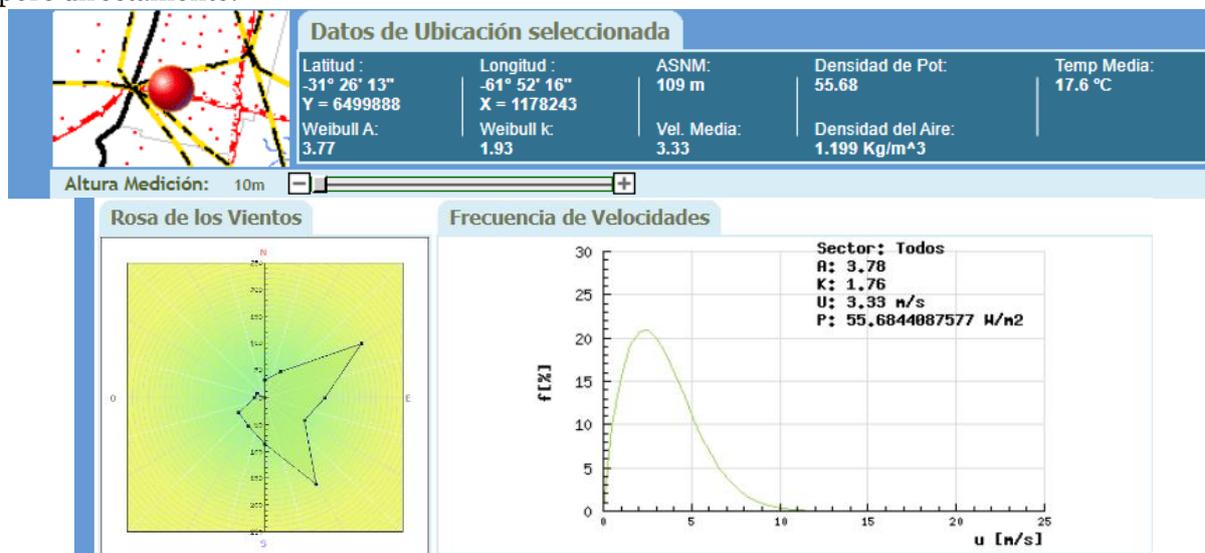


Figura 7: Datos del SIGEOLICO para la ciudad de San Francisco.

### Vientos máximos

En un último aspecto a analizar, se trata de los vientos de ráfagas o de velocidades más altos para poder analizar su impacto estructural-mecánico de los sistemas de generación eólicos.

Para poder llevar a cabo un análisis correcto, por tener pocos datos sobre el lugar, la serie de datos se tomaron todos los periodos de vientos de ráfagas máximos por meses desde el periodo 2020 a marzo del 2023. De esta forma se logró obtener unos 39 datos para poder aplicar la distribución estadística de Gumbel. El cambio de intervalos de discretización estadísticas de los datos o BIN se modificaron para lograr mejor apreciación en las curvas logradas en la figura 8. El período de retorno de 50 años requiere que  $F(v) = 0.98$ , lo cual corresponde a una velocidad extrema de 100 km/h. El ajuste por Gumbel a estos vientos máximos se expresa de la siguiente forma:

$$f(v) = \alpha e^{-\alpha(v-U)} e^{-e^{-\alpha(v-U)}} \tag{3}$$

Donde para estos datos:

$$\alpha = 0,10512418$$

$$U = 65,3624937$$

v= velocidad en el intervalo de discretización o BIN del viento, ahora en km/h.

