

TENDENCIAS DE LA BRISA MARINA EN EL ESTE DE ESPAÑA, 1961-2019

Shalenys BEDOYA-VALESTT¹, César AZORÍN-MOLINA¹, Luis GIMENO², José A. GUIJARRO³, Víctor SÁNCHEZ-MORCILLO⁴, Enric AGUILAR⁵, Manola BRUNET⁵

¹ *Centro de Investigaciones sobre Desertificación, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CIDE-CSIC-UV-GVA), Moncada*

² *Environmental Physics Laboratory (EPhysLab) CIM-UVigo, Universidade de Vigo, Ourense*

³ *Consultor en Gestión de Datos Climáticos jubilado de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), Palma de Mallorca*

⁴ *Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia*

⁵ *Universitat Rovira i Virgili, Center for Climate Change, Tarragona*
shalevale@gmail.com, cesar.azorin@csic.es

RESUMEN

La mayoría de estudios previos del fenómeno “stilling” y el reciente “reversal” de la velocidad del viento se han enfocado en el estudio de su variabilidad a escala global, mientras que los cambios históricos relacionados al tipo de viento aún no han sido cuantificados; p.ej., ponientes, vientos locales, brisas marinas, entre otros. Estudios recientes sobre la Península Ibérica sugieren un posible reforzamiento de las circulaciones de brisa en verano-otoño. En este trabajo desarrollamos un método automatizado para la identificación de episodios de brisa marina en observaciones sub-diarias de viento registradas en 16 estaciones meteorológicas al este de España. Se identificaron 9.312 episodios de brisa y se analizó la variabilidad multidecadal y las tendencias en la velocidad media, rachas máximas y ocurrencia durante el periodo 1961-2019. Los resultados evidencian un desacoplamiento entre la velocidad media y las rachas máximas, con un debilitamiento significativo de la velocidad en todas las escalas temporales (excepto en invierno), y un fortalecimiento de las rachas en otoño-invierno. También se evidenció una intensificación en la ocurrencia de la brisa de invierno, la cual podría deberse a una mayor frecuencia de anticiclones durante esa época del año. Sin embargo, las causas detrás de las tendencias opuestas entre la velocidad media y las rachas máximas son aún desconocidas y requieren de más investigación en el futuro. Este trabajo suple una brecha en el conocimiento de la variabilidad a largo plazo de la brisa del mar Mediterráneo y las causas que provocan los cambios estacionales de los vientos en superficie.

Palabras clave: velocidad del viento, brisas marinas, tendencias, fenómenos “stilling”-“reversal”, Mediterráneo.

ABSTRACT

Most studies on wind stilling and its recent reversal have been addressed at global scales, while changes according to the type of wind have not yet been quantified; e.g. westerlies, local winds, sea breezes, among others. Recent studies over the Iberian Peninsula suggest a hypothetical reinforcement of sea breeze speeds in summer-autumn. Here, we developed an automated method for the detection of sea breeze episodes on sub-daily wind observations from 16 weather stations across eastern Spain. After identifying 9.312 days of sea breezes, we analyzed trends and multidecadal variability on their speeds, gusts and occurrence for 1961-2019. We found a decoupled variability between the sea breeze speeds and gusts: the speed declined in most time-scales (excepting winter) while gusts strengthened annually and in autumn-winter. We also found an increased winter occurrence of the sea breeze, which variability is partly explained by more frequent anticyclonic conditions. The causes behind the opposing trend in the speed and gusts remain unclear, requiring further investigation. This work fills a gap in the knowledge of the long-term variability of the Mediterranean Sea breezes and the drivers of seasonal changes in surface winds.

Key words: sea breeze, Mediterranean, Iberian Peninsula, wind, trends, variability

1. INTRODUCCIÓN

Los cambios observados en el viento global evidencian una marcada asimetría interhemisférica: con aumentos en el hemisferio sur y sobre superficies oceánicas, y descensos sobre superficies terrestres en el hemisferio norte (Roderick *et al.*, 2007; Young and Ribal, 2019), un fenómeno conocido como “*stilling vs. reversal*” que se espera continúe hasta finales de siglo (Deng *et al.*, 2021). Estudios recientes evidenciaron que estos cambios se deben principalmente a la variabilidad climática interna y a la rugosidad del terreno (Vautard *et al.*, 2010; Wohland *et al.*, 2021). Sin embargo, una marcada estacionalidad en los cambios observados del viento en estaciones costeras durante los meses cálidos (Azorin-Molina *et al.*, 2014; 2016) sugieren un posible reforzamiento en las circulaciones de vientos locales como las brisas marinas.

