

DESCRIPCIÓN PRELIMINAR DE LA VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL VIENTO MEDIO MENSUAL EN TRELEW

Lucila Mercedes Cúneo^{1,2}, Silvia Bibiana Cerne^{1,3}, María Paula Llano^{1,2}

¹Dpto. de Cs. de la Atmósfera y los Océanos, FCEyN, UBA. Piso 2, Pabellón 2, Cdad. Universitaria, C1428EGA, CABA, Argentina.

²Consejo Nac. de Inv. Científicas y Técnicas, Av. Rivadavia 1917, C1033AAJ, CABA, Argentina.

³Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera CIMA – CONICET. Instituto Franco-Argentino sobre Estudios de Clima y sus Impactos UMIIFAECI 3351-CNRS-CONICET-UBA.FCEyN, UBA. Piso 2, Pabellón 2, Cdad. Universitaria, C1428EGA, CABA, Argentina

(Manuscrito recibido el 27 de noviembre de 2017, en su versión final el 23 de marzo de 2018)

RESUMEN

En el presente trabajo se detallan las características de la velocidad y dirección del viento observado a 10 m en la estación meteorológica de Trelew Aero, provincia de Chubut, Argentina, durante el período 1997-2014. Para realizar este estudio se analizó profundamente y se documentó la calidad de la información, se describió la variabilidad diaria, estacional y anual de las observaciones de velocidad y dirección del viento. También se examinó el comportamiento de valores extremos (velocidades intensas y calmas).

El estudio del control de calidad de los datos indicó que en la estación se realizó un cambio de instrumental en dos ocasiones y que en 2009 los instrumentos presentaron mal funcionamiento, y un estudio de homogeneidad de diferentes propiedades estadísticas indicó tres períodos de estudio. Para cada uno de ellos se calcularon los valores medios de velocidad horarios, diarios, mensuales y anuales. Se evaluaron las distribuciones de frecuencias de velocidad y su correspondiente ajuste a la función Weibull, la frecuencia de ocurrencia de calmas y finalmente, las distribuciones de frecuencias de direcciones a través de una rosa de vientos.

Los resultados indicaron una disminución de la velocidad media anual del viento a lo largo de los períodos y en especial una marcada reducción de vientos extremos tanto velocidades altas como calmas. Además, si bien los vientos del oeste son los más frecuentes durante todo el año, no representan las velocidades medias más intensas y a nivel estacional se observó un cambio en la dirección de dichas velocidades mostrando una rotación al norte en el último período.

Palabras clave: Viento, Variabilidad estacional del viento, Control de calidad de viento

PRELIMINARY DESCRIPTION OF THE SPEED AND DIRECTION OF THE MONTHLY MEAN WIND IN TRELEW

ABSTRACT

In this paper we analyze and discuss the characteristics of the wind datasets made at standard 10 m height in the meteorological station of Trelew Aero in Chubut, Argentina between 1997 and 2014. Our study was focused on analyzing and documenting the quality of the data, we described the daily, seasonal and annual variability of the observational data of speed and wind direction. We also examined the behavior of extreme values (intense velocities and calms).

The quality control of the data indicated that the instrument was changed twice in the station and in 2009 showed malfunctioning and a homogeneity study of different statistical properties indicated three periods of data sets. For each of them, we calculated the hourly, daily, monthly and annual mean values. We evaluated the distributions of velocity frequencies and their corresponding adjustment to the Weibull function, the calms events and finally, the frequency distributions of direction through a wind rose.

As a result, we found a decrease in the mean annual wind speed between periods and a reduction of extreme winds, both higher and lower values. Besides, although westerly winds are the most frequent throughout the year, they do not represent the most intense wind speed. Finally, we found that the most intense winds are rotating to north in the last period.

Keywords: Wind, Seasonal wind variability, Wind quality control

1. INTRODUCCIÓN

La región patagónica en Argentina se caracteriza por la presencia de vientos persistentes e intensos a lo largo del año. El viento varía tanto en el tiempo como en el espacio y dichas variaciones espaciales dependen de las condiciones geofísicas locales como, por ejemplo, la topografía y la rugosidad superficial (Palese y otros, 2012).

Los primeros estudios del viento con fines de conocer el potencial eólico del país para producir energía eólica datan de principios de la década del 1980 (Barros, 1983 y 1986). Con posterioridad, se realizaron estudios de variabilidad del viento, entre los que se distinguen el estudio de la variación estacional de las ráfagas, los valores extremos y la distribución de frecuencias de la velocidad en Chubut (Labraga, 1994); el análisis de la variación estacional de la distribución de frecuencias de la velocidad en Neuquén (Palese, 1999); la investigación del régimen y las características del viento en la región norte de la Patagonia (Palese y otros, 2000). Más recientemente, se puede mencionar a Waimann (2016) que exploró el desarrollo de un sistema de pronóstico de producción de energía eólica,

a Otero y otros (2016) quienes describieron las características de la velocidad del viento a 10 m de altura y su relación con el viento a 40, 50 y 60 m medidos en una torre cercana a la estación meteorológica San Julián, en la provincia de Santa Cruz. También hay autores que estudiaron al viento como recurso eólico en la provincia de Chubut con datos de reanálisis (Guozden y otros, 2017).

Analizar el comportamiento del viento es de suma importancia para hacer frente a, por ejemplo, los daños y pérdidas producto de los vientos extremos (Natalini y otros, 2012) o continuar con la implementación del uso de las energías renovables en la Argentina, entre otros. En particular, autores como Palese y otros (2000) hacen hincapié en la sustentabilidad de proyectos eólicos en Argentina, donde es evidente la crisis energética y donde la demanda de energía está en pleno crecimiento. Por lo tanto, comprender las variaciones temporales y espaciales del viento es esencial para investigar, entre otras cosas, las condiciones óptimas para la explotación del recurso eólico. Sin embargo, el viento como recurso energético limpio y renovable, también

posee desventajas, por ejemplo, es una variable intermitente, difícil de pronosticar y con errores en su medición.

Natalini y Natalini (2013), en su estudio sobre velocidades extremas del viento en Argentina, hacen referencia a la incertidumbre en el proceso de medición del viento y Otero y otros (2016) muestran los errores debidos al cambio de instrumental en la información medida en la estación meteorológica de San Julián (provincia de Santa Cruz), perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

Por ende, el estudio del comportamiento del viento pasado y futuro (pronóstico a corto plazo y proyecciones climáticas) es fundamental para reducir las incertidumbres en cuanto a la producción de este tipo de energía, sobre todo porque estudios recientes muestran que el viento en latitudes medias está disminuyendo a razón de 0.5 ms^{-1} por década (Wan y otros, 2010; Pryor y otros, 2007, entre muchos otros autores) en especial sobre tierra. Hay indicios que esto también está ocurriendo en Argentina (Bichet y otros, 2012; Watson, 2014, Cúneo, 2016), pero para establecer si dichas tendencias existen, se requiere de un estudio previo que describa el comportamiento del viento para lo cual es necesario previamente explorar la calidad de la información.

Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo es documentar la calidad de la información y describir la variabilidad anual, estacional y mensual de las observaciones de la velocidad y dirección del viento en la estación meteorológica Trelew Aero del SMN en primera aproximación. Además, se propone examinar el comportamiento de valores extremos.

