aci avances en ciencias e ingenierías

Artículo/Article
Vol. 18, nro. 2
e4162

Viento en superficie en República Dominicana y áreas oceánicas adyacentes: ERA5 con validación observacional (1990–2020)

Ronny Gerónimo[1]*, Tomas Molina[2]

[1]Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD), República Dominicana

[2]Universitat de Barcelona: Barcelona, Catalunya, España

*Autor para correspondencia/Corresponding author: rgeronimo78@uasd.edu.do

Surface wind over the Dominican Republic and adjacent oceanic areas: ERA5 with observational validation (1990–2020)

Abstract

Surface-wind climatology over the Dominican Republic and adjacent oceanic areas was characterized for 1990–2020 using ERA5 monthly averaged data by hour of day. Wind speed and meteorological direction were derived from the zonal and meridional components at 10 m, records below 1 m s^{-1} were excluded from directional classification, and the remaining records were assigned to eight 45° sectors. Seasonal frequencies, monthly pressure–wind fields and diurnal cycles were analyzed. ERA5 performance was evaluated at monthly scale against observations from eleven stations of the Dominican Institute of Meteorology after quality control, verification of station metadata, vector averaging of direction and nearest-grid-cell matching. Easterly flow accounted for 70.25 % of classified records, increasing from 65.23 % in the dry season to 75.28 % in the wet season; northeasterly flow was more frequent in the dry season and southeasterly flow in the wet season. The validation included 3,537 monthly speed pairs and 3,229 direction pairs. ERA5 showed a mean speed bias of −0.40 m s^{-1}, a mean absolute error of 1.23 m s^{-1}, a root mean square error of 1.52 m s^{-1}, and a Pearson correlation of 0.269. The circular directional bias was −1.95°, the mean absolute angular error was 21.34°, and exact agreement among the eight sectors was 58.90 %. ERA5 captures the prevailing regional wind direction but shows limited skill in reproducing monthly variability and conditions at individual stations.

Keywords: surface wind, ERA5, observational validation, tropical circulation, easterly trade winds, circular statistics.

OPEN ACCESS

Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0

Editado por / Edited by:
Oscar Camacho

Recibido / Received:
2025-12-27

Aceptado / Accepted:
2026-07-09

Publicado en línea / Published online:
19/11/2026

Resumen

Se caracterizó la climatología del viento en superficie sobre la República Dominicana y las áreas oceánicas adyacentes durante 1990–2020 mediante datos mensuales promediados por hora del día del reanálisis ERA5. La velocidad y la dirección meteorológica se calcularon a partir de las componentes zonal y meridional del viento a 10 m; los registros inferiores a 1 m s^{-1} se excluyeron de la clasificación direccional y los restantes se asignaron a ocho

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4162

sectores de 45°. Se analizaron frecuencias estacionales, campos mensuales de presión y viento y ciclos diarios. El desempeño de ERA5 se evaluó a escala mensual mediante observaciones de once estaciones del Instituto Dominicano de Meteorología, después del control de calidad, la verificación de los metadatos de las estaciones, el promedio vectorial de la dirección y la selección de la celda más próxima. El flujo del este representó el 70.25 % de los registros clasificados y aumentó de 65.23 % en la estación seca a 75.28 % en la estación húmeda; el noreste fue más frecuente en la estación seca y el sureste en la húmeda. La validación incluyó 3537 pares mensuales de velocidad y 3229 de dirección. ERA5 presentó un sesgo medio de velocidad de −0.40 m s^{-1}, un error absoluto medio de 1.23 m s^{-1}, una raíz del error cuadrático medio de 1.52 m s^{-1} y una correlación de Pearson de 0.269. El sesgo circular fue de −1.95°, el error angular absoluto medio de 21.34° y la concordancia exacta entre los ocho sectores de 58.90 %. ERA5 reproduce la dirección predominante a escala regional, pero presenta capacidad limitada para representar la variabilidad mensual y las condiciones de estaciones individuales.

Palabras clave: viento en superficie, ERA5, validación observacional, circulación tropical, alisios del este, estadística circular.

INTRODUCCIÓN

La climatología sinóptica constituye una herramienta esencial para el estudio de patrones atmosféricos recurrentes y de su relación con el clima regional [1]. En este trabajo, ese enfoque se particulariza mediante una clasificación direccional del viento en superficie en ocho sectores, comparable con clasificaciones sinópticas tropicales basadas en las direcciones principales de la rosa de los vientos [2].

En este estudio, el término sinóptico se utiliza en un sentido climatológico ampliado, pues no se analizan mapas instantáneos de situaciones meteorológicas, sino datos mensuales promediados por hora del día del reanálisis ERA5 del Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo (ECMWF, por sus siglas en inglés). ERA5 ofrece campos horarios de alta resolución y una representación global coherente, lo que permite construir climatologías y analizar la variabilidad temporal de la circulación en superficie [3].

A diferencia de clasificaciones sinópticas centradas en la inspección o agrupación de mapas del tiempo, ampliamente utilizadas en climatología sinóptica [4, 5], el presente estudio aplica un análisis cuantitativo, sistemático y automatizado a datos climatológicos y meteorológicos de la República Dominicana.

El trabajo se enmarca en la meteorología tropical, donde la convección, la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), los vientos alisios y los ciclones tropicales ejercen una influencia determinante sobre la variabilidad climática regional [6]. En el Caribe, la circulación de bajo nivel está fuertemente condicionada por el Anticiclón Subtropical del Atlántico Norte (ASAN) y por el chorro de bajos niveles del Caribe, cuya intensidad y posición varían estacionalmente [1, 6].

