

EVALUACIÓN DEL DESGASTE DE LOS ANEMÓMETROS: APROXIMACIÓN ESTADÍSTICA PARA CORREGIR ERRORES EN LA VELOCIDAD DEL VIENTO

César AZORÍN-MOLINA¹, Jesús ASÍN², Tim R. McVICAR^{3,4}, Lorenzo MINOLA¹,
Ganfeng ZHANG¹, Aifang CHEN¹, Juan I. LÓPEZ-MORENO⁵, Sergio M.
VICENTE-SERRANO⁵, Deliang CHEN¹

1. Department of Earth Sciences, University of Gothenburg, Gothenburg, Suecia

2. Departamento de Métodos Estadísticos, Universidad de Zaragoza, Zaragoza

3. CSIRO Land and Water, Canberra, ACT, Australia

*4. Australian Research Council Centre of Excellence for Climate System Science,
University of New South Wales, Sydney, Australia*

*5. Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas
(IPE-CSIC), Zaragoza*

cesar.azorin-molina@gu.se

RESUMEN

Estudios recientes han revelado un descenso significativo de la velocidad del viento (“stilling”) en los últimos 30-50 años. El impacto de la deriva de los anemómetros (desgaste en los rodamientos) en el debilitamiento observado en la velocidad del viento ha sido discutido como una causa parcial de este descenso. Sin embargo, hasta la fecha, ninguna investigación ha cuantificado su contribución. En este trabajo se desarrolla un estudio experimental de 3 años (2014-2016) con medidas de velocidad del viento en paralelo entre un anemómetro SEAC SV5 nuevo frente a otro desgastado. El anemómetro corresponde al utilizado por la Agencia Estatal de Meteorología en la red de estaciones meteorológicas automáticas desde mediados de la década de 1980. Los resultados de la intercomparación muestran un impacto estadísticamente significativo de la deriva del anemómetro en la medida de la velocidad del viento, con el anemómetro desgastado midiendo velocidades de viento más bajas frente al nuevo. El sesgo entre ambos ofrece un patrón temporal marcado y una clara dependencia a la velocidad del viento, siendo los vientos fuertes y débiles los que provocan mayores sesgos significativos. En este estudio se definen dos modelos de regresión capaces de corregir (minimizar) hasta un 37% el sesgo artificial provocado por el desgaste de los anemómetros en la velocidad del viento.

Palabras clave: velocidad del viento, desgaste de los rodamientos, intercomparación, modelos de regresión, stilling.

ABSTRACT

Recent studies on observed wind variability have revealed a decline (termed “stilling”) of wind speed during the last 30–50 years. The impact of cup anemometer drift (i.e., wear on the bearings) on the observed weakening of wind speed has been mentioned as a potential contributor to the declining trend. However, to date, no

research has quantified its contribution to stilling based on measurements. In this study, a 3-year field experiment (2014–2016) with 10-minute paired wind speed measurements from one new and one malfunctioned (i.e., old bearings) SEAC SV5 cup anemometer which has been used by the Spanish Meteorological Agency in automatic weather stations since mid-1980s, was developed for assessing for the first time the role of anemometer drift on wind speed measurement. The results showed a statistical significant impact of anemometer drift on wind speed measurements, with the old anemometer measuring lower wind speeds than the new one. Biases show a marked temporal pattern and clear dependency on wind speed, with both weak and strong winds causing significant biases. We defined two regression models that correct up to 37% of the artificial bias in wind speed due to measurement with an old anemometer.

Keywords: wind speed, bearing ageing, intercomparison, regression models, stilling

1. INTRODUCCIÓN

El impacto de la deriva del anemómetro (desgaste de los rodamientos) se ha discutido de forma superficial como una posible causa (Wan *et al.*, 2010; Azorin-Molina *et al.*, 2014) del fenómeno “stilling” (Roderick *et al.*, 2007) o descenso de la velocidad del viento. Debido a su complejidad, hasta la fecha, ningún estudio ha intentado cuantificar y minimizar la contribución de la degradación de los anemómetros en este descenso observado en la velocidad del viento. Pindado *et al.* (2014) detectaron que la deriva gradual de los anemómetros tiene como resultado una disminución progresiva y artificial de la velocidad del viento a lo largo del tiempo provocada por la reducción en la velocidad de rotación.