2. DATOS Y MÉTODOS

2.1 Datos utilizados

Se trabajó con registros de velocidad y dirección del viento horario medidos a 10 m provenientes de la estación meteorológica Trelew Aero ($43^{\circ}14'S$ y $65^{\circ}19'O$, 11 msnm) perteneciente a

la red de estaciones del SMN en la provincia de Chubut. Las observaciones horarias datan del 1° de enero de 1997 hasta el 31 de agosto de 2014 contabilizando en total 18 años de datos. Según los registros de Anemometría de la estación (Procedimientos y Sistemas de Medición de la Dirección y Velocidad del Viento, según el Glosario de Meteorología de Organización Meteorológica Mundial) disponible para dicho período, la estación realizó dos cambios del instrumental para registrar dicha variable. Entre enero de 1997 y diciembre de 2003 se realizaron mediciones con un modelo de anemógrafo marca BENDIX, a partir de enero de 2004 y hasta diciembre de 2009 se utilizó un anemómetro con un display VAISALA DIGITAL WIND 20. Desde enero de 1997 hasta enero de 2009 la dirección del viento se observó con veleta pendular. Se destaca que entre enero y agosto del año 2009 se utilizó la escala Beaufort para estimar la velocidad del viento. Finalmente, desde enero de 2010 hasta agosto de 2014 se utilizó un anemómetro VAISALA WAA 151, una veleta WAV 151 y un display VAISALA DIGITAL WIND 30. El registro de anemometría no proporcionó información sobre las características técnicas de los instrumentos ni sobre cambios en la ubicación, en la altura del anemómetro ni en el entorno de estación.

2.2 Metodología

Se realizó un control de calidad sobre la información de la velocidad y dirección del viento siguiendo las técnicas utilizadas por Otero y otros (2016) en su estudio sobre la calidad de la información del viento en la estación de San Julián del SMN. En primer lugar, se localizaron registros con fechas inexistentes y registros con códigos de falta de dato (± 99 , ± 999). En segunda instancia, se detectaron errores indiscutibles donde clasifican aquellos datos que indican valores negativos de velocidad, valores por debajo de 0° y por encima de 360° en la dirección y aquellos donde existen valores de dirección acompañados por un dato faltante de velocidad y viceversa. Se buscaron valores fuera de rango, es decir aquellos valores de velocidad del viento

que supere un valor límite, en este caso se asume 30 ms^{-1} , que surge a partir de la exploración de la información y se destaca que dicho valor está dentro del rango de valores extremos que Lassig y otros (2011) encontraron para algunas estaciones en la provincia de Neuquén (entre 27 y 42 ms^{-1}) y es menor al valor de ráfaga máxima (entre 60 y 62 ms^{-1}) que señala el reglamento CIRSOC 102 (2001) para la región de estudio.

En su trabajo, Natalini y Natalini (2013) hacen referencia a la incertidumbre en el proceso de medición. El viento se mide con mucho error, pero también existen ciertos factores que alteran las series temporales además del funcionamiento del instrumental, como, por ejemplo, cambios en la ubicación y/o altura del anemómetro, cambios en el paisaje, construcción de obstáculos, ausencia de datos por cambios en el plan de labor de la estación entre otros, muchos de los cuales no están adecuadamente documentados o bien la documentación no se encuentra disponible.

Efectivamente, la información del viento en esta estación proviene de diferentes sensores y no se realizaron mediciones simultáneas entre el instrumental a reemplazar y el nuevo que permitieran determinar un coeficiente de ajuste, dando lugar a tres períodos de registro. Más aún, durante el período de medición con el anemógrafo, el observador leyó el valor del viento a partir de instrumento registrador continuo. Por lo tanto, se realizó un estudio de homogeneidad de la serie para comprobar si existe un impacto en los datos debido a los cambios del instrumental. En primer lugar, se empleó el test de Levene (Levene, 1960; Brown y otros, 1974) para estudiar la semejanza de varianzas. Luego, se llevó a cabo el test de Wilcoxon (Wilcoxon, 1945) para estudiar la homogeneidad de las medianas de los tres períodos y finalmente se realizó el test de Kolmogorov-Smirnov para dos muestras (Siegel, 1956) que es un test no paramétrico de bondad de ajuste donde se compara si dos muestras fueron extraídas de una misma población. Todos los test se llevaron a cabo con un 95 % de confianza.

Con el objetivo de representar el comportamiento

de la velocidad del viento se calcularon los valores medios horarios, diarios, mensuales y anuales considerando las calmas, pues no hacerlo generaría una sobreestimación de la velocidad media.

La distribución teórica que ajusta a la distribución de frecuencias de la velocidad del viento es la distribución de Weibull (Hennessey, 1977). La función de Weibull está caracterizada por un parámetro de escala c y un parámetro de forma k . Dichos parámetros se estimaron a partir del método de máxima verosimilitud ya que directamente utiliza los datos de la serie temporal sin necesidad de tener un formato de frecuencias y representa las observaciones de forma excelente (Waimann, 2011). La función de distribución de Weibull está dada por:

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

donde v es la velocidad del viento en ms^{-1} , c es el parámetro de escala en ms^{-1} y k es el parámetro de forma adimensional.

Se analizó el ciclo diurno, estacional (verano: DEF, otoño: MAM, invierno: JJA y primavera: SON) y anual de la velocidad del viento y de las calmas en términos de frecuencias relativas a la cantidad de información. Luego, a partir del cálculo de percentiles 25, 75 y 90, se determinó la dispersión de los valores y los valores extremos de velocidad de viento.

Finalmente, se estudió, a partir de una rosa de vientos de 8 direcciones, la distribución de frecuencias estacionales de la dirección del viento y el valor medio de la velocidad asociado a cada dirección

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Control de calidad de la información

El análisis de la información de velocidad y dirección del viento en Trelew Aero correspondiente al período 1997-2014 arroja un total de 2805 datos horarios faltantes correspondientes al 1,8 % del total de datos. En

particular, el 84,2% de los datos faltantes se concentra entre 2007 y 2010 (Figura 1). Respecto a la distribución horaria de los datos faltantes, el 85,9% lo hace entre las 22 y las 5 de la mañana decreciendo notablemente hacia la mañana y la tarde (Figura 2).

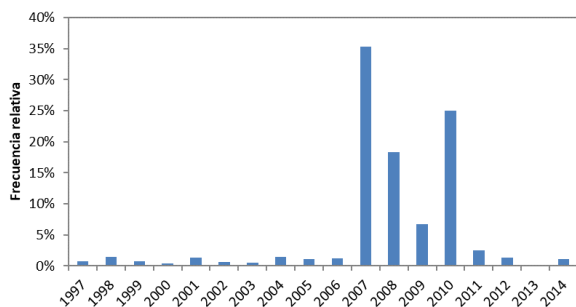


Figura 1: Frecuencia relativa de datos faltantes por año.

El análisis del registro de anemometría de la estación revela un cambio del instrumento en el año 2003 y 2010, mientras que desde enero hasta agosto de 2009 la velocidad del viento se estima a partir de la escala Beaufort. Por lo tanto, se decide eliminar el año 2009 del registro de datos y realizar un estudio de homogeneidad de la serie, considerando los períodos 1997-2003, 2004-2008 y 2010-2014.