Hasta la fecha, se desconocen los mecanismos que están detrás de estas tendencias estacionales y locales, ya que ninguna investigación ha cuantificado los cambios según el tipo de viento, p.ej., vientos del oeste (ponientes), vientos alisios, brisas marinas, entre otros. También se desconoce si las circulaciones de brisa marina se han reforzado, ya que a pesar de ser un fenómeno ampliamente estudiado en la literatura: p.ej., a través de simulaciones numéricas, estudios de caso, y climatologías cortas; el estudio de sus cambios en escalas temporales largas es muy novedoso: sólo cinco investigaciones recientes examinaron las tendencias multidecadales de la brisa marina (Shen *et al.*, 2019; Pazandeh-Masouleh *et al.*, 2019; Shen and Zhao 2020, Shen *et al.*, 2021a, 2021b).

En general, no hay consenso científico respecto a los cambios y tendencias observadas en la brisa marina, aunque se sugiere que estos se deben a la interacción entre mecanismos físico-locales (p.ej., orientación de la costa, terreno complejo, cambios

en el uso del suelo), y a gran escala (cambios en la circulación atmosférica) que pueden ser exacerbados por el cambio climático, dificultando aún más la comprensión de sus cambios y variabilidad.

Este estudio cubre un nicho de investigación al evaluar los cambios históricos y la variabilidad multidecadal de la brisa marina en el este de España. Los objetivos son: (i) analizar por primera vez las tendencias y variabilidad multidecadal de la velocidad de la brisa marina en el este de España, cubriendo el periodo 1961-2019; (ii) desarrollar un método robusto que permita identificar de forma automatizada episodios de brisa marina para crear la primera base de datos histórica en el este de España; y (iii) mejorar el estado del conocimiento detrás de las causas de la variabilidad y tendencias de la brisa en un clima cambiante. El estudio de los cambios históricos en la brisa marina es relevante a nivel local al tener implicaciones directas en diferentes sectores socioeconómicos y ambientales.

2. MÉTODOS

2.1. Área de estudio

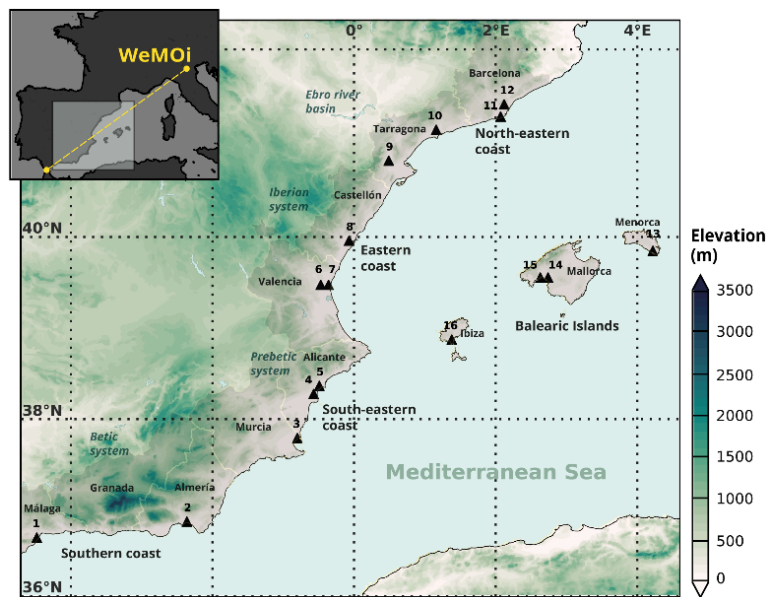


Fig. 1: Mapa del este de España con las 16 estaciones meteorológicas (triángulos y números) usadas en este estudio. Se presenta además el transecto del índice WeMO implementado para la detección de episodios de brisa marina.

El este de España se definió como el área de la costa Mediterránea comprendida entre 36° – 41°N y 4,5°O – 4,5°E (Fig. 1). El área de estudio se extiende sobre 3.017 km de línea de costa (desde Málaga hasta Barcelona, incluyendo la zona peninsular de las islas Baleares). El clima está modulado por el efecto de la brisa marina, que representa la circulación de viento dominante durante los meses cálidos (Olcina-Cantos and Azorin-Molina, 2004).