Esta degradación (y aumento de la fricción) tiene el mayor impacto en vientos débiles aumentando en consecuencia los períodos de calma (Pindado *et al.*, 2014). En teoría, los Servicios Meteorológicos Nacionales aplican un programa de mantenimiento para inspeccionar y/o recalibrar periódicamente los anemómetros a fin de garantizar la precisión de los instrumentos. Sin embargo, debido a la carencia de metadatos sobre las calibraciones que se efectúan a los sensores (Azorin-Molina *et al.*, 2014), e incluso suponiendo que se realizan inspecciones anuales como recomienda la OMM (2008), la degradación de los anemómetros es una causa compleja de analizar (Siegel y Lee, 2011) y que requiere ser cuantificada para valorar correctamente las tendencias de la velocidad del viento a largo plazo.

Los objetivos de este estudio son: (i) evaluar las divergencias en la medición de la velocidad del viento debido al desgaste en los rodamientos; y (ii) definir modelos de regresión para corregir el sesgo en la medición de la velocidad del viento. Ambos tienen el objetivo principal de mejorar la evaluación de las tendencias de la velocidad del viento, y en concreto del fenómeno “stilling”, con directas implicaciones socioeconómicas y ambientales (McVicar *et al.*, 2012).

2. DATOS

2.1. Anemómetros y diseño experimental

El anemómetro de cazoletas sigue siendo el instrumento de medición de la velocidad del viento más utilizado en aplicaciones meteorológicas (OMM, 2008) y en el sector de la energía eólica (Pindado *et al.*, 2015); esto es en parte debido a su simplicidad, precio económico (respecto a otros modelos como los anemómetros sónicos), respuesta lineal en el rango normal de $4\text{-}16\text{ m s}^{-1}$ (Kristensen, 1998), y su capacidad de operar en condiciones climáticas extremas (Makkonen *et al.*, 2001). Por tanto, casi todas las series históricas de velocidad del viento han sido medidas con anemómetros de cazoletas (McVicar *et al.*, 2012). En consecuencia, evaluar y corregir la deriva debida al desgaste de los rodamientos resulta fundamental.

En esta intercomparación utilizamos el anemómetro SEAC SV5 (Figura 1a), utilizado por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) en la red de estaciones meteorológicas automáticas desde mediados de la década de 1980 (Azorin-Molina *et al.*, 2014). En concreto, dos anemómetros SEAC SV5 fueron intercomparados: (i) un anemómetro nuevo (“SEAC-new”); y (ii) un anemómetro rescatado de una estación meteorológica automática después de años en funcionamiento (“SEAC-old”). Ambos anemómetros solo difieren en la edad de los rodamientos. Además, antes de llevar a cabo el experimento, se realizaron algunas pruebas en túnel de viento (Figura 1b). Los resultados de la prueba en el túnel estimaron que el SEAC-old subestimó la velocidad del viento por debajo del umbral de 3 m s^{-1} , mientras que mostró una respuesta casi lineal al anemómetro de referencia por encima de 7 m s^{-1} . El experimento en campo consistió en montar los dos anemómetros a 9 m sobre el nivel del suelo, en una torre meteorológica en Villena (Alicante; $38^{\circ}37'42,41''\text{N}$ y $0^{\circ}56'05,25''\text{W}$; 497 m.s.n.m. ; Figura 1c). Los dos anemómetros se separaron $1,5\text{ m}$, con el mástil horizontal orientado de 95° a 275° . La estación meteorológica también mide: dirección del viento, velocidad del viento, temperatura del aire, humedad relativa, presión del aire, radiación solar global y precipitación. La climatología del viento en el emplazamiento de la intercomparación está descrita en Azorin-Molina *et al.* (2018).