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4162

La República Dominicana, situada en la porción oriental de la isla La Española (17.2°–20.2° N; 72.1°–68.35° W), se encuentra particularmente expuesta a la ZCIT, los alisios, las ondas del este y la actividad ciclónica propias del entorno caribeño [6]. Su compleja orografía puede modular la circulación superficial y la distribución espacial de las precipitaciones, como ocurre en otras islas y sectores montañosos del Caribe [6] (Fig. 1).

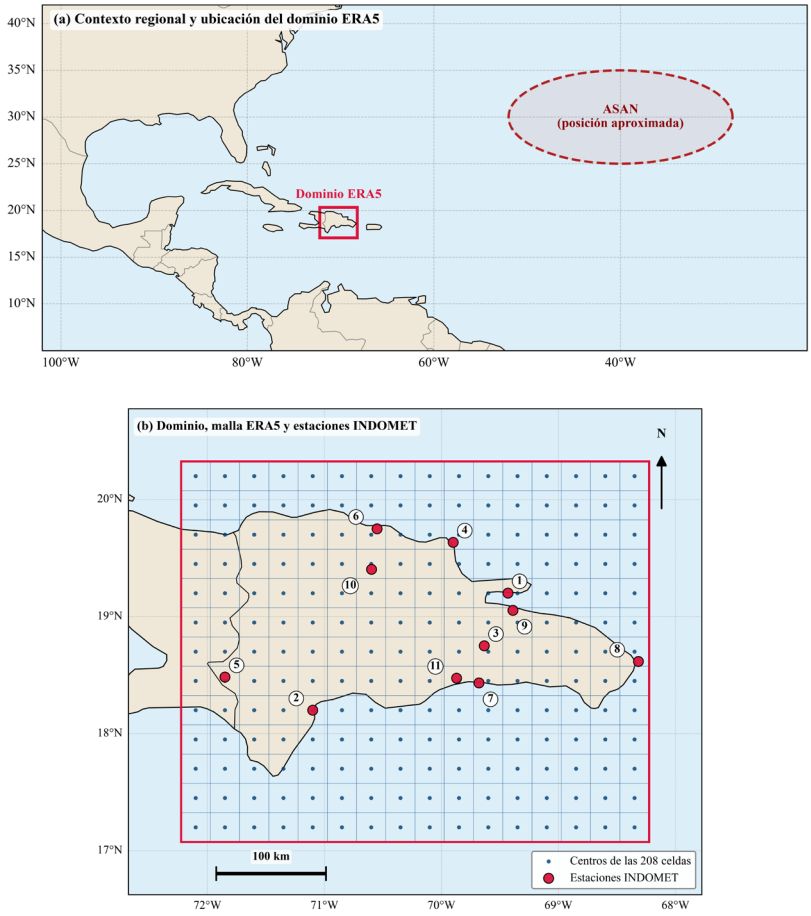


FIGURA 1. Área de estudio, contexto regional, malla ERA5 y estaciones observacionales utilizadas. A) Localización del dominio de estudio en el contexto del Caribe y representación esquemática de la posición climatológica aproximada del Anticiclón Subtropical del Atlántico Norte (ASAN). B) Centros de las 208 celdas ERA5 de la cuadrícula de 13 × 16, con resolución espacial de 0.25° × 0.25°, y localización de las once estaciones del Instituto Dominicano de Meteorología utilizadas para la validación. Los centros de la cuadrícula abarcan 17.2°–20.2° N y 72.10°–68.35° W. Los números 1–11 corresponden al orden de las estaciones presentado en la Tabla 1. La posición del anticiclón se presenta únicamente como referencia climatológica y no corresponde a un campo de presión calculado a partir del archivo ERA5 analizado. **Sistema de referencia cartográfica:** WGS 84. **Fuente cartográfica:** Natural Earth [7]; malla ERA5: Copernicus Climate Change Service [3]; estaciones meteorológicas: INDOMET (datos no publicados).

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4162

Estudios sobre Cuba han documentado la elevada frecuencia de la influencia anticiclónica oceánica, con el anticiclón del Atlántico o de Azores-Bermudas como uno de los sistemas sinópticos dominantes, así como una marcada estacionalidad de los procesos tropicales y ciclónicos [5, 8, 9]. Este marco regional resulta útil para contextualizar los patrones de advección superficial en la República Dominicana. Aunque el presente trabajo no aborda eventos extremos específicos, estos fenómenos forman parte del contexto climático en el cual se insertan las advecciones predominantes, entendidas como el desplazamiento horizontal de masas de aire en superficie.

En el Caribe, el ciclo de precipitación presenta una marcada estacionalidad, con un periodo seco invernal y, en amplios sectores, una distribución bimodal de las lluvias. Esta variabilidad está modulada por el ASAN, ZCIT y otros mecanismos regionales [6, 10, 11]. Para el presente análisis se adoptó la división regional de estación seca (noviembre–abril) y húmeda (mayo–octubre), empleada en estudios de circulación de la región [1]. Este patrón justifica un enfoque estacional en el análisis de la circulación superficial.