2.2. Datos observados de viento

Se utilizaron observaciones diarias (promedio a partir de observaciones sub-diarias diarias a las 0700, 1300, y 1800 UTC) de velocidad de viento y rachas máximas (en m s^{-1}) medido a 10 metros por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Para este trabajo, seleccionamos 16 estaciones meteorológicas (Tabla 1) de la red de estaciones automáticas de la AEMET ubicadas sobre el este de España (Fig. 1), las cuáles cumplen con nuestros criterios de selección temporal (con el mayor registro temporal posible desde 1961) y espacial (cuya distancia no exceda los 20 km desde la línea de costa). Los datos de viento se homogenizaron según el método que se encuentra descrito en Utrabo-Carazo *et al.* (2022).

Nº	Id	Station	Lat. (°)	Long. (°)	Elev (m)	Dist. Costa (km)	Orient. (°)	Período
1	6155A	Málaga airport	36,67	-4,48	5	1,9	255 - 75	1961 - 2019
2	6325O	Almería airport	36,85	-2,36	21	1	255 - 75	1968 - 2019
3	7031	San Javier airport	37,79	-0,80	4	4,5	223 - 43	1961 - 2019
4	8019	Alicante airport	38,28	-0,57	43	4,4	223 - 43	1961 - 2019
5	8025	Alicante Ciudad Jardín	38,37	-0,49	81	2,8	223 - 43	1961 - 2019
6	8414A	Valencia airport	39,48	-0,47	56	12,7	193 - 13	1961 - 2019
7	8416	Valencia Viveros	39,48	-0,36	11	3,2	193 - 13	1961 - 2019
8	8500A	Castellón-Almassora	39,96	-0,07	43	6,7	193 - 13	1976 - 2019
9	9981A	Tortosa	40,82	0,49	50	18	193 - 13	1961 - 2019
10	0016A	Reus airport	41,15	1,16	71	7,5	229 - 49	1961 - 2019
11	0076	Barcelona airport	41,29	2,07	4	1,5	229 - 49	1961 - 2019
12	0200E	Barcelona Fabra	41,42	2,12	408	8	229 - 49	1961 - 2019
13	B893	Menorca airport	39,85	4,22	91	3	270 - 90	1965 - 2019
14	B278	Palma Mallorca airport	39,56	2,74	8	3,7	270 - 90	1972 - 2019
15	B228	Palma Mallorca port	39,56	2,63	3	0	270 - 90	1978 - 2019
16	B954	Ibiza airport	38,88	1,38	6	2,8	270 - 90	1961 - 2019

Tabla 1: Descripción de las estaciones meteorológicas con mediciones homogéneas de la velocidad del viento sobre el Este de España para 1961-2019.

2.3. Identificación de episodios de brisa marina

Proponemos un método robusto automatizado para la detección de eventos potenciales de brisa marina, el cual se basa en 6 filtros alternativos clasificados en dos grupos: (a) escala sinóptica y (b) escala local. El primer grupo de filtros (1-3) utiliza el flujo sinóptico a 850 hPa: fase neutra WeMOI (Martin-Vide and Lopez-Bustins, 2006), clasificación de tiempo sinóptico (A, E, NE, AE, ANE, N, SE, C) que favorece el desarrollo de la brisa (Azorin-Molina *et al.*, 2011a) y viento geostrófico débil $< 12 \text{ m s}^{-1}$ (Ramis and Alonso, 1988) como criterio alternativo para rechazar días con perturbaciones sinópticas a gran escala que inhiban el desarrollo de la brisa. El segundo grupo (filtros 4-6) emplea criterios objetivos a escala local para confirmar el paso de un evento de brisa marina, p.ej., vientos provenientes del océano y rachas débiles $< 14 \text{ m s}^{-1}$ (Azorin-Molina *et al.*, 2011b), así como para asegurar episodios puros, es decir días secos con precipitación diaria total $< 0,1 \text{ mm d}^{-1}$ (Arillaga *et al.*, 2020). En total, se identificaron 9.312 eventos potenciales de brisa marina durante el período 1961–2019 (Fig. 2). Se destaca la baja (pero creciente) frecuencia de episodios de brisa en invierno.