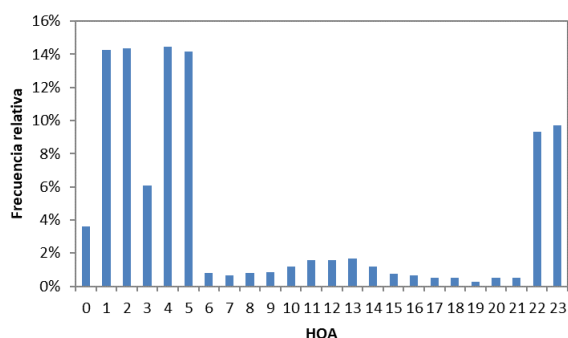


Figura 2: Frecuencia relativa de datos faltantes por hora oficial argentina (HOA).

El test de Levene establece que no hay semejanza entre las varianzas de las distintas series, con un 95% de significancia. El test de Wilcoxon se aplica para estudiar la homogeneidad de las medianas de los tres períodos mencionados, donde con un 95% de confianza se encuentra

que las muestras de datos no provienen de poblaciones con una misma mediana. Por último, el test de Kolmogorov-Smirnov para dos muestras determina que las muestras independientes no fueron extraídas de la misma población o de dos poblaciones con la misma distribución con un 95% de confianza.

Por lo tanto, los tres períodos antes mencionados son independientes y no pueden ser estudiados en forma conjunta y, consecuentemente, el posterior estudio del análisis y comportamiento de la velocidad y dirección del viento se realiza para cada período en particular. Estas inhomogeneidades en las series de velocidad del viento registradas por el SMN ya fueron señaladas por Marino (2007) para la estación de Bariloche Aero y documentada por Otero y otros (2016) para la estación de San Julián en Santa Cruz.

3.2 Características medias

La Figura 3 muestra la velocidad media diaria del viento en Trelew, allí se observa una posible tendencia negativa acompañada por una disminución de la variabilidad del viento a lo largo de los períodos estudiados, dado que se registra una menor cantidad de casos en los cuales la velocidad del viento supera los 10 ms^{-1} .

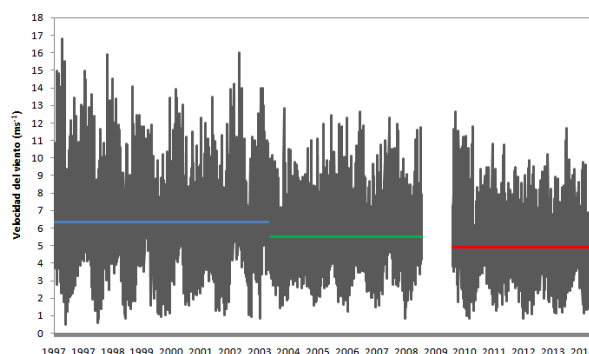


Figura 3: Valores medios diarios de velocidad del viento (gris) y velocidad media para los períodos 1997-2003 (azul), 2004-2008 (verde) y 2010-2014 (rojo).

Los valores medios de velocidad son $6,32 \text{ ms}^{-1}$, $5,48 \text{ ms}^{-1}$ y $4,91 \text{ ms}^{-1}$ respectivamente y, por

lo tanto, existe una disminución del valor medio en un 13,2 % entre 1997-2003 y 2004-2008 y una disminución del 10,4 % entre 2004-2008 y 2010-2014. En cuanto al desvío estándar, se observa también una disminución en la dispersión de los datos. Entre los dos primeros períodos, hay una reducción del 16,5 % en dicho valor, mientras que, entre los dos últimos, se observa una disminución en menor medida, 4,2 %, lo que podría implicar una atenuación en los eventos extremos. Otero y otros (2016) encontraron también una disminución del viento medio y de la ocurrencia de valores extremos en su estudio para San Julián Aero, en el norte la provincia de Santa Cruz, para el período 1998-2009.

3.3 Características de las distribuciones de velocidad

Un aspecto fundamental de las características del viento es el comportamiento de las distribuciones de velocidad. Los tres períodos se ajustan con un 95 % de confianza a una distribución de Weibull (realizada a partir de datos diarios). En la Figura 4 a, b y c, se presentan las distribuciones de frecuencias observadas (en barras) y el ajuste teórico de Weibull (línea) para cada período correspondiente. Se nota que a partir del segundo período los valores más frecuentes de velocidad son cada vez menores. Por ejemplo, en el período 1997-2003 la velocidad más frecuente es de $6,5 \text{ ms}^{-1}$, mientras que, en los períodos restantes, las velocidades más frecuentes se encuentran en el rango entre 4 y 5 ms^{-1} . Además, se observa un cambio en las frecuencias de velocidades máximas reportadas, es decir, en el primer período se registraron velocidades de hasta $17-18 \text{ ms}^{-1}$, mientras que en segundo y tercer período las velocidades máximas registradas son de hasta $11-12 \text{ ms}^{-1}$. La disminución del valor de velocidad indica un cambio en la amplitud de la distribución, relacionado con el parámetro de escala, ya que cuanto menor sea éste, menor amplitud tendrá la distribución.

Earl y otros (2013) postulan que el valor del parámetro de forma podría ser una función del

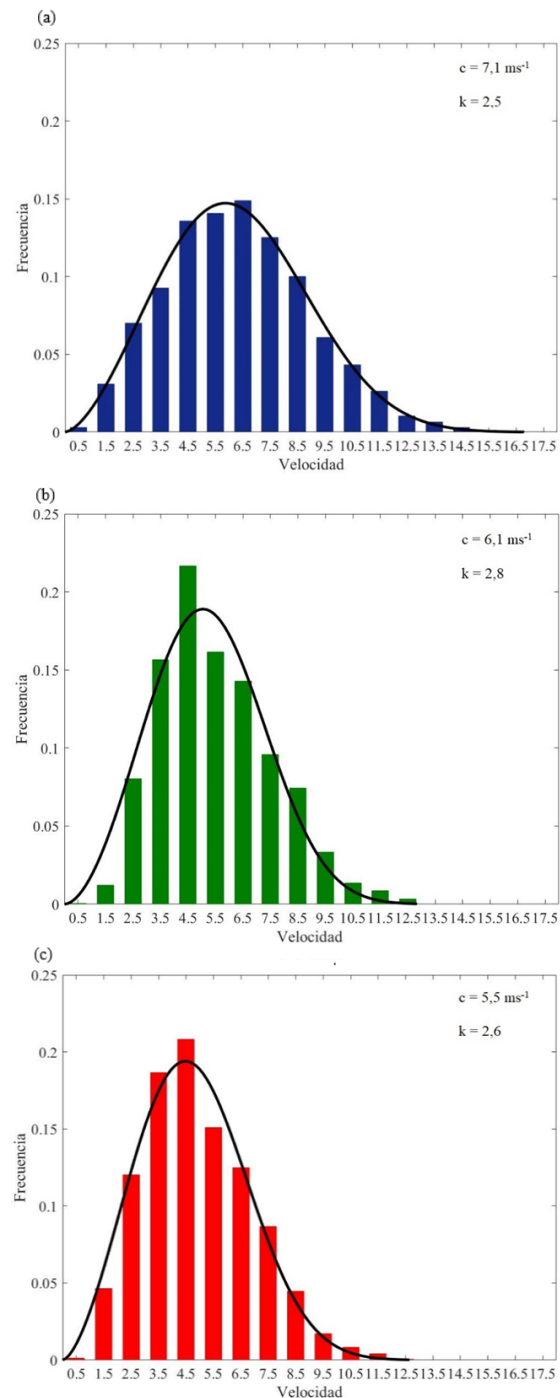


Figura 4: Distribución de frecuencias relativas de velocidad media diaria (ms^{-1})(barras) ajustado con una distribución teórica de Weibull (línea) para 1997-2003 (a), 2004-2008 (b) y 2010-2014 (c).