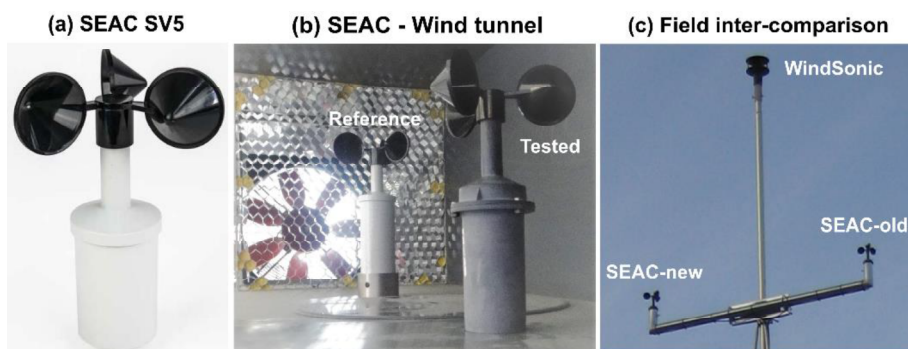


Fig. 1: (a) Anemómetro SEAC SV5 (www.seac.es); (b) test en túnel de viento; (c) detalle de la instalación en paralelo en la estación meteorológica de Villena. El anemómetro sónico se utilizó como control de calidad de los datos SEAC.

2.2. Datos pareados de velocidad del viento

La intercomparación de ambos anemómetros se llevó a cabo mediante un registrador de datos ZENO® 3200, que calculó y almacenó la velocidad media del viento (en m s^{-1}).

s⁻¹) cada 10 minutos. La Tabla 2 resume la estadística mensual del experimento realizado durante 3 años (2014-2016). Tras eliminar los datos anómalos (Sun *et al.*, 2012) debidos a (i) problemas de lectura del registrador; (ii) dos tormentas severas con granizo que dañaron los anemómetros y tuvieron que ser reparados; (iii) el efecto bloqueo del mástil que los separa que forzó la eliminación de dos sectores de dirección del viento en sombra (es decir, de 80° a 110° y de 260° a 290°); y (iv) diferencias negativas anómalas entre los anemómetros, suponiendo que la velocidad media del viento de 10 minutos debe ser siempre mayor en SEAC-new frente al SEAC-old, los análisis cuantitativos se basan en un total de 101.603 datos en paralelo, después de eliminar 44.540 datos como valores ausentes (NA, 11.675) o ≤ 0 (32.865).

Mes	Ndat	NAs	N<0	N=0	Media	Sd	Q1	Q2	Q3	Max
Ene.	12607	784	1393	1573	0,24	0,28	0,01	0,21	0,41	2,12
Feb.	12222	18	746	529	0,33	0,23	0,21	0,34	0,47	3,81
Mar.	13390	2	731	1731	0,29	0,24	0,07	0,31	0,44	1,78
Abr.	12956	4	285	1478	0,31	0,23	0,13	0,31	0,45	1,88
May.	13384	8	1135	1978	0,25	0,26	0,01	0,22	0,42	1,47
Jun.	12956	4	1192	1663	0,24	0,25	0,03	0,21	0,42	1,20
Jul.	11931	1461	845	1627	0,25	0,31	0,04	0,21	0,44	1,49
Ago.	8914	4476	298	1432	0,28	0,36	0,09	0,26	0,48	1,34
Sep.	8624	4336	234	1344	0,32	0,32	0,09	0,32	0,52	2,10
Oct.	12812	577	677	2247	0,24	0,24	0,02	0,21	0,38	2,17
Nov.	12958	2	1334	2344	0,20	0,24	0,00	0,18	0,34	2,23
Dec.	13389	3	2442	3607	0,08	0,22	0,00	0,04	0,22	2,15

Tabla 1: Número mensual de datos en paralelo (Ndat), datos ausentes (NAs), diferencias por bajo ($N<0$) o igual ($N=0$) a 0 y eliminadas de los análisis. En $m\ s^{-1}$ se muestran la media, desviación estándar (Sd), primero (Q1), segundo (Q2) y tercer (Q3) cuartil, y valor máximo de las diferencias en la velocidad media del viento entre SEAC-new menos SEAC-old durante la intercomparación 2014-2016.