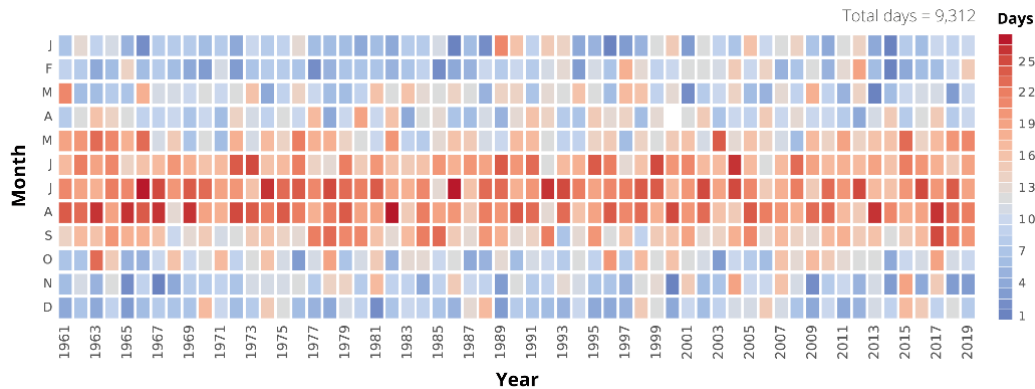


Fig. 2: Días de brisa identificados en todas las estaciones meteorológicas durante el período 1961–2019.

2.4. Análisis de tendencia y estadística

En este trabajo se derivaron series mensuales de velocidad media del viento, rachas máximas y ocurrencia de brisa. Para crear la serie regional se realizó un promedio mensual ponderado a partir de series diarias. Posteriormente se calcularon las anomalías respecto al período 1981–2010 y se estimaron las tendencias regionales y locales (es decir, por cada estación meteorológica) mediante una regresión lineal (ponderada para la serie regional). Con el fin de evaluar la significación estadística de las tendencias en series auto-correlacionadas, se aplicó el test no paramétrico de Mann-Kendall modificado por Hamed y Rao (1988). Analizamos la significación de las tendencias a partir de una perspectiva de proceso e importancia, como lo hace la mayoría de estudios climáticos de viento (Utrabo-Carazo *et al.*, 2022), definiendo los umbrales de valor- p de la siguiente manera: (i) altamente significativo ($p < 0,05$); (ii) significativo ($p < 0,10$) y (iii) no significativo ($p > 0,10$). La persistencia de las tendencias se evaluó mediante tendencias móviles con ventanas de longitud mínima de 30 años. Además, calculamos la variabilidad multidecadal a partir de un filtro gaussiano paso-bajo de 15 años, así como el coeficiente de determinación (R^2) para estimar la varianza entre la velocidad media y las rachas de brisa. Finalmente, se realizaron correlaciones de Pearson (r) entre los parámetros estudiados y la clasificación sinóptica de Jenkinson y Collison.

3. RESULTADOS

3.1. Tendencias de la brisa marina

Se evidencian las tendencias opuestas entre el debilitamiento de la velocidad media de la brisa y el reforzamiento de las rachas de brisa durante la mayor parte del período estudiado (Fig. 3). La velocidad media disminuye significativamente en todas las escalas temporales, con una reducción anual de $-0,07 \text{ m s}^{-1} \text{ decada}^{-1}$ ($p < 0,05$). Por el contrario, las rachas máximas no presentaron aumentos estadísticamente significativos en la escala anual ($+0,01 \text{ m s}^{-1} \text{ decada}^{-1}$, $p > 0,10$), siendo estos ascensos no significativos en invierno y significativos en otoño. Se destaca la tendencia negativa de las rachas en primavera-verano ($p > 0,10$). A escala local (de estación), es

particularmente evidente la heterogeneidad en las tendencias de las rachas (Fig. 4), además de las tendencias opuestas entre estaciones ubicadas en aeropuertos frente urbanas dentro de grandes ciudades (p.ej., Alicante, Valencia y Barcelona).