valor del viento y de las características locales de la ubicación de la estación. Considerando que no se documentó cambio alguno en las características geográficas de la estación, se asume en primera instancia, que éstas no cambiaron y, por lo tanto, la variación en el valor del parámetro de forma podría estar asociada con la variabilidad propia del sistema, con cambios en la circulación atmosférica, diferencias en la longitud de los registros, o bien, ser una combinación de todos efectos anteriores.

3.4 Variabilidad anual, estacional y diurna

La variabilidad anual y estacional de la velocidad del viento para los tres períodos correspondientes se presentan en las Figuras 5 y 6, donde se calculan los valores medios, las medianas y los cuartiles 25 y 75. Cada boxplot muestra la mediana (círculo negro), el percentil 25 (parte inferior del boxplot), el percentil 75 (parte superior del boxplot), el percentil 90 (parte superior del whiskerplot) y el valor medio de la velocidad del viento (círculo amarillo).

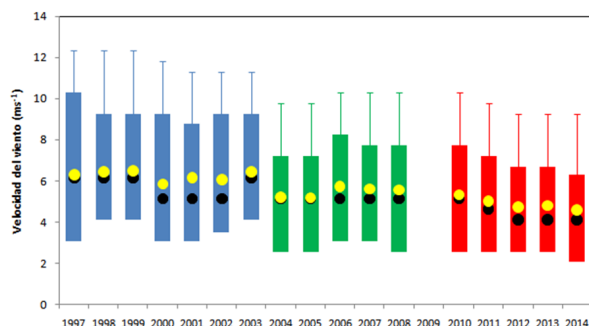


Figura 5: Boxplot de la velocidad media mensual del viento con valor de mediana (puntos negros), percentil 25 (extremo inferior de la caja), percentil 75 (extremo superior de la caja), percentil 90 (extremo superior del whisker) y valor medio anual (puntos amarillos) para cada período correspondiente.

En cuanto a la variación anual (Figura 5), se observa la ya mencionada disminución del valor medio anual entre los distintos períodos. En el primer período, los valores medios anuales

superan, en general, los 6 ms^{-1} , mientras que en los períodos restantes las velocidades medias se encuentran por debajo de ese umbral, especialmente en el último período. También es posible notar la variabilidad interanual de los valores medios, en los dos primeros períodos los valores medios no presentan una clara disminución año a año, por el contrario, en el primero hay una marcada aleatoriedad, mientras que en el segundo período los primeros años tienen una media menor a los últimos.

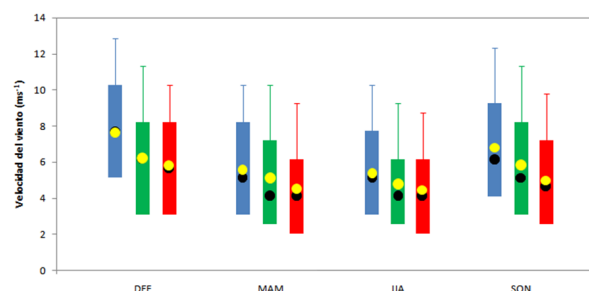


Figura 6: Boxplot de la velocidad del viento estacional con valor de mediana (puntos negros), percentil 25 (extremo inferior de la caja), percentil 75 (extremo superior de la caja), percentil 90 (extremo superior del whisker) y valor medio estacional (puntos amarillos) para cada período correspondiente.

Por otra parte, en los últimos dos períodos, la longitud del boxplot muestra una disminución en la dispersión de los datos respecto del primer período. El valor del percentil 90, definido como el umbral a partir del cual los valores de velocidad de viento se consideran extremos, también disminuye a partir del segundo período y, particularmente, es posible notar que durante el tercer período el valor medio de los extremos cae por debajo de los 10 ms^{-1} . Claramente, se observa que entre 2010 y 2014 el valor del percentil 90 disminuye hasta alcanzar el valor del percentil 75 del primer período y el valor del percentil 75 de 2014 iguala al valor de la media del primer período. Pero el cambio del valor del percentil 25 es mucho menor entre períodos, lo que indicaría que los cambios en la dispersión de los datos se relacionarían más con las velocidades más intensas que con las más

bajas. Es muy notoria la disminución progresiva de los valores del percentil 90, 75 y la media en los últimos 5 años estudiados, comportamiento no observado en los períodos anteriores donde el cambio más brusco sólo se observa con el cambio del instrumental. Esto refleja, no sólo una disminución de los valores medios anuales, sino también una disminución en los valores extremos observados que concuerda con lo analizado en la Figura 3.

Si bien la causa de la disminución de la velocidad media del viento podría atribuirse al cambio de instrumental, debe señalarse que, en la literatura sobre el tema, hay autores que señalan la existencia de una disminución en la velocidad del viento observado. Por ejemplo, Pryor y otros (2007) indican una tendencia negativa en el centro oeste de Estados Unidos entre 1973 y 2005; Wan y otros (2009) lo hallan en estaciones de Canadá; y a nivel local, Palese y Lassig (2012) documentan esta disminución en la provincia de Neuquén. Entonces, además del cambio del instrumental, podrían estar presentes cambios en el paisaje y/o altura del instrumento, pero también algún cambio o ciclo en los patrones de circulación atmosférica, en especial si se consideran los últimos años (medidos con instrumental más confiable). En este trabajo, no se calcula la tendencia de la velocidad del viento ni se explora la existencia de ciclos debido a la escasa cantidad de datos en cada período.

Para examinar si el viento en Trelew presenta un comportamiento estacional definido, en la Figura 6 se muestra el boxplot estacional para los distintos períodos. Se puede observar que la velocidad del viento es mayor para los meses cálidos. En el caso de los meses de DEF, durante el período 1997-2003, los valores medios sobrepasan los 7 ms^{-1} (medido con anemógrafo), mientras que, para el tercer período, los mismos apenas superan los 6 ms^{-1} , lo que equivale a casi un 29,5% de variación entre períodos, sin embargo, la diferencia entre los últimos dos períodos es menor (medidos con anemómetro). Un comportamiento similar es observado para los meses de SON. Contrariamente a lo que ocurre

en los meses cálidos, durante el invierno y el otoño hay una menor variación entre períodos donde los valores medios de la velocidad entre el período 1997-2003 y 2004-2008 difieren en no más de un 16,7%.