El uso del reanálisis ERA5 permite suplir la escasa disponibilidad de observaciones in situ, proporcionando un conjunto de datos global, continuo y físicamente consistente para caracterizar la circulación atmosférica en superficie [3]. En este contexto, el estudio tiene dos objetivos principales: a) caracterizar el patrón climatológico dominante del viento en superficie sobre la República Dominicana y las áreas oceánicas adyacentes, así como su variabilidad estacional y diaria durante 1990–2020; y b) evaluar la capacidad de ERA5 para representar la velocidad y la dirección mensuales del viento mediante su comparación con observaciones de once estaciones del Instituto Dominicano de Meteorología. Para ello, se aplica un procedimiento cuantitativo y automatizado que integra el cálculo de variables derivadas del viento a 10 m, su clasificación direccional, la elaboración de productos climatológicos y una validación independiente basada en métricas lineales y circulares. El enfoque proporciona una caracterización regional reproducible y permite delimitar tanto las capacidades como las limitaciones del reanálisis para representar las condiciones observadas en estaciones individuales.

Este análisis pretende contribuir al conocimiento de la climatología sinóptica regional, ofreciendo una base replicable para futuras aplicaciones en análisis climático, docencia y planificación territorial. En regiones tropicales, enfoques análogos basados en patrones sinópticos y análisis climatológico han sido aplicados con éxito en estudios de caso regionales [2].

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio implementa un enfoque cuantitativo, sistemático y reproducible, articulado en tres componentes metodológicos complementarios: a) procesamiento y análisis climatológico del reanálisis ERA5; b) caracterización espacial complementaria de la precipitación mediante WorldClim; y c) validación mensual de ERA5 mediante observaciones de once estaciones del Instituto Dominicano de Meteorología (Fig. 2).

Cada fase fue diseñada para garantizar la coherencia física, la reproducibilidad computacional y la aplicabilidad del análisis.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4162

La rama ERA5 resume la comprobación del conjunto de datos, el cálculo de velocidad y dirección, la clasificación en ocho sectores y las agregaciones climatológicas. La rama WorldClim representa el procesamiento independiente de los doce campos mensuales de precipitación para obtener la precipitación media anual como contexto espacial complementario. La rama INDOMET resume el control de calidad de los registros observacionales, la verificación de los metadatos de las estaciones, la agregación mensual, la extracción de ERA5 en la celda más próxima y el cálculo de métricas lineales y circulares. Las tres ramas convergen en la generación, comprobación e interpretación de los resultados. WorldClim no se comparó temporalmente con ERA5 debido a la diferencia entre sus periodos climatológicos.

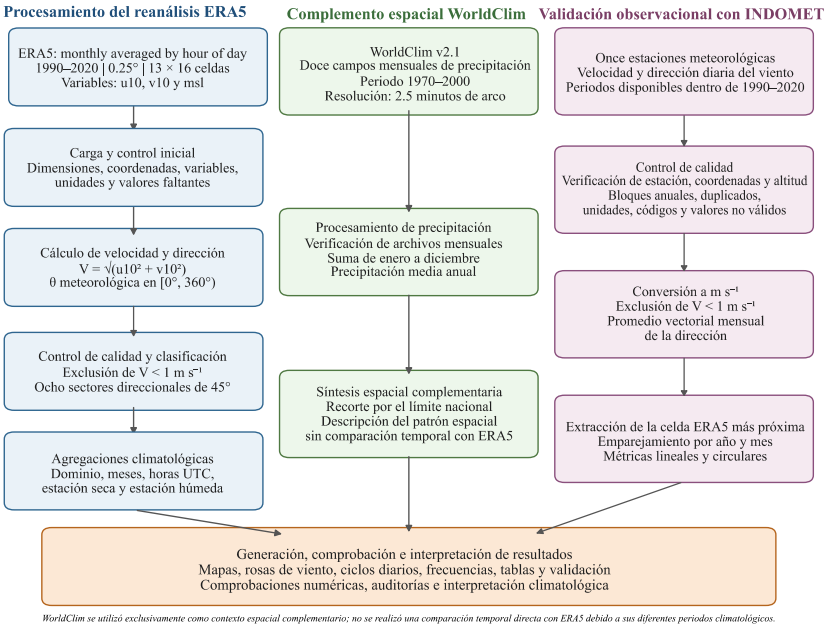


Figura 2. Esquema metodológico del análisis climatológico de ERA5, el contexto pluviométrico de WorldClim y la validación mensual con observaciones de INDOMET.

Datos y preprocesamiento

Se utilizaron datos del reanálisis ERA5, correspondientes al producto *monthly averaged by hour of day* del *Climate Data Store de Copernicus*, con una resolución espacial de 0.25 °×0.25° y cobertura temporal para el periodo 1990–2020 [3]. En la latitud media de la República Dominicana, aproximadamente 18.7° N, esta resolución equivale a celdas de aproximadamente 27.8 km en dirección norte-sur y 26.3 km en dirección este-oeste. Las dimensiones longitudinales varían ligeramente con la latitud debido a la convergencia de los meridianos. Este conjunto de datos permite caracterizar la variabilidad diurna y estacional del viento. El ciclo diurno del viento superficial ha sido documentado mediante ERA5 y observaciones meteorológicas; sobre superficies continentales, los máximos de velocidad tienden a ocurrir durante el día [12].

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4162

Las coordenadas, altitudes y cantidades de pares mensuales utilizados por estación se presentan en la Tabla 1.

TABLA 1. Estaciones de INDOMET utilizadas en la validación mensual de ERA5.