2.3. Modelos estadísticos

En este trabajo utilizamos los modelos de regresión como una herramienta capaz de corregir (minimizar) el sesgo observado en las series de velocidad del viento, obteniendo así series corregidas ajustadas a las características del anemómetro nuevo. La definición de estos modelos se desarrolló en varias fases: (i) análisis exploratorio del sesgo entre SEAC-new y SEAC-old; (ii) aplicación de Modelos Aditivos Generalizados (GAM) para identificar relaciones significativas con las covariables (Wood, 2017); (iii) definición de modelos de regresión múltiple; y (iv) análisis del modelo mediante validación cruzada. El desarrollo de los modelos se realizó en el programa R (junto al paquete VGAM) (Yee *et al.*, 2015). La descripción de cada una de estas fases puede encontrarse en Azorin-Molina *et al.* (2018; sección 2.4).

3. RESULTADOS

3.1. Sesgo de la velocidad del viento

La Figura 2 presenta los diagramas de caja del sesgo mensual y diario (horario) entre SEAC-new y SEAC-old. A escala mensual, no se observa un ciclo definido, tal y como también recoge la Tabla 1. El sesgo promedio mínimo se registra en diciembre ($0,08 \text{ m s}^{-1}$) y el máximo en febrero ($0,33 \text{ m s}^{-1}$) y septiembre ($0,32 \text{ m s}^{-1}$), siendo las diferencias medias de velocidad del viento también elevadas ($> 0,2 \text{ m s}^{-1}$ en promedio) para todos los meses, principalmente en primavera, verano y principios de otoño. El rango intercuartílico mensual (diferencia entre el tercer y primer cuartil) en el sesgo es mayor ($\sim 0,40 \text{ m s}^{-1}$) de mayo a septiembre por el dominio de vientos locales, y menor en diciembre y febrero ($0,22$ y $0,26 \text{ m s}^{-1}$, respectivamente), al prevalecer vientos sinópticos constantes que amortiguan las diferencias a lo largo del día. El sesgo extremo muestra claramente un ciclo intraanual, con el máximo en otoño e invierno (febrero $3,81 \text{ m s}^{-1}$) y el mínimo en primavera y verano (junio $1,20 \text{ m s}^{-1}$).

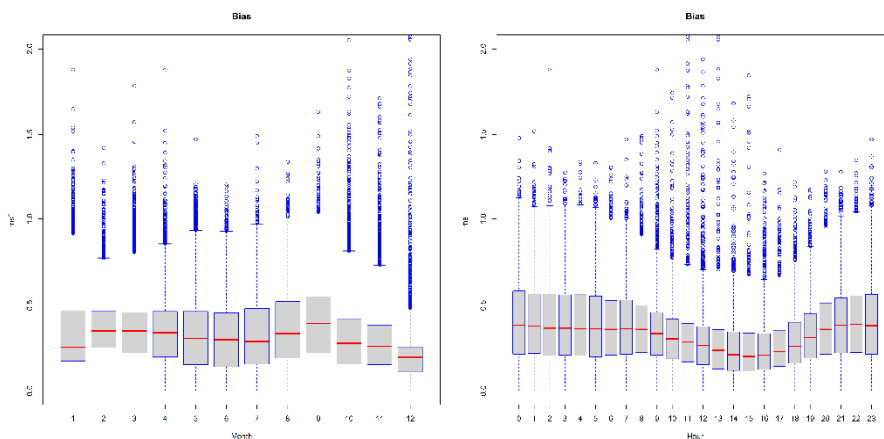


Fig. 2: Diagramas de caja del sesgo de velocidad del viento (en m s^{-1}) entre SEAC-new y SEAC-old a escala mensual (izq.) y horaria (der.) durante 2014-2016. Mediana (línea roja), primer y tercer cuartil (caja), y extremos (círculos azules)

A escala diaria (horaria), se observa un ciclo bien definido, con sesgos bajos durante las horas centrales del día (1400-1600 h UTC), y diferencias marcadas durante la noche (2100-8000 h UTC). El rango intercuartílico en el sesgo también sigue un ciclo diario, siendo bajo durante el día ya que en general ambos anemómetros están en funcionamiento, mientras resulta alto de noche cuando alternan vientos débiles y/o en calma con otros moderados, dando como resultado una dispersión del sesgo. Las diferencias más extremas en la velocidad del viento se registran durante las horas centrales del día. Estas variaciones horarias también muestran un ciclo a lo largo del año: (i) sesgo similar día y noche de noviembre a febrero; (ii) sesgo con ciclo marcado entre el día -mínimas diferencias- y noche -máximas diferencias- entre mayo-agosto; y (iii) un patrón mixto entre los dos anteriores en el resto de meses.