En cuanto a la dispersión de los datos, es mayor durante la primavera y verano y es mínima durante el invierno. Respecto a los cambios entre períodos, el verano tiene un comportamiento distinto ya que no registra cambios en el percentil 75 ni 25 entre los últimos dos períodos, pero sí una disminución de los valores extremos (percentil 90). El invierno tampoco registra cambios del percentil 75 entre los mismos períodos, sin embargo hay una disminución del percentil 25 dando lugar a un aumento de la dispersión. En las estaciones intermedias se observa una progresiva disminución de los percentiles y en primavera no cambia la dispersión entre los tres períodos. En prácticamente todas las estaciones se registra una disminución del percentil 90 (más notoria en DEF y SON). Esto sugiere que la disminución de los eventos extremos no tuvo una época del año preferencial.

Otro aspecto muy importante de la variabilidad del viento es su ciclo diurno (Figura 7). Todas las estaciones presentan un marcado ciclo diurno, con un mínimo de velocidad de viento en horas nocturnas y máximos en horas de la tarde, clara respuesta al calentamiento radiativo de la superficie. Es posible notar nuevamente diferencias entre los valores medios de los distintos períodos, donde las mayores variaciones se presentan en las estaciones cálidas. Particularmente, en los meses de DEF, entre el primer período y los restantes existen variaciones entre máximos de velocidad de hasta $2,5 \text{ ms}^{-1}$ mientras que en los meses de SON la disminución es progresiva en concordancia con lo mostrado en la Figura 6. En cuanto las restantes estaciones, las variaciones entre períodos si bien son menores, son mayores para MAM y en horas diurnas que en los meses de JJA, estación que presenta un comportamiento entre períodos muy similar y debe destacarse que las variaciones en las

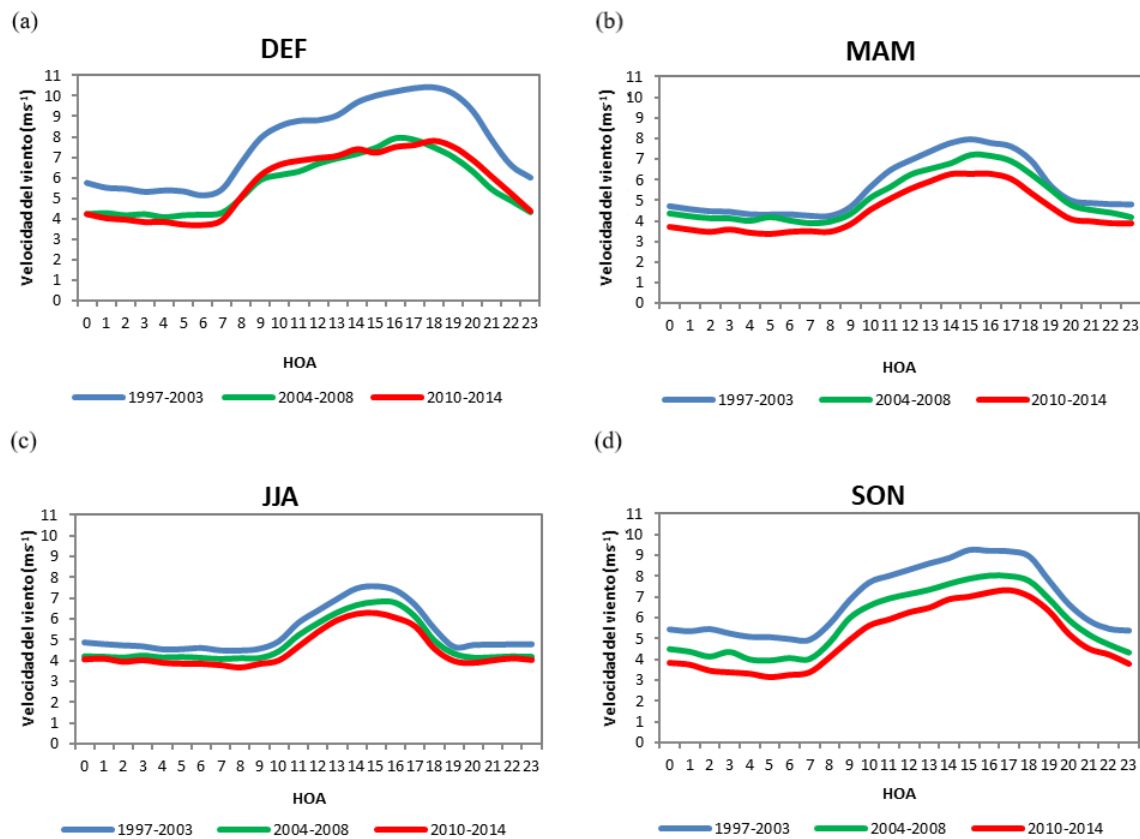


Figura 7: Velocidad media horaria para las estaciones DEF (a), MAM (b), JJA (c) y SON (d).

velocidades medias en horas nocturnas son menores a 1 ms^{-1} .

3.5 Evolución de los eventos de calmas

Las disminuciones observadas en los valores medios de la velocidad del viento generan un interrogante acerca del comportamiento de los episodios de calma en Trelew Aero. Se considera un episodio de calma cuando el viento horario es menor que $0,5 \text{ ms}^{-1}$. La distribución estacional de calmas se presenta en la Figura 8, donde se observa una clara disminución en la proporción de estos eventos principalmente entre el primer período y los restantes. Los eventos de calma disminuyen un 6 % entre el período 1997-2003 y 2004-2008, mientras que existe un aumento del 3 % entre el segundo y tercer período. Dicha disminución podría deberse a que durante el primer período, la medición se realizó con anemógrafo, del cual

el observador leyó la velocidad del viento y por lo tanto, pudo dar lugar a un error subjetivo de apreciación. Además, pueden existir cambios en la sensibilidad del instrumental. Cada instrumento mide la intensidad del viento a partir de un valor umbral y en consecuencia, podría modificar la frecuencia de calmas. Es posible que los instrumentos más antiguos tuvieran más inercia y por ende tendieran a sobreestimar la frecuencia de calmas respecto a sensores más modernos que tienen menos inercia. También, debe destacarse el comportamiento observado entre el período 2004-2008 y 2010-2014 donde se evidencia un claro aumento en la frecuencia de calmas. Estas características fueron reportadas por Otero y otros (2016) para la estación de San Julián. Estos resultados semejantes en dos estaciones de la costa patagónica inducen a pensar la posibilidad de que dicho aumento podría estar relacionado con un posible cambio/ciclo en la circulación

atmosférica, el cual no puede ser estudiado a partir de la serie del SMN. Sin embargo, la distribución de datos faltantes dadas por las Figuras 1 y 2, revelan que la mayor proporción de datos faltantes ocurren entre 2004 y 2008 y en las horas de la madrugada, por lo que las causas del comportamiento de los eventos de calma en la estación de Trelew también podrían asociarse a la falta de observaciones registradas en el período de mayor ocurrencia de calmas. Esta problemática podría explorarse en trabajos futuros a partir del uso de técnicas de normalización, calculando en forma separada la frecuencia de calmas por horas del día y épocas del año y luego extrapolando dichos valores a una frecuencia total anual.