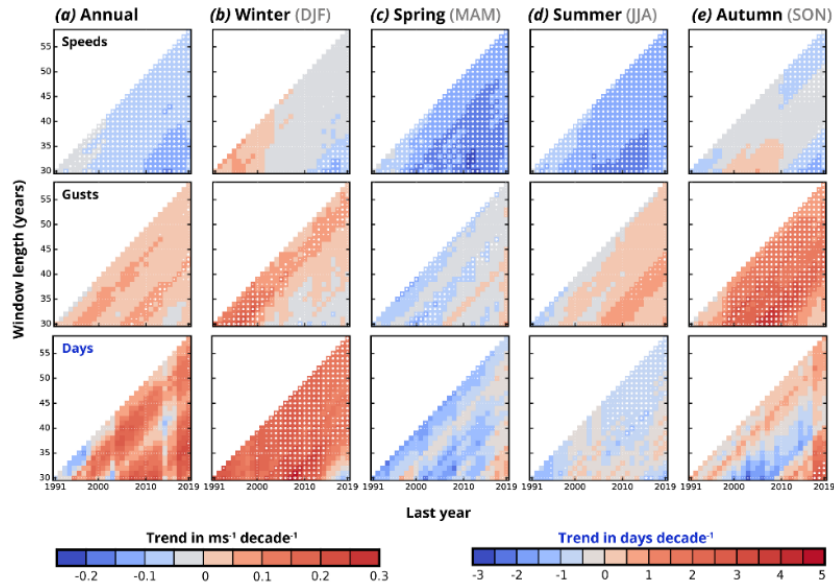


Fig. 3: Tendencias regionales de la ocurrencia, velocidad media y rachas máximas de la brisa marina a partir de la media ponderada de las 16 estaciones del este de España para 1961–2019. Los puntos blancos representan la importancia de las tendencias: en $p < 0,10$ (los pequeños) y $p < 0,05$ (los más grandes)

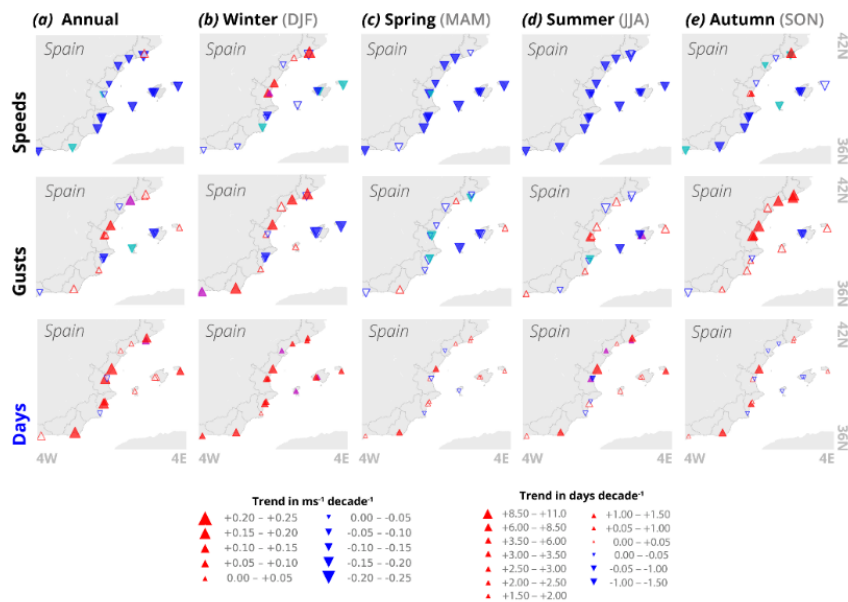


Fig. 4: Distribución espacial del signo y magnitud de la tendencia de la ocurrencia, velocidad media y rachas máximas de la brisa marina para las 16 estaciones en el este de España durante 1961–2019. Se presenta además la significación estadística (rojo y azul son significativos a $p < 0,05$; cian y magenta son significativos a $p < 0,10$; y los triángulos sin relleno son no-significativos en $p > 0,10$)

Un patrón similar ocurre en las tendencias de la ocurrencia de la brisa, en la cual las tendencias positivas en estaciones de aeropuerto frente al descenso en estaciones urbanas responden a una característica clara de la rugosidad de la superficie local. Por otro lado, la ocurrencia de la brisa presentó una tendencia regional positiva a escala anual (+ 0,86 días década⁻¹, $p > 0,10$), aunque se destacan las tendencias opuestas significativas entre invierno (+1,72 días década⁻¹, $p < 0,05$) y verano (-0,58 días década⁻¹, $p < 0,10$).

3.2. Variabilidad multidecadal de la brisa marina

En general, se evidencia una variabilidad desacoplada entre la velocidad media y las rachas de brisas a escala anual y en verano en términos de r y R^2 ($r = 0,16$ and $R^2 = 0,03$). Para ambas escalas temporales, la velocidad de la brisa disminuyó mientras que las rachas aumentaron (Fig. 5). Un cambio simultáneo entre ambos parámetros se observa alrededor de la década de 1990. La mayor variabilidad inter-anual ocurrió en invierno, mientras que la más débil en verano.