N.°	Estación	Latitud (°N)	Longitud (°W)	Altitud (m)	Pares de velocidad	Pares de dirección
1	Arroyo Barril	19.200500	69.431440	37	299	296
2	Barahona	18.200000	71.100000	10	344	126
3	Bayaguana	18.750000	69.633333	61	349	331
4	Cabrera	19.633333	69.900000	15	96	96
5	Jimaní	18.483333	71.850000	31	355	350
6	La Unión	19.750000	70.550000	5	370	344
7	Las Américas	18.433060	69.679590	7	353	344
8	Punta Cana	18.616667	68.316667	7	371	370
9	Sabana de la Mar	19.052667	69.388833	11	347	344
10	Santiago	19.403050	70.597810	170	326	320
11	Santo Domingo	18.473389	69.870528	14	327	308

Nota. El número de pares varía debido a diferencias en la cobertura temporal, datos ausentes y controles de calidad. Las longitudes se expresan en grados oeste. La numeración coincide con la empleada en la Figura 1.

Las variables analizadas fueron: presión al nivel del mar (MSLP [Pa]) y las componentes: zonal (u_{10}) y meridional (v_{10}) del viento a 10 m [m s^{-1}]. El dominio espacial abarca la República Dominicana y las zonas oceánicas adyacentes (17.2°–20.2° N; 72.1°– 68.35° W), equivalente a 208 celdas del reanálisis, de las cuales aproximadamente 66 tienen su centro sobre el territorio nacional.

Las coordenadas de las estaciones y la cartografía se expresaron en grados decimales utilizando el sistema geodésico WGS 84 (EPSG:4326); las coordenadas de ERA5 se utilizaron en su cuadrícula geográfica regular de latitud–longitud.

Las rosas de viento de la Fig. 3 representan la distribución direccional agregada de los registros clasificados en las 208 celdas de la cuadrícula ERA5 del dominio de estudio. Por tanto, sintetizan conjuntamente las condiciones de la República Dominicana y de las áreas oceánicas adyacentes.

Cálculo de variables derivadas

A partir de las componentes zonal u_{10} y meridional v_{10} del viento a 10 m se calcularon la velocidad V y la dirección meteorológica θ. La velocidad se obtuvo mediante:

$$V = \sqrt{u_{10}^2 + v_{10}^2} \tag{1}$$

donde u_{10} representa la componente positiva hacia el este y v_{10} la componente positiva hacia el norte.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4162

La dirección meteorológica del viento se calculó mediante:

$$\theta = \left[\left(\frac{180}{\pi}\right) atan2(-u_{10}, -v_{10}) + 360\right] mod(360) \quad . \tag{2}$$

En esta expresión, atan2 es la función arcotangente de dos argumentos y el factor $\frac{180}{\pi}$ convierte el resultado de radianes a grados. La operación módulo permite normalizar la dirección al intervalo $0° \leq \theta < 360°$. Los signos negativos responden a la convención meteorológica, según la cual la dirección indica el punto cardinal desde el cual procede el viento y se mide en sentido horario a partir del norte. Por tanto, 0° corresponde al norte, 90° al este, 180° al sur y 270° al oeste [13].

Clasificación direccional

Cada registro válido se asignó a uno de ocho sectores direccionales: norte (N), noreste (NE), este (E), sureste (SE), sur (S), suroeste (SW), oeste (W) y noroeste (NW). La clasificación se realizó utilizando sectores de 45°, delimitados de la siguiente manera:

$$\text{N: } 337.5° \leq \theta < 360° \text{o } 0° \leq \theta < 22.5°.$$
$$\text{NE: } 22.5° \leq \theta < 67.5°.$$
$$\text{E: } 67.5° \leq \theta < 112.5°.$$
$$\text{SE: } 112.5° \leq \theta < 157.5°.$$
$$\text{S: } 157.5° \leq \theta < 202.5°.$$
$$\text{SW: } 202.5° \leq \theta < 247.5°.$$
$$\text{W: } 247.5° \leq \theta < 292.5°.$$
$$\text{NW: } 292.5° \leq \theta < 337.5°.$$

Los registros con velocidades inferiores a 1 m s^{-1} se consideraron condiciones de viento débil o calma y se excluyeron de la clasificación direccional. Cuando la magnitud del vector viento se aproxima a cero, pequeñas variaciones en sus componentes zonal y meridional pueden producir cambios relativamente grandes en el ángulo calculado; por ello, la dirección resulta menos estable para la clasificación sectorial.

El procedimiento se implementó mediante un script en Python 3.11. Se procesaron 1 857 024 registros y se excluyeron 213 636 con velocidades inferiores a 1 m s^{-1}. En consecuencia, 1 643 388 registros (88.5 % del total) fueron clasificados en los ocho sectores direccionales.

Visualización de resultados

Se elaboraron tres productos gráficos principales:

a) mapas mensuales promedio de presión y viento,
b) rosas de viento estacionales, y
c) ciclos horarios de presión y velocidad del viento.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4162

Estos productos permiten interpretar la circulación superficial en su contexto estacional y diurno, incluyendo la oscilación barométrica semidiurna tropical [14].

El procesamiento se realizó en Python 3.11 con bibliotecas *xarray*, *numpy*, *matplotlib* y *cartopy*, documentado en *notebooks* reproducibles. Solo se aplicó revisión manual para la selección de figuras representativas.

Complemento con datos de precipitación

Para complementar espacialmente la caracterización de la circulación superficial, se incorporaron los doce campos mensuales de precipitación de WorldClim v2.1 para el periodo climatológico 1970–2000 [15]. Los campos se verificaron, sumaron y recortaron según el límite nacional para obtener la precipitación media anual. Este producto se utilizó exclusivamente como contexto espacial para describir los contrastes pluviométricos del territorio dominicano y no se comparó temporalmente con ERA5, debido a la diferencia entre los periodos climatológicos de ambas fuentes.