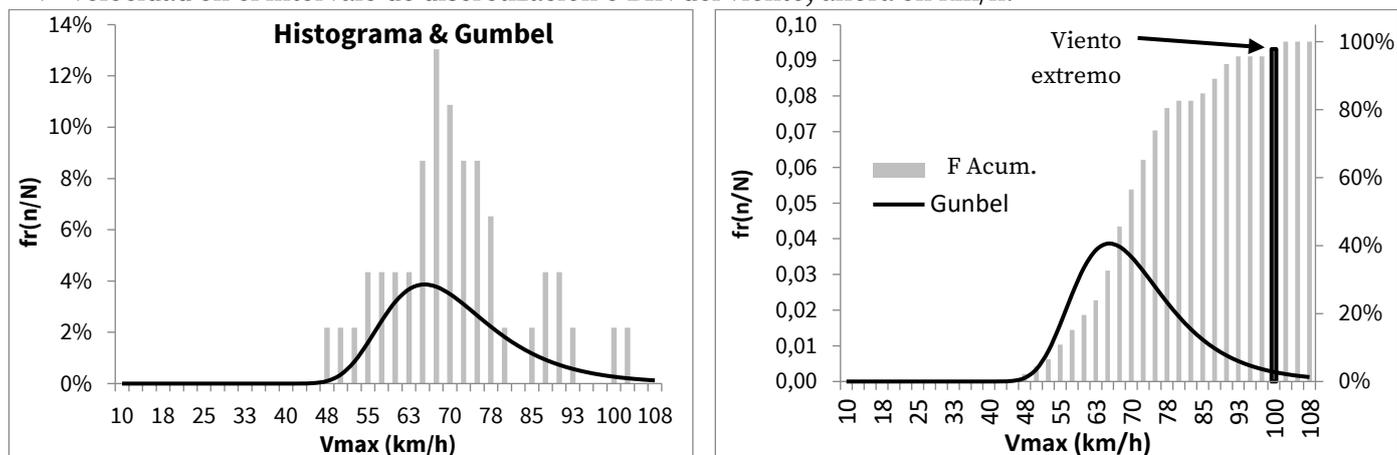


Figura 8: Comparación entre frecuencia relativa y la distribución estándar de Gumbel para los vientos máximos de ráfaga mensuales en km/h, período desde enero 2020 a marzo 2023, para la ciudad de San Francisco, a 10 metros de altura.

## Conclusiones

El recurso eólico disponible en la ciudad es bajo por lo que hay que tener en cuenta a la hora de adoptar sistemas de generación eólico que sean acordes a estas velocidades y bajas potencias. La distribución de Weibull calculada por tablas se ajusta bien a la serie de datos analizada y brinda información importante para pronosticar la energía que puede obtenerse en esta ciudad y zona. La generación de potencia eólica en la ciudad es de clase baja, pero se dispone de recurso que puede ser utilizado teniendo en cuenta esta característica. Teniendo en cuenta que el periodo de retorno de 50 años le corresponde velocidad de vientos extremos de aproximadamente 100 km/h; la resistencia estructural debe soportar estas condiciones o contar con sistema de posición de bandera de seguridad al alcanzar estos valores.

## Referencias

Jijón, D., Constante, J., Moya, M., & Guerrón, G. (2015). Métodos para homogenizar y rellenar datos de viento de la torre meteorológica del Parque Eólico Villonaco en Loja-Ecuador. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 7(2).

NCEP/NCAR, Reanalysis Project 1959-1997. Análisis realizado en: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>

Manual de usuario DAVIS, [www.davisinstruments.com](http://www.davisinstruments.com).

Panofsky, H.A. y G.W. Brier, Some applications of statistics to meteorology, The Pennsylvania State University, 1958, 223pp.

SIGEOLICO [https://mapaeolicossl.energia.gob.ar/pmapper\\_demo\\_new/info\\_vientos\\_f.php?molino=358599&x=-61.931129492846836&y=-31.371569257964914](https://mapaeolicossl.energia.gob.ar/pmapper_demo_new/info_vientos_f.php?molino=358599&x=-61.931129492846836&y=-31.371569257964914), último ingreso: 17 Mayo 2023.

## Agradecimientos

A Roberto Bohn por suministrarnos los datos de la estación meteorológica UTN-FR San Francisco.

A Marisa Cogliati por su apoyo en la temática.