3.2. Sesgo en función de la fuerza de la velocidad del viento

La Figura 3 confirma que el sesgo depende en gran medida de la fuerza de la velocidad del viento. Un hallazgo importante es que los sesgos aumentan a medida que se

incrementa la velocidad del viento, mostrando tres fases: (i) sesgo elevado ($0,35 \text{ m s}^{-1}$) en condiciones de viento débil ($<1,7 \text{ m s}^{-1}$); (ii) disminución progresiva del sesgo hasta $0,26 \text{ m s}^{-1}$ para vientos débiles-moderados ($1,8\text{-}4,0 \text{ m s}^{-1}$); y (iii) aumento lineal del sesgo hasta $\sim 0,5 \text{ m s}^{-1}$ con vientos moderados a fuertes ($> 12 \text{ m s}^{-1}$). Sin embargo, este patrón varía a escala mensual, siendo similar al descrito en invierno, primavera y otoño (enero-mayo y octubre-diciembre), debido al predominio de vientos sinópticos moderados y fuertes, y opuesto en verano y principios de otoño (junio-septiembre), con dominio de vientos locales. Este patrón opuesto consiste en sesgos con pico marcado entre $0,4$ y $0,5 \text{ m s}^{-1}$ con vientos $< 2 \text{ m s}^{-1}$, disminuyendo el sesgo hasta $0,1 \text{ m s}^{-1}$ por encima de este umbral de velocidad del viento.

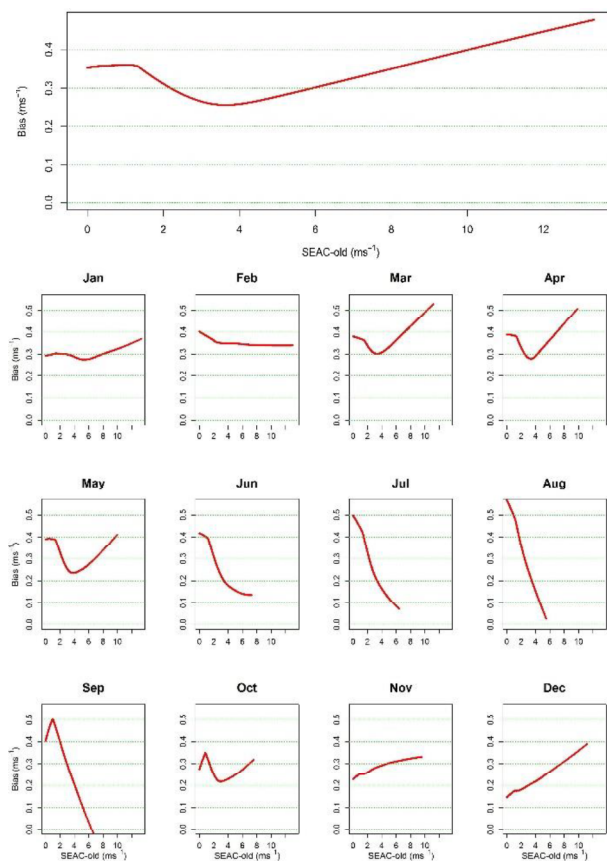


Fig. 3: Sesgo de velocidad del viento (en m s^{-1}) en función de la velocidad del viento del SEAC-old con todos los datos (izq.) y a escala mensual (der.), 2014-2016.