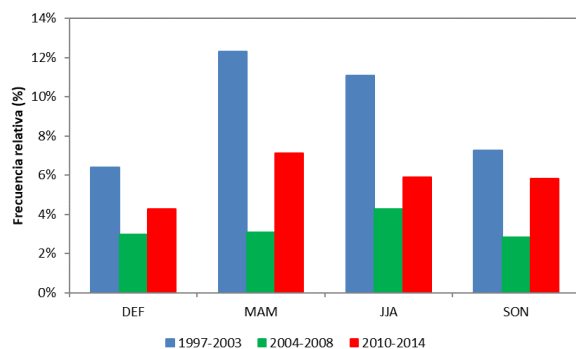


Figura 8: Frecuencia estacional de calmas porcentuales relativas a la cantidad de datos de cada período para cada período correspondiente.

3.6 Estudio de la dirección del viento estacional

Por último, con el objetivo de explorar si los cambios descritos en la velocidad del viento en los distintos períodos ocurren en alguna dirección preferencial, se estudian tanto las frecuencias de velocidad como los valores medios de velocidad por cada dirección de la rosa de viento. A nivel anual, en general los vientos más frecuentes son del oeste. El análisis interperíodos indica que entre el primer período y 2004-2008/2010-2014 se produce un aumento de aproximadamente 5% en la frecuencia de los vientos del sudoeste aparentemente a costa de una disminución en la frecuencia de los vientos del oeste.

La Figura 9 muestra las distribuciones estacionales de la dirección del viento para cada uno de los períodos correspondientes. En todas las estaciones se observa que, independientemente del período, la dirección más frecuente es la del oeste, seguida por la del sudoeste y del norte. Además, se encuentra que aumenta la frecuencia de los vientos del este en las estaciones cálidas, mientras que disminuye su frecuencia hasta menos del 5% en MAM y JJA. Esta característica estacional podría estar relacionada con el desarrollo de la brisa de mar, pero se requiere realizar estudios en escala horaria de las frecuencias por dirección (no contemplados en este trabajo) para poder determinar fehacientemente su ocurrencia.

Continuando con el estudio de las distribuciones de la dirección del viento al analizar el comportamiento entre períodos, se observa que las frecuencias del sudoeste presentan una baja ocurrencia en el primer período pero aumentan en los últimos dos acompañadas por la disminución de las frecuencias de los oeste. Mientras que la frecuencia de vientos del norte y sudeste se mantiene casi constante. Estos cambios entre el primer período y los dos restantes podrían no estar asociados solamente al cambio del instrumental ya que merece la pena recordar que durante el primer y segundo período se utilizó el mismo tipo de instrumental (veleta pendular) y en el tercero se utilizó otro tipo de veleta (Vaisala, Wai 151).

Para obtener una visión más detallada respecto a las características del viento según su dirección se presenta, en la Figura 10, el análisis de la frecuencia de distribución estacional del valor medio de la velocidad del viento para los tres períodos estudiados. Claramente, se observa la disminución en el valor medio entre períodos, siendo más notable la diferencia entre el primer período y los restantes. Los valores medios de las velocidades son relativamente más intensos en la estación cálida debido a la respuesta al calentamiento diurno de la superficie. Por otro lado, se observa que, si bien los vientos del oeste son los más frecuentes, no son estrictamente los

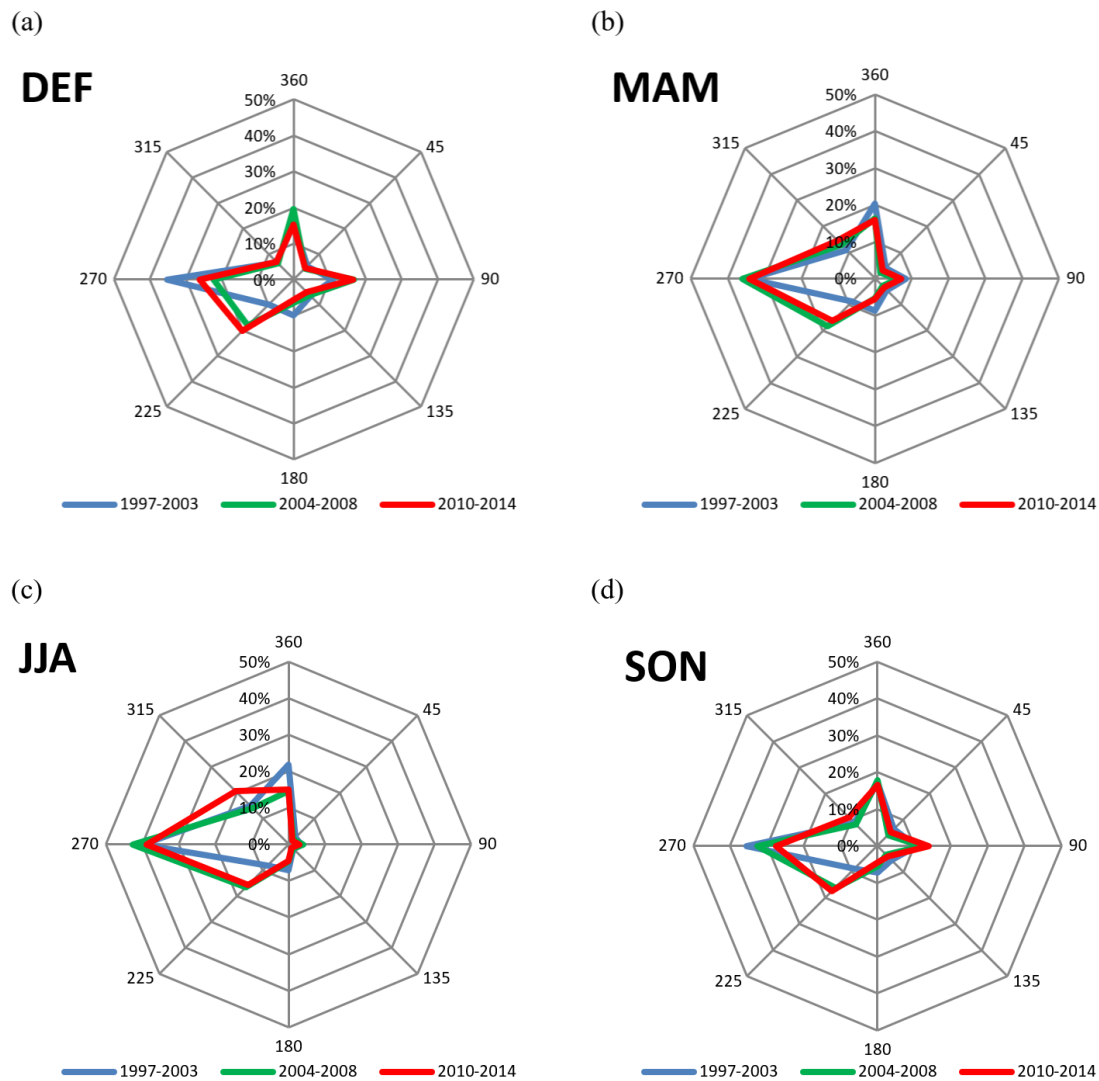


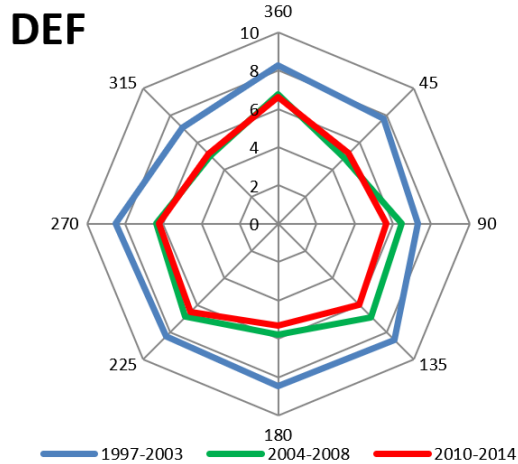
Figura 9: Frecuencias porcentuales relativas a la cantidad de datos por cada dirección para las estaciones DEF (a), MAM (b), JJA (c) y SON (d).