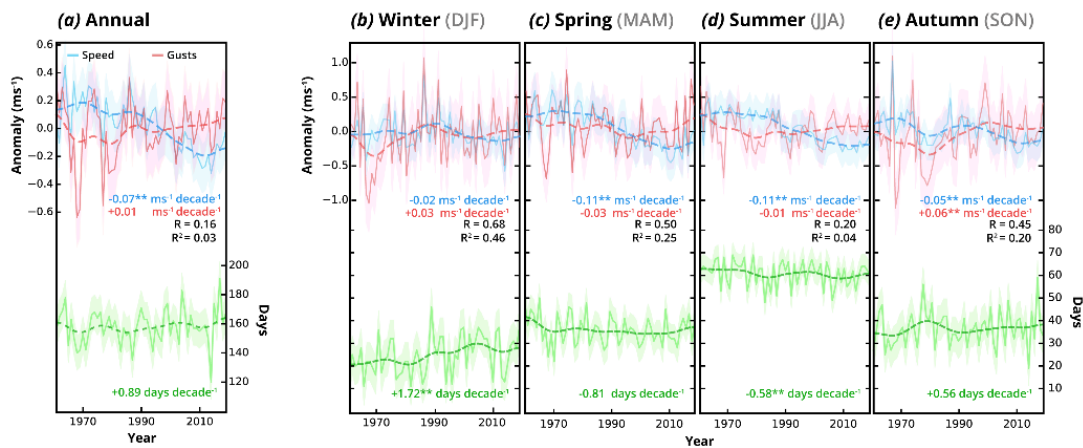


Fig. 5: Variabilidad regional de la velocidad media (azul), rachas máximas (rojo) y ocurrencia (verde) de la brisa marina en el este de España durante 1961-2019. Se presenta el filtro de paso bajo gaussiano de 15 años (línea discontinua), mientras que el área sombreada representa la desviación estándar. Las tendencias para el período de 58 años se indican con su significación estadística, es decir, $p < 0,10$ (un asterisco) y $p < 0,05$ (dos asteriscos), mientras que el coeficiente de correlación de Pearson (r) y el coeficiente de determinación (R^2) entre las velocidades y las rachas de brisa también se evidencian.

4. DISCUSIÓN

Este estudio investigó por primera vez los cambios a largo plazo en las velocidades, rachas y ocurrencia de la brisa marina en el este de España durante 1961-2019. Se propone un nuevo método automatizado para identificar eventos históricos de brisa, el cual representa una técnica alternativa en áreas en las que los registros climáticos prolongados sobre superficies terrestres y marinas son limitados. Mediante el uso de un número mínimo de variables (Laird et al. 2001), se puede aplicar fácilmente en

todo el mundo en regiones con una diferencia regional de presión a nivel del mar (Azorin-Molina y López-Bustins, 2008).

El aumento anual en la ocurrencia de la brisa marina es un resultado que concuerda con otros análisis a escala global (Perez *et al.*, 2017; Shen and Zhao, 2020). Sin embargo, esta tendencia no representa un fenómeno generalizado (Pazandeh-Masouleh *et al.*, 2019; Shen *et al.*, 2019). La tendencia de la brisa marina sugiere que este fenómeno es cada vez menos común en verano, un resultado opuesto al hipotético aumento de episodios de brisa inducido por el calentamiento global (Lebassi-Habtezion *et al.*, 2011). Por el contrario, el incremento de días de brisa marina en invierno representa un resultado nunca antes reportado en la literatura. Análisis complementarios de correlación hipotetizan que este reforzamiento de los días de brisa invernales podría deberse a una mayor frecuencia en las condiciones anticiclónicas de invierno (Fig. 6).