Validación con observaciones de INDOMET

La representación mensual de la velocidad y la dirección del viento en ERA5 se evaluó mediante registros observacionales procedentes de once estaciones del Instituto Dominicano de Meteorología. Los archivos originales contenían valores diarios organizados por meses y bloques anuales. Antes de procesarlos, se verificaron la identidad de la estación, las coordenadas, la altitud, la variable meteorológica, el año, la cobertura temporal, las unidades, los bloques duplicados, los códigos no reconocidos y los valores físicamente no válidos. La identidad y los metadatos se comprobaron independientemente en el encabezado de cada bloque anual. Los bloques identificados como pertenecientes a una estación diferente fueron excluidos sin modificar los archivos originales. Las variantes históricas compatibles de las coordenadas de una misma estación se consolidaron mediante una regla reproducible y se documentaron en tablas de auditoría.

Las velocidades observadas se convirtieron a metros por segundo. Para calcular la velocidad mensual se exigió un mínimo de diez observaciones diarias válidas por mes. Para la dirección, los valores diarios de velocidad y dirección se emparejaron por fecha; posteriormente, se excluyeron los registros con velocidades inferiores a 1 m s^{-1}, se reconstruyeron las componentes zonal y meridional, se calcularon sus promedios mensuales y se obtuvo la dirección meteorológica a partir de esos promedios vectoriales. También se exigió un mínimo de diez pares diarios válidos para conservar una dirección mensual.

Para ERA5, los 24 valores mensuales promediados por hora del día se agregaron para obtener una velocidad y una dirección representativas de cada mes. **La velocidad se calculó como el promedio de las 24 magnitudes horarias, mientras que la dirección se determinó a partir de los valores medios de las componentes zonal y meridional.** Los valores se extrajeron de la celda ERA5 más próxima a las coordenadas verificadas de cada estación y se emparejaron con INDOMET por año y mes.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4162

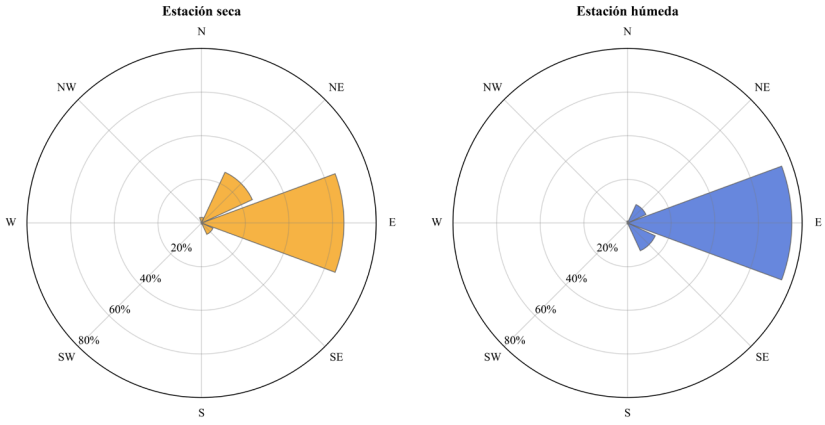
La velocidad se evaluó mediante el sesgo medio, el error absoluto medio, la raíz del error cuadrático medio y el coeficiente de correlación de Pearson. Para la dirección se calcularon el sesgo circular, el error angular absoluto medio y la concordancia exacta entre los ocho sectores direccionales de 45°. Las métricas se obtuvieron para el conjunto completo, para cada estación y para las estaciones climáticas seca y húmeda. La comparación representa una validación a escala mensual del comportamiento climatológico y no una evaluación de observaciones horarias, diarias o de eventos meteorológicos individuales.

RESULTADOS

El análisis direccional del viento en superficie sobre la República Dominicana y las áreas oceánicas adyacentes, basado en datos mensuales promediados por hora del día del reanálisis ERA5 durante 1990–2020, mostró un predominio global de los flujos del este (E), que representaron el 70.25 % de los registros clasificados, seguidos por el noreste (NE; 17.44 %) y el sureste (SE; 9.84 %). Cada una de las demás direcciones presentó una frecuencia inferior al 2 %, lo que confirma la dominancia de los alisios del este, modulados por la circulación tropical general y el ASAN [1,5,6]. Estacionalmente, la dirección E representó el 65.23 % durante la estación seca, seguida por NE (25.59 %) y SE (5.70 %). Durante la estación húmeda, la frecuencia de E aumentó al 75.28 %, mientras que SE alcanzó el 13.98 % y NE disminuyó al 9.28 % (Fig. 3).

El análisis estacional (Fig. 3) muestra que el viento del este domina durante todo el año, con una mayor frecuencia en la estación húmeda (mayo–octubre), mientras que en la estación seca (noviembre–abril) aumenta la influencia relativa del noreste. Este contraste es coherente con la reorganización estacional de la circulación caribeña, modulada por el ASAN y la ZCIT [6, 10]. Las advecciones desde el sur y el oeste fueron escasas (< 4 %) y podrían estar asociadas, en determinados periodos, con configuraciones atmosféricas perturbadas; no obstante, esta relación no fue evaluada explícitamente en el presente estudio.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4162



Frecuencia relativa del viento por estación y dirección

Estación	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Seca	2.55 %	25.59 %	65.23 %	5.70 %	0.51 %	0.02 %	0.02 %	0.36 %
Húmeda	0.92 %	9.28 %	75.28 %	13.98 %	0.48 %	0.00 %	0.00 %	0.06 %

Figura 3. Distribución estacional de la dirección del viento en la República Dominicana y las áreas oceánicas adyacentes durante 1990–2020. Las rosas de viento no corresponden a una estación meteorológica específica, sino a la agregación de los registros clasificados en las 208 celdas de la cuadrícula ERA5 del dominio estudiado. Se presentan los resultados de la estación seca (noviembre–abril) y de la estación húmeda (mayo–octubre). Se excluyeron las velocidades inferiores a 1 m s^{-1} y las frecuencias se normalizaron respecto al total de registros clasificados en cada estación climática; por tanto, las ocho direcciones suman 100 % antes del redondeo.