4. MODELOS DE REGRESIÓN

4.1. Modelo de regresión 1

El Modelo 1 incluye como variables predictoras del sesgo el término “light”, que indica si el tiempo (t) es día o noche, y la velocidad del viento del SEAC-old (V_t). El Modelo 1 también incorpora la velocidad del viento entre $t-20$ a $t+30$ minutos, aplicando una parametrización que incluye términos polinomiales de la velocidad del viento. Los términos adicionales representan el efecto de las calmas ($<0,05 \text{ m s}^{-1}$). La figura 4a muestra los sesgos ajustados aplicando el Modelo 1 en función del término V_t para la noche y el día, detectándose una clara respuesta no lineal del sesgo ajustado en función de la velocidad del viento en la noche, mientras que el sesgo ajustado es de menor magnitud durante las horas diurnas. La figura 4b representa los sesgos ajustados por el Modelo 1 en función del término $V_{t+30} - V_{t-20}$ para condiciones de calma y no calma durante las horas de día. En situaciones de no calma ($\geq 0,05 \text{ m s}^{-1}$), los sesgos son bajos ($<0,3 \text{ m s}^{-1}$) ya que ambos anemómetros están en funcionamiento. Lo contrario ocurre en condiciones de calma en V_{t-20} y un inicio brusco de la velocidad del viento en V_{t+30} , que puede generar grandes sesgos ($> 0,6 \text{ m s}^{-1}$) cuando el SEAC-new comienza a girar y el SEAC-old sigue parado. Por lo tanto, el Modelo 1 tiene en cuenta la transición de condiciones de calma a viento por la mañana. Las mejores correcciones del Modelo 1 se consiguen en condiciones de viento moderado a fuerte, siendo capaz de explicar (corregir) este modelo de regresión hasta R^2 14,9% de los sesgos en las series de velocidad del viento. Este porcentaje de corrección aumenta a R^2 26,7% (ver Tabla 3 en Azorin-Molina *et al.*, 2018) cuando se tienen en cuenta los términos armónicos que consideran los ciclos anuales, diarios y horarios de la velocidad del viento.

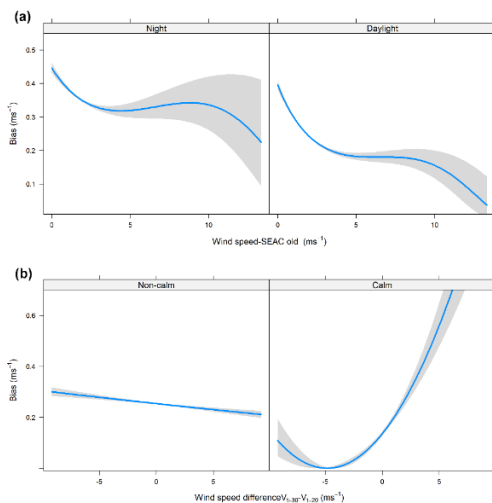


Fig. 4: (a) Sesgo ajustado por el Modelo 1 en función de la velocidad del viento del SEAC-old (V_t) de noche y día; el sombreado gris representa el nivel de confianza del 95% para el valor ajustado. (b) Idem, excepto para la diferencia de la velocidad del viento en la ventana $V_{t+30} - V_{t-20}$ en condiciones de no calma y calma de día.

4.2. Modelo de regresión 2

El Modelo 2 utiliza términos armónicos para describir los ciclos temporales de la velocidad del viento al igual que el Modelo 1, incorporando además términos

adicionales basados en la dirección del viento. La figura 5 muestra los sesgos ajustados por el Modelo 2 en función del término V/t y de 8 octantes en la dirección del viento. Para las direcciones del viento que van desde 0° hasta 180° , se aplican grandes correcciones del sesgo para velocidades del viento bajas ($<5,0 \text{ m s}^{-1}$), reduciéndose para velocidades de viento moderadas ($5,0\text{-}10 \text{ m s}^{-1}$), y aumentando de nuevo para velocidades del viento moderadas-fuertes ($>10,0 \text{ m s}^{-1}$). Por el contrario, para las direcciones del viento que van desde 180° a 360° , estas correcciones son elevadas para todos los rangos de velocidad del viento, pero en particular alcanzan valores de 1.0 m s^{-1} para velocidades de viento moderadas a fuertes. El porcentaje de varianza explicada por el Modelo 2, que incluye la dirección de viento, mejora el ajuste del Modelo 1, siendo capaz de corregir hasta un R^2 del 37%. Por último, un ejemplo de corrección de este Modelo 2 se presenta en la Figura 6, donde se observa la efectividad de corrección en situaciones de vientos moderados, y en cambio el sesgo remanente (hasta $1,5 \text{ m s}^{-1}$) cuando ocurren variaciones bruscas de velocidad del viento, preferentemente al comienzo y final del día.