más intensos. En el primer período, los valores medios relativamente más intensos son los del sudeste ($8,60 \text{ ms}^{-1}$), mientras que, durante el segundo y tercer período, los más intensos son los del sudoeste ($6,54 \text{ ms}^{-1}$) y del norte ($6,59 \text{ ms}^{-1}$), respectivamente. Durante la estación invernal los valores medios más intensos son los del norte en los tres períodos analizados ($6,81$; $5,79$ y $5,84 \text{ ms}^{-1}$, respectivamente). Para MAM, se observa un comportamiento similar, los más intensos también son del norte ($7,08$; $6,39$ y $5,84 \text{ ms}^{-1}$, respectivamente) y luego del sudoeste ($7,02$; $5,66$ y $5,33 \text{ ms}^{-1}$, respectivamente). Finalmente, en

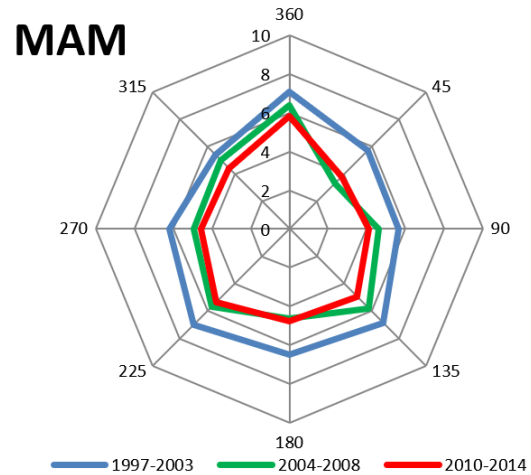
SON, durante los dos primeros períodos, los valores medios relativamente más intensos son del sudoeste ($8,10$ y $6,62 \text{ ms}^{-1}$, respectivamente), mientras que durante el tercer período pasan a ser del norte ($6,39 \text{ ms}^{-1}$).

Vale la pena mencionar que en el último período la dirección norte es la que presenta el valor medio de la velocidad del viento relativamente intenso durante todo el año mientras que, en los dos períodos anteriores esta dirección sólo lo es para los meses de JJA-SON.

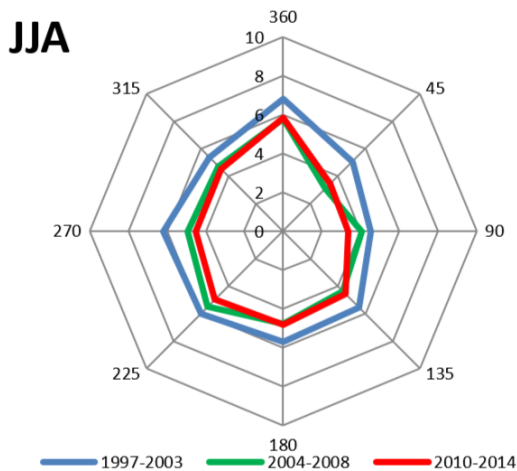
(a)



(b)



(c)



(d)

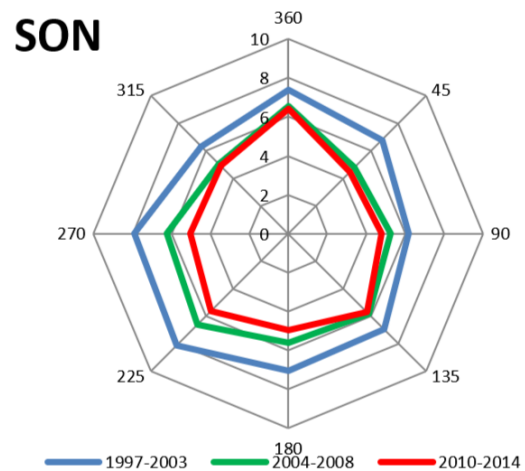


Figura 10: Valor medio de la velocidad del viento por cada dirección para las estaciones DEF (a), MAM (b), JJA (c) y SON (d).

4. CONCLUSIONES

En el trabajo se presenta el estudio del control de calidad de la información y la descripción del comportamiento del viento medio (dirección e intensidad) y de la variabilidad del viento en Trelew en diferentes escalas, como así de sus extremos. De los resultados se desprenden las siguientes conclusiones principales:

- La serie de datos horarios de viento de Trelew Aero entre 1997 y 2014 presenta menos del 2% de datos faltantes. A partir del análisis de la anemometría se desprende que en el

término de 17 años se realizaron dos cambios de instrumental para medir la velocidad del viento y durante algunos meses de 2009 se utilizó la escala Beaufort. Por lo tanto, la serie de datos debe estudiarse en tres períodos separados (1997-2003, 2004-2008 y 2010-2014) restringiendo así la longitud de la serie lo cual imposibilita hacer estudios climatológicos, por ejemplo, de tendencia y variabilidad.

- Se encuentra una disminución del valor medio de la velocidad del viento (13,2% y 10,4% entre períodos respectivamente) y en

la variabilidad, tanto anual, estacional como diaria. En una primera aproximación, hay una marcada disminución de los eventos extremos. Por ejemplo, entre el primer y tercer período disminuyen los eventos donde la velocidad del viento supera los 10 ms^{-1} .

- El análisis interanual de los percentiles característicos para la velocidad del viento horario evidencia una disminución en la dispersión de los datos respecto del primer período. El valor asociado al percentil 90 disminuye a partir del segundo período y en particular, durante el tercer período el valor medio de los extremos es menor a 10 ms^{-1} . Se observa que la disminución del valor del percentil 25 entre períodos es mucho menor por lo que los cambios en la dispersión de los datos observados estarían más relacionados con las velocidades intensas que con las bajas.

- La velocidad del viento presenta un ciclo diurno bien marcado, con un mínimo de velocidad de viento en horas de la noche y máximos en horas de la tarde, siendo una respuesta al calentamiento diferencial de la superficie. Se observa también, que si bien existe una disminución en los valores medios de velocidad, esta es más marcada durante las estaciones de primavera y verano.