El ciclo diario del viento (Fig. 4) presenta un máximo vespertino, más pronunciado durante la estación seca. Este resultado es coherente con estudios del ciclo diurno del viento superficial que muestran máximos diurnos sobre superficies continentales y relacionan ese comportamiento con la evolución térmica y la estabilidad de la capa límite [12]. Las diferencias observadas entre las estaciones seca y húmeda podrían estar relacionadas con cambios estacionales en el gradiente de presión y en la estabilidad atmosférica; sin embargo, estos mecanismos no fueron evaluados explícitamente en el presente estudio. En las zonas costeras, parte de la señal también podría estar influida por circulaciones de brisa mar–tierra.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4162

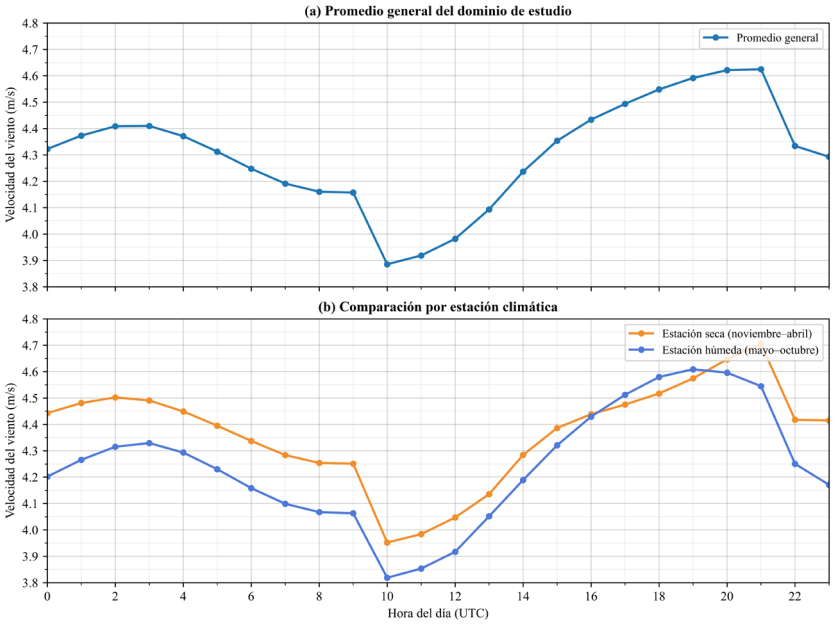


Figura 4. Ciclo diario climatológico de la velocidad del viento a 10 m sobre el dominio de estudio que cubre la República Dominicana y áreas adyacentes (1990–2020), calculado a partir de datos mensuales promediados por hora del día del reanálisis ERA5 y promediados espacialmente sobre las 208 celdas: a) promedio general del dominio; b) comparación entre la estación seca (noviembre–abril) y la estación húmeda (mayo–octubre). La velocidad se expresa en m s^{-1} y las horas en UTC.

El ciclo diario climatológico de la presión media al nivel del mar presentó la oscilación semidiurna característica de las regiones tropicales. En el promedio general del dominio se identificaron máximos a las 3:00 y 15:00 UTC y mínimos a las 8:00 y 20:00 UTC. El rango pico–valle fue de 2.64 hPa, equivalente a una semiamplitud aproximada de 1.32 hPa y consistente con observaciones previas [14]. Este patrón se mantuvo en ambas estaciones climáticas; sin embargo, la presión durante la estación seca fue superior a la registrada durante la estación húmeda en todas las horas del día, con diferencias de 0.60–1.44 hPa compatibles con la variabilidad estacional del ASAN descrita para el Caribe [6] (Fig. 5).

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4162

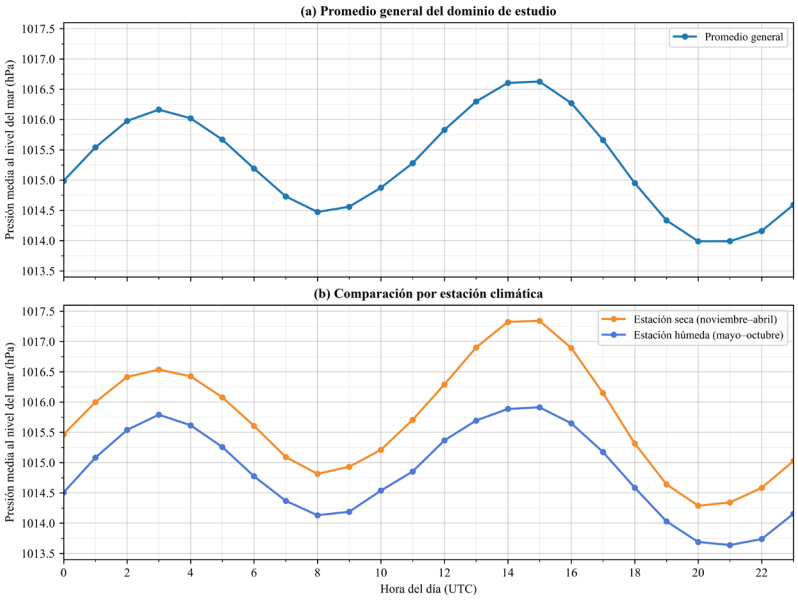


Figura 5. Ciclo diario climatológico de la presión media al nivel del mar (MSLP) sobre el dominio de estudio, calculado a partir de datos mensuales promediados por hora del día del reanálisis ERA5 y promediados espacialmente sobre las 208 celdas: a) promedio general del dominio; b) comparación entre la estación seca (noviembre–abril) y la estación húmeda (mayo–octubre). La presión se expresa en hPa y las horas en UTC.