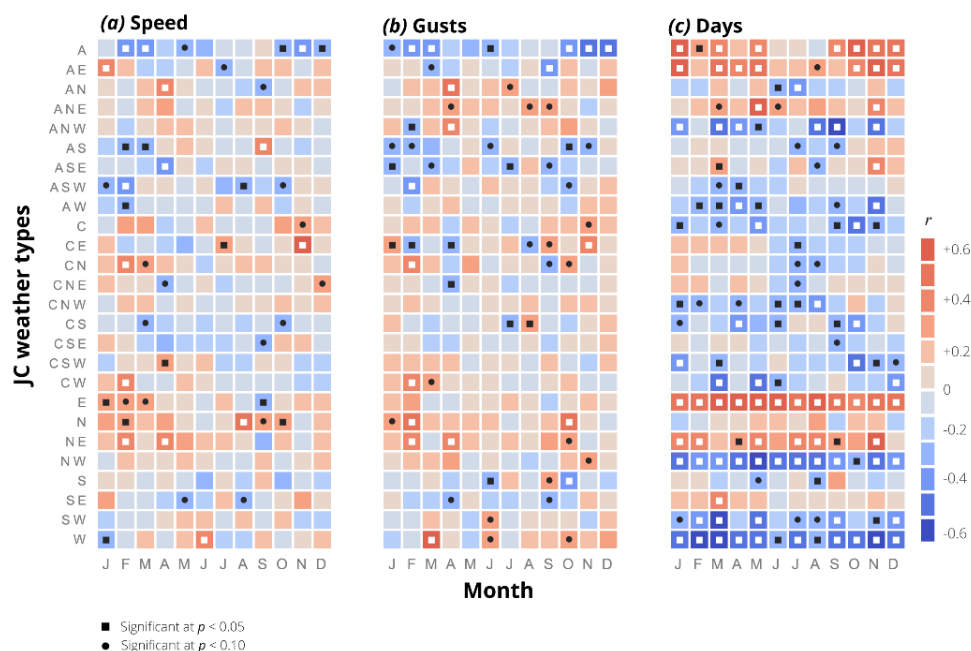


Fig. 6: Coeficientes de correlación mensuales de Pearson (r) entre la (a) velocidad media, (b) rachas máximas y (c) ocurrencia de brisa marina, y los 26 tipos de clima de Jenkinson y Collison (JC) para 1961–2019. Los cuadrados enmascaran el significado de r en $p < 0,05$ y los círculos en $p < 0,10$. Los colores de las barras se refieren a la magnitud y el signo de r .

El aumento en la actividad de brisa marina va acompañado de un debilitamiento en su velocidad, lo cual puede deberse a una mayor estabilidad atmosférica debido a la subsidencia de masas de aire cálidas del norte de África (Deng *et al.*, 2021). El debilitamiento de la velocidad media de la brisa es un resultado contrario a la hipótesis generalizada acerca de un reforzamiento en las circulaciones de brisa que dominan las tendencias costeras de viento en superficie en el este de España (Azorin-Molina *et al.*, 2014; Utrabo-Carazo *et al.*, 2022).

Las tendencias positivas de las rachas máximas introducen mayor complejidad a la comprensión de la variabilidad de los vientos locales, ya que la heterogeneidad en el

signo de sus tendencias sugiere que responde a mecanismos físico-locales. Correlaciones complementarias con gradientes de presión y temperatura tierra-mar, así como con índices NDVI presentan resultados poco conclusivos (Bedoya-Valestt *et al.*, 2022), evidenciando la necesidad de seguir investigando con el fin de revelar las causas detrás de este fenómeno. Sin embargo, es posible que este reforzamiento en las rachas de brisa, al ser impulsado por características y procesos a escala local, sea el resultado de una respuesta exacerbada por el cambio climático.

Finalmente, cabe resaltar que el debilitamiento de la circulación de brisa marina de verano, así como de su ocurrencia podría explicar las reducciones en las precipitaciones en zonas de interior, con implicaciones directas en la amplificación de sequías y desertificación (Millán *et al.*, 2005). El aumento de rachas cada vez más fuertes, pero más secas podrían ser la respuesta al efecto combinado del aumento de la temperatura del aire y el agotamiento de la humedad del suelo, la urbanización y la degradación de la tierra, lo que reduce la humedad disponible para la brisa marina (Pausas y Millán, 2019). Lo anterior muestra las implicaciones de llenar un nicho de investigación de cambios de la brisa marina en diversas esferas socioeconómicas y ambientales.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a AEMET por los datos de velocidad del viento observados. Esta investigación ha sido financiada por los siguientes proyectos: IBER-STILLING (RTI2018-095749-A-I00); y VENTS (GVA-AICO/2021/023). C.A.M ha contado con el apoyo de la beca Ramón y Cajal (RYC-2017-22830).