- La frecuencia de las calmas disminuye principalmente entre el primer período y los restantes. Sin embargo, es notorio que aumenta la frecuencia de estos eventos en el tercer período. Estas características podrían estar relacionadas con un ciclo o cambio en la circulación atmosférica, ya que las mismas fueron reportadas por Otero y otros (2016) para la estación de San Julián. Sin embargo, la distribución de datos faltantes revela que la mayor proporción de estos ocurren en el segundo período y en las horas de la madrugada, por lo que las causas del comportamiento de los eventos de calma en Trelew también podrían deberse a la falta de observaciones registradas en las horas de mayor ocurrencia de calmas.

- Los vientos del oeste son los más frecuentes a nivel anual para los tres períodos estudiados. Sin embargo, se puede destacar que la ocurrencia de los oestes disminuyó entre períodos y aumentaron

las frecuencias de otras direcciones. En especial, durante la estación cálida hay una notable disminución de las frecuencias del oeste y un aumento en las direcciones este y sudoeste. La ocurrencia del viento del este disminuye en las restantes estaciones donde aumenta la frecuencia del viento del oeste, mientras que la ocurrencia de nortes y sudoestes se mantiene casi constante.

- Si bien los vientos del oeste son los más frecuentes, no presentan las velocidades medias más intensas en términos anuales. Se destacan cambios entre períodos en las velocidades medias por dirección. En verano los vientos medios más fuertes pasaron de ser del sudeste al norte y en primavera rotaron del sudoeste hacia el norte. No se observan cambios en la dirección de los vientos medios más intensos en MAM y JJA siendo siempre del norte. Es importante destacar que durante el último período los vientos medios más intensos provienen del norte en las cuatro estaciones.

Los resultados obtenidos señalan claramente la problemática de estudiar el viento a 10 m registrado en las estaciones meteorológicas de superficie tradicionales. Analizar variabilidades y extremos es susceptible a la longitud del registro, al tipo y calidad del instrumental, en conjunto con los cambios de ubicación y altura del mismo y a los obstáculos cercanos que podrían encubrir los efectos de un cambio o ciclos en los patrones de circulación atmosférica.

Para comprender mejor estos cambios y poder acercarse a una respuesta afirmativa o negativa sobre su relación con el cambio climático o una variabilidad de baja frecuencia sería necesario hacer estudios regionales de los patrones de circulación atmosférica, del gradiente de presión, del viento geostrófico a partir de observaciones, estudio que excede el objetivo del presente trabajo.

Agradecimientos: Los autores agradecen al Servicio Meteorológico Nacional por facilitar la información utilizada. El presente trabajo fue financiado por el proyecto

UBACyT:20620130200013BA.

REFERENCIAS

- Barros V., 1983: Evaluación del potencial eólico en la Patagonia. *Meteorológica* 14,1-2, 473-484.
- Barros V., 1986: Atlas de potencial eólico del sur argentino. CREE. Chubut, Argentina. 1-293.
- Bichet, A., Wild, M., Folini, D., Schär, C., 2012: Causes for decadal variations of wind speed over land: Sensitivity studies with a global climate model. *Geophysical Research Letters* 39, L11701.
- Brown, M. B., Forsythe, A. B., 1974: Robust tests for equality of variances. *Journal of the American Statistical Association* 69: 364-367. doi:10.1080/01621459.1974.10482955. JSTOR 2285659.
- CIRSOC (Centro de Investigaciones de los Reglamentos Nacionales para Obras Civiles), 2001: CIRSOC 102: Reglamento Argentino de acción del viento sobre las construcciones.
- Cúneo, L., M., 2016: Estudio de las características del viento en la zona de Trelew en relación con la producción de energía eólica. Directora: Dra. Bibiana Cerne y Dra. María Paula Llano. Tesis de Licenciatura. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Buenos Aires.
- Earl, N., Dorling, S., Hewston, R., y Von Glasow, R., 2013: 1980–2010: Variability in UK surface wind climate. *Journal of Climate*, 26,4: 1172-1191.
- Guozden, T., M., Bianchi, E., Solarte, A. y Mulleady, C., 2017: Wind resource assement in the Río Negro province (Patagonia Argentina) using MERRA Reanalysis. *Meteorologica* 43,2, 47-61.
- Hennessey, J., 1977: Some aspects of wind power statistics, *Journal of Applied Meteorology*, 16, 119-128.
- Labraga J., 1994: Extreme winds in the Pampa del Castillo Plateau, Patagonia, Argentina, with reference to wind farm settlement. *Journal of Applied Meteorology*. Vol. 33, N° 1, 85-95.
- Lassig, J. L., Palese, C., Apcarian A., 2011: Vientos extremos en la provincia de Neuquén. *Meteorológica*, 36,2, 83-93.
- Levene, H., 1960: Contributions to Probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling. Stanford University Press, Stanford, CA, pp. 278-292.
- Marino, M., B., 2007: Variabilidad de la precipitación en Argentina en diferentes escalas temporales, relacionada con actividad convectiva observada. Director: Dr. Héctor Horacio Ciappesoni. Tesis Doctoral para aspirar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Buenos Aires, 2007.
- Natalini, B., Lassig, J., Natalini, M., Palese, C., 2012: Wind-induced damage in two regions of Argentina. *J Civil Eng Archit* 6(2):167
- Natalini, B. y Natalini, M.B., 2013: Revisión de velocidades de viento extremas en tres localidades del sur de Argentina. *Rev. Int. De Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*. Vol 13 (2). 232.
- Otero, F., Cerne, B. y Campetella, C., 2016: Estudio preliminar del viento en San Julián en referencia a la generación de energía eólica. *Meteorologica*, 42,2, 59-79.
- Palese, C., 1999: Vientos intensos en la región norpatagónica. *Avances en Energías Renovables y Medio ambiente*, 3 N° 2, 177-180.
- Palese, C., Lassig, J. L., Cogliati, M. G. y Bastanski, M. A., 2000: Wind Regime and Wind Power in North Patagonia, Argentina. *Wind Engineering*, vol. 24 no. 5, 361-377. doi: 10.1260/0309524001495738
- Palese, C. y Lassig J., 2012: Variabilidad del viento en Neuquén. *Congremet XI*, Mendoza 15 Págs.
- Pryor, S. C., Barthelmie, R.J., Riley, E.S., 2007: Historical evolution of wind climates in the U.S.A. *Journal of Physics: Conference Series* 75, 1-8.
- Siegel, S., 1956: Nonparametric Statistics for Behavioral Sciences International Student

- Edition. Japón: Kogakusha Co.
- Waimann, C., 2011: Generación de campos de viento en capas bajas a partir del modelo WRF/CIMA para su aplicación a la explotación de energía eólica. Directora: Dra. Celeste Saulo. Tesis de Licenciatura. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Buenos Aires.
- Waimann, C., 2016: Desarrollo de un sistema de pronóstico estocástico-dinámico de producción de energía eólica basado en el modelo WRF/CIMA. Directora: Dra. Celeste Saulo. Tesis de Doctorado. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Buenos Aires
- Wan, H., Wang X. L., and Swail, V. R., 2010: Homogenization and trend analysis of Canadian near-surface wind speeds. *J. Climate*, 23, 1209–1225.
- Watson, S., J., 2014: Quantifying the variability of wind energy. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 3 (4), pp. 330-342.
- Wilcoxon, F., 1945: Individual comparisons by Ranking Methods. *Biometrics Bulletin*, Vol 1, No. 6. Pp. 80-83.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.