Los mapas mensuales (Fig. 6) muestran un patrón estacional cíclico:

La circulación superficial regional está influida por el ASAN, cuya variabilidad estacional modula la intensidad de los alisios y la subsidencia sobre el Caribe [6, 10]. En amplios sectores del Caribe, el ciclo estacional y bimodal de la precipitación resulta de la interacción entre el ASAN, la ZCIT y otros mecanismos regionales, con modulación adicional del chorro de bajos niveles del Caribe y de la piscina cálida del Atlántico [6, 10]. En el Caribe central, incluidos episodios que afectan a la República Dominicana y Puerto Rico, las lluvias primaverales marcan el final de la estación seca y pueden estar asociadas con perturbaciones subtropicales [11]. Los mapas mensuales (Fig. 6) muestran un patrón estacional cíclico:

- En la estación seca predominan los vientos del E, con una mayor contribución relativa del NE, y se registran presiones más elevadas.
- En la estación húmeda, se fortalecen los flujos del E–SE, acompañados de mayor humedad y actividad convectiva.

En septiembre–octubre, el campo medio de presión se debilita y las isobaras presentan una configuración menos regular. Este comportamiento es coherente con el carácter transicional de la circulación del ASAN durante el otoño boreal, cuando se debilitan los alisios y la subsidencia respecto de los periodos de mayor intensidad [6] . El análisis realizado no permite atribuir esta señal a eventos individuales específicos.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4162

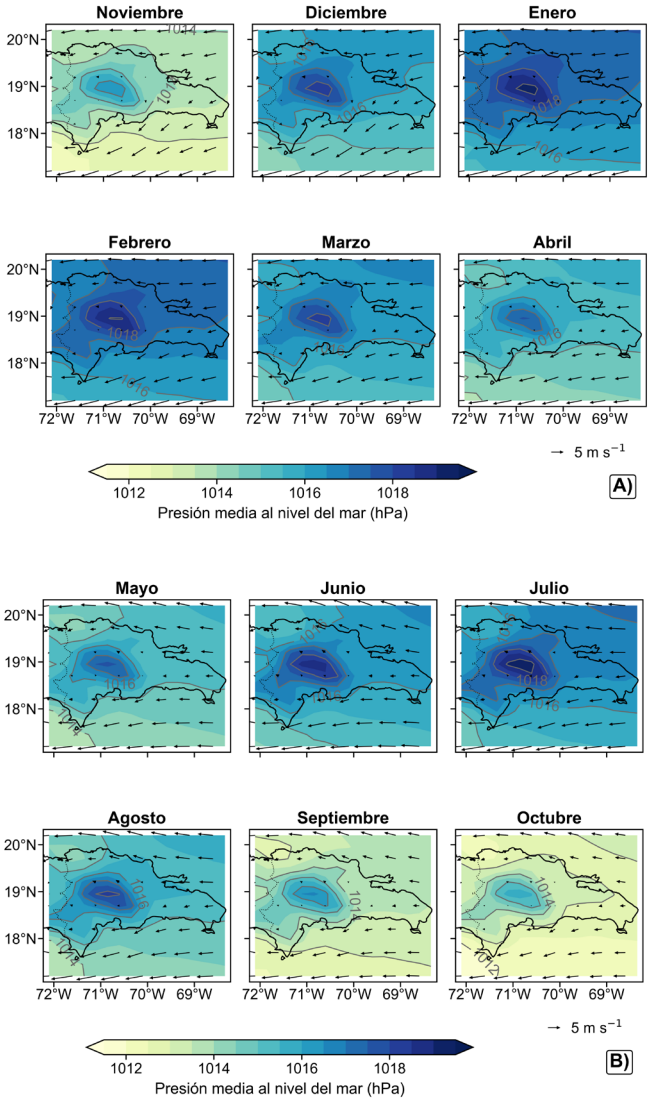


Figura 6. Climatología mensual de la presión media al nivel del mar y del viento a 10 m. El sombreado y las isobaras representan la presión media al nivel del mar en hPa, mientras que los vectores representan las componentes medias mensuales u_{10} y v_{10}. A) Estación seca, de noviembre a abril. B) Estación húmeda, de mayo a octubre. La escala vectorial corresponde a 5 m s^{-1}.

La frecuencia estacional de las direcciones del viento (Fig. 7) reafirma el predominio del este en ambas estaciones. Su frecuencia aumentó de 65.23 % en la estación seca a 75.28 % en la estación húmeda. El noreste disminuyó de 25.59 % a 9.28 %, mientras que el sureste aumentó de 5.70 % a 13.98 %. Las restantes direcciones representaron, en conjunto, 3.47 % y 1.46 % de los registros clasificados, respectivamente.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4162