REFERENCIAS

- Arrillaga JA, de Arellano JVG, Bosveld F, et al (2018) Impacts of afternoon and evening sea-breeze fronts on local turbulence, and on CO₂ and radon-222 transport. *Q J R Meteorol Soc.* <https://doi.org/10.1002/qj.3252>
- Azorin-Molina C, Chen D, Tijm S, Baldi M (2011a) A multi-year study of sea breezes in a Mediterranean coastal site: Alicante (Spain). *Int J Climatol.* <https://doi.org/10.1002/joc.2064>
- Azorin-Molina C, Tijm S, Chen D (2011b) Development of selection algorithms and databases for sea breeze studies. *Theor Appl Climatol.* <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0454-4>
- Azorin-Molina C, Vicente-Serrano SM, Mcvigar TR, et al (2014) Homogenization and assessment of observed near-surface wind speed trends over Spain and Portugal, 1961-2011. *J Clim.* <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00652.1>
- Azorin-Molina C, Guijarro JA, McVicar TR, et al (2016) Trends of daily peak wind gusts in Spain and Portugal, 1961–2014. *J Geophys Res.* <https://doi.org/10.1002/2015JD024485>
- Bedoya-Valestt S, Azorin-Molina C, Gimeno L, *et al.* (2022) Opposite trends of sea-breeze speeds and gusts in Eastern Spain, 1961-2019, 30 March 2022, preprint available at Research Square <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1450729/v1>

- Deng K, Azorin-Molina C, Minola L, et al (2021) Global near-surface wind speed changes over the last decades revealed by reanalyses and CMIP6 model simulations. *J Clim*. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0310.1>
- Hamed KH, Ramachandra Rao A (1998) A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *J Hydrol*. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)
- Lebassi-Habtezion B, Gonzalez J, Bornstein R (2011) Modeled large-scale warming impacts on summer California coastal-cooling trends. *J Geophys Res Atmos*. <https://doi.org/10.1029/2011JD015759>
- Martin-Vide J, Lopez-Bustins JA (2006) The Western Mediterranean Oscillation and rainfall in the Iberian Peninsula. *Int J Climatol*. <https://doi.org/10.1002/joc.1388>
- Millán MM (2014) Extreme hydrometeorological events and climate change predictions in Europe. *J Hydrol*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.12.041>
- Olcina-Cantos J, Azorin-Molina C (2004) The meteorological importance of sea-breezes in the Levant region of Spain. *Weather*. <https://doi.org/10.1256/wea.176.03>
- Pausas JG, Millán MM (2019) Greening and Browning in a Climate Change Hotspot: The Mediterranean Basin. *Bioscience*. <https://doi.org/10.1093/biosci/biy157>
- Pazandeh-Masouleh Z, Walker DJ, Crowther JMC (2019) A long-term study of sea-breeze characteristics: A case study of the coastal city of Adelaide. *J Appl Meteorol Climatol*. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0251.1>
- Perez GMP, Silva Dias MAF (2017) Long-term study of the occurrence and time of passage of sea breeze in São Paulo, 1960–2009. *Int J Climatol*. <https://doi.org/10.1002/joc.5077>
- Ramis C, Jansà A, Alonso S (1990) Sea breeze in Mallorca. A numerical study. *Meteorol Atmos Phys*. <https://doi.org/10.1007/BF01314828>
- Roderick ML, Rotstayn LD, Farquhar GD, Hobbins MT (2007) On the attribution of changing pan evaporation. *Geophys Res Lett*. <https://doi.org/10.1029/2007GL031166>
- Shen L, Zhao C, Ma Z, et al (2019) Observed decrease of summer sea-land breeze in Shanghai from 1994 to 2014 and its association with urbanization. *Atmos Res*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.05.007>
- Shen L, Zhao C, Yang X (2021a) Insight Into the Seasonal Variations of the Sea-Land Breeze in Los Angeles With Respect to the Effects of Solar Radiation and Climate Type. *J Geophys Res Atmos*. <https://doi.org/10.1029/2020JD033197>
- Shen L, Zhao C, Yang X (2021b) Climate-Driven Characteristics of Sea-Land Breezes Over the Globe. *Geophys Res Lett*. <https://doi.org/10.1029/2020GL092308>
- Utrabo-Carazo, E., Azorin-Molina, C., Serrano, E., Aguilar, E., Brunet, M., & Guijarro, J. A. (2022). Wind stilling ceased in the Iberian Peninsula since the 2000s. *Atmospheric Research*, 106153.
- Vautard R, Cattiaux J, Yiou P, et al (2010) Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness. *Nat Geosci*. <https://doi.org/10.1038/ngeo979>
- Wohland, J., Folini, D., & Pickering, B. (2021). Wind speed stilling and its recovery due to internal climate variability. *Earth System Dynamics*, 12(4), 1239-1251.
- Young IR, Ribal A (2019) Multiplatform evaluation of global trends in wind speed and wave height. *Science* (80-). <https://doi.org/10.1126/science.aav9527>