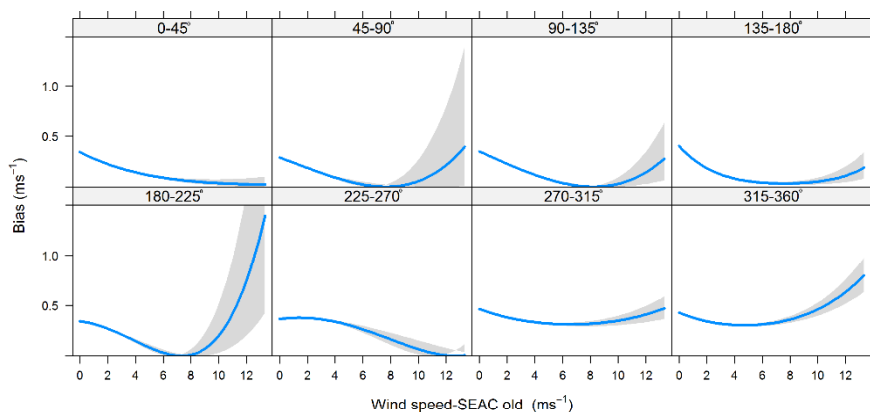


Fig. 5: Sesgo ajustado por el Modelo 2 en función de la velocidad del viento del SEAC-old (V_i) y estratificado en 8 rangos de dirección de viento.

Una descripción detallada de las ecuaciones definidas se encuentra en las Tablas 3, 4 y material suplementario en Azorin-Molina *et al.* (2018)

5. CONCLUSIÓN

Los principales resultados de este estudio de intercomparación son los siguientes:

(i) Se detectaron sesgos positivos y estadísticamente significativos a escala diaria (sub-diaria) y mensual en la velocidad media del viento medida entre los anemómetros SEAC-new y SEAC-old; confirmando el impacto de la degradación de los rodamientos en la medida de la velocidad del viento. Los mayores sesgos se detectaron principalmente en vientos débiles o fuertes. (ii) Los dos modelos de regresión definidos para corregir (minimizar) estos sesgos funcionaron razonablemente. El

Modelo 2 que incluye información sobre la hora del día (ciclo diario) y la dirección del viento como variables independientes es capaz de explicar (corregir) hasta el 37% de este sesgo artificial. Como conclusión, es necesario seguir desarrollando métodos para eliminar de manera efectiva y precisa los sesgos debidos a los artefactos instrumentales en las series de velocidad del viento, incorporando otros tipos de anemómetros utilizados por otros servicios meteorológicos; anemómetros con diferente nivel de degradación; experimentos en diferentes condiciones climáticas de viento, etc.

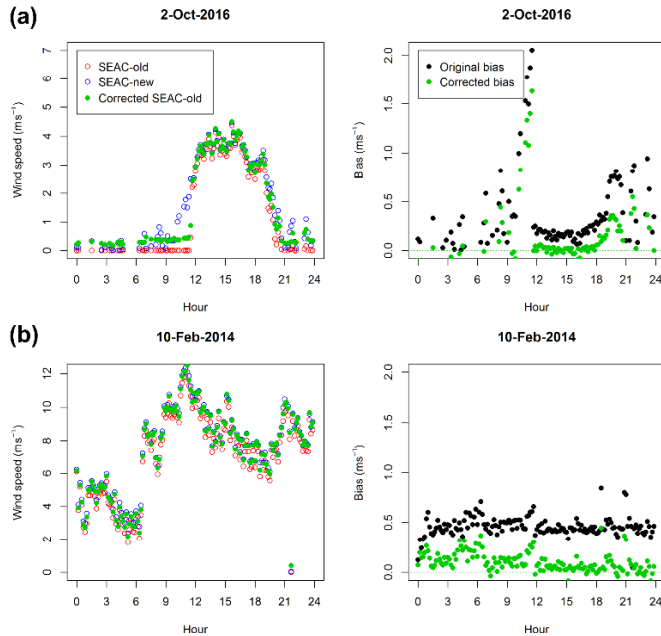


Fig. 6: Velocidad del viento horaria del SEAC-new, SEAC-old y SEAC-old corregido tras aplicar el Modelo 2, (a) 2 de octubre de 2016 (vientos locales del SE), y (b) 10 de febrero de 2014 (vientos sinópticos del NO). El sesgo original y restante tras la corrección se presenta a la derecha.

AGRADECIMIENTOS

C. A-M. ha contado con el apoyo del contrato *Marie Skłodowska-Curie Individual Fellowship* (proyecto STILLING - 703733) financiado por la Comisión Europea. Esta investigación ha sido financiada por los proyectos de investigación: BECC, MERGE, VR (2014-5320), VR (2017-03780) y, en parte, del grupo de investigación “Modelos Estocásticos” apoyado por el Gobierno de Aragón y el Fondo Social Europeo. En particular, agradecemos a Isidoro Sojo y Alfredo Avia de SEAC por su ayuda en el mantenimiento de los anemómetros SEAC y del túnel de viento.

REFERENCIAS

- Azorin-Molina, C., Vicente-Serrano, S.M., McVicar, T.R., Jerez, S., Sanchez-Lorenzo, A., López-Moreno, J.I., Revuelto, J., Trigo, R. M., Lopez-Bustins, J.A., Espirito-Santo, F. (2014). "Homogenization and assessment of observed near-surface wind speed trends over Spain and Portugal, 1961-2011." *Journal of Climate*, 27 (10), 3692-3712.
- Azorin-Molina, C., Asin, J., McVicar, T.R., Minola, L., López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Chen, D. (2018). "Evaluating anemometer drift: A statistical approach to correct biases in wind speed measurement." *Atmospheric Research*, 203, 175-188.
- Kristensen, L. (1998). "Cup Anemometer Behavior in Turbulent Environments." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 15(1), 5-17.
- Makkonen, L., Lehtonen, P., Helle, L. (2001). "Anemometry in icing conditions." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18(9), 1457-1469.
- McVicar, T.R., Roderick, M.L., Donohue, R.J., Li, L.T., Van Niel, T.G., Thomas, A., Grieser, J., Jhajharia, D., Himri, Y., Mahowald, N.M., Mescherskaya, A.V., Kruger, A.C., Rehman, S., Dinpashoh, Y. (2012). "Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near surface wind speeds: Implications for evaporation." *Journal of Hydrology*, 416-417, 182-205.
- Pindado, S., Cubas, J., Sorribes-Palmer, F. (2014). "The Cup Anemometer, a Fundamental Meteorological Instrument for the Wind Energy Industry. Research at the IDR/UPM Institute." *Sensors*, 14(11), 21418-21452.
- Pindado, S., Cubas, J., Sorribes-Palmer, F. (2015). "On the harmonic analysis of cup anemometer rotation speed: A principle to monitor performance and maintenance status of rotating meteorological sensors." *Measurement*, 73, 401-418.
- Roderick, M.L., Rotstayn, L.D., Farquhar, G.D., y Hobbins, M.T. (2007). "On the attribution of changing pan evaporation." *Geophysical Research Letters*, 34 (17), L17403.
- Siegel, D., Lee, J. (2011). "An auto-associative residual processing and K-means clustering approach for anemometer health assessment." *International Journal of Prognostics and Health Management*, 14(2), 1-12.
- Sun, L., Chen, C., Cheng, Q. (2012). "Feature extraction and pattern identification for anemometer condition diagnosis." *International Journal of Prognostics and Health Management*, 3(1), 1-11.
- Wan, H., Xiaolan, L.W., Swail, V.R. (2010). "Homogenization and trend analysis of Canadian near-surface wind speeds." *Journal of Climate*, 23 (5), 1209-1225.
- OMM (2008). *WMO guide to meteorological instruments and methods of observation*. World Meteorological Organization. No. 8, WMO: Geneva, Switzerland.
- Wood, S. N. (2017). *Generalized additive models: an introduction with R*. Chapman and Hall/CRC. 476 pp.
- Yee, T. W., Stoklosa, J., Huggins, R. M. (2015). "The VGAM package for capture-recapture data using the conditional likelihood." *Journal of Statistical Software*, 65(5), 1-33.