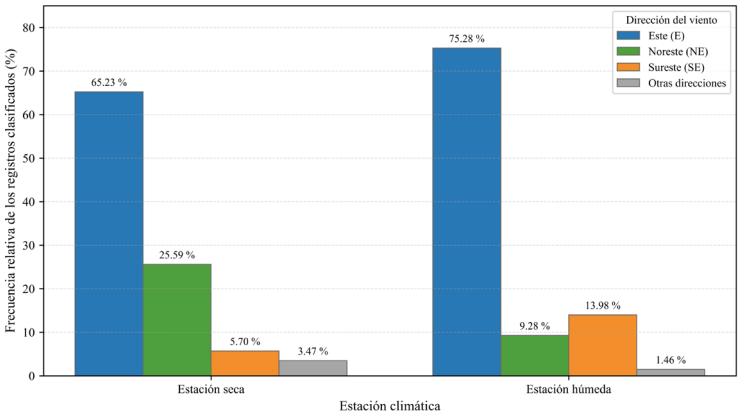


Figura 7. Frecuencia relativa de las direcciones predominantes del viento por estación climática durante 1990–2020. Los porcentajes se calcularon respecto de todos los registros clasificados de cada estación después de excluir velocidades inferiores a 1 m s-1. La categoría «Otras direcciones» reúne N, S, SO, O y NO. Las abreviaturas SO, O y NO en español equivalen a SW, W y NW en inglés, respectivamente

El patrón espacial de precipitación media anual (Fig. 8), obtenido a partir de WorldClim v2.1 [15], muestra mayores acumulados en sectores montañosos del centro y noreste y menores valores hacia el suroeste. Esta distribución se utiliza como contexto pluviométrico complementario para interpretar la circulación superficial y no constituye una validación directa de los resultados obtenidos con ERA5. La comparación es descriptiva y no implica atribuir causalidad entre el patrón de viento analizado y la distribución de la precipitación.

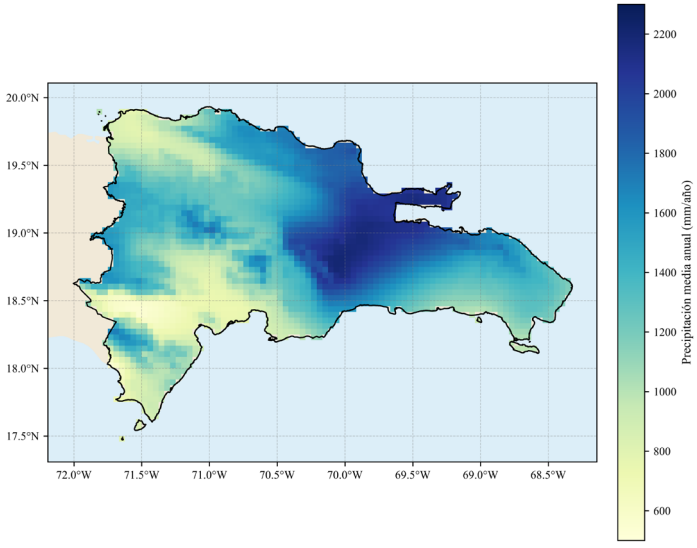


Figura 8. Precipitación media anual climatológica (mm/año) en la República Dominicana, obtenida mediante la suma de los doce campos mensuales de WorldClim v2.1 para el periodo 1970–2000 y recortada según el límite nacional. Resolución espacial: 2.5 minutos de arco. Fuente: WorldClim v2.1 [15].

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4162

Validación mensual con observaciones de INDOMET

La Fig. 9 resume la validación mensual con observaciones de once estaciones de INDOMET. El panel A compara las velocidades mensuales de ERA5 e INDOMET; la línea discontinua representa la relación 1:1. Los paneles B y C muestran, respectivamente, la raíz del error cuadrático medio de la velocidad y el error angular absoluto medio de la dirección por estación. Las métricas se obtuvieron después del control de calidad, la verificación de la identidad y los metadatos de cada bloque anual, la agregación mensual y el emparejamiento temporal con la celda ERA5 más próxima. El número de meses disponibles varía entre estaciones.

La comparación produjo 3537 pares mensuales válidos para la velocidad y 3229 para la dirección. ERA5 presentó un sesgo medio de −0.40 m s^{-1}, lo que indica una subestimación media de la velocidad observada en el conjunto de estaciones. El error absoluto medio fue de 1.23 m s^{-1}, la raíz del error cuadrático medio de 1.52 m s^{-1} y la correlación de Pearson de 0.269. Esta asociación positiva, aunque débil, indica que el reanálisis reproduce solamente una parte de la variabilidad mensual registrada por las estaciones.

El desempeño de la velocidad fue semejante entre estaciones climáticas. Durante la estación seca se obtuvo una raíz del error cuadrático medio de 1.50 m s^{-1} y una correlación de 0.287, mientras que durante la estación húmeda estos valores fueron 1.53 m s^{-1} y 0.252, respectivamente.

Para la dirección, el sesgo circular agregado fue de −1.95°, valor próximo a cero que indica ausencia de una rotación sistemática importante al considerar conjuntamente todas las estaciones. El error angular absoluto medio fue de 21.34° y la concordancia exacta entre los ocho sectores direccionales alcanzó 58.90 %. La concordancia fue de 57.38 % durante la estación seca y de 60.41 % durante la estación húmeda.

El desempeño fue heterogéneo entre estaciones. El error angular absoluto medio varió entre 11.22° en Punta Cana y 43.03° en Barahona, mientras que la concordancia sectorial osciló entre 3.17 % en Barahona y 87.79 % en La Unión. Para la velocidad, la raíz del error cuadrático medio varió entre 0.80 m s^{-1} en Bayaguana y 2.79 m s^{-1} en Cabrera. En conjunto, ERA5 representa parcialmente la orientación regional predominante del viento, pero presenta limitaciones para reproducir su magnitud y dirección mensuales en estaciones individuales.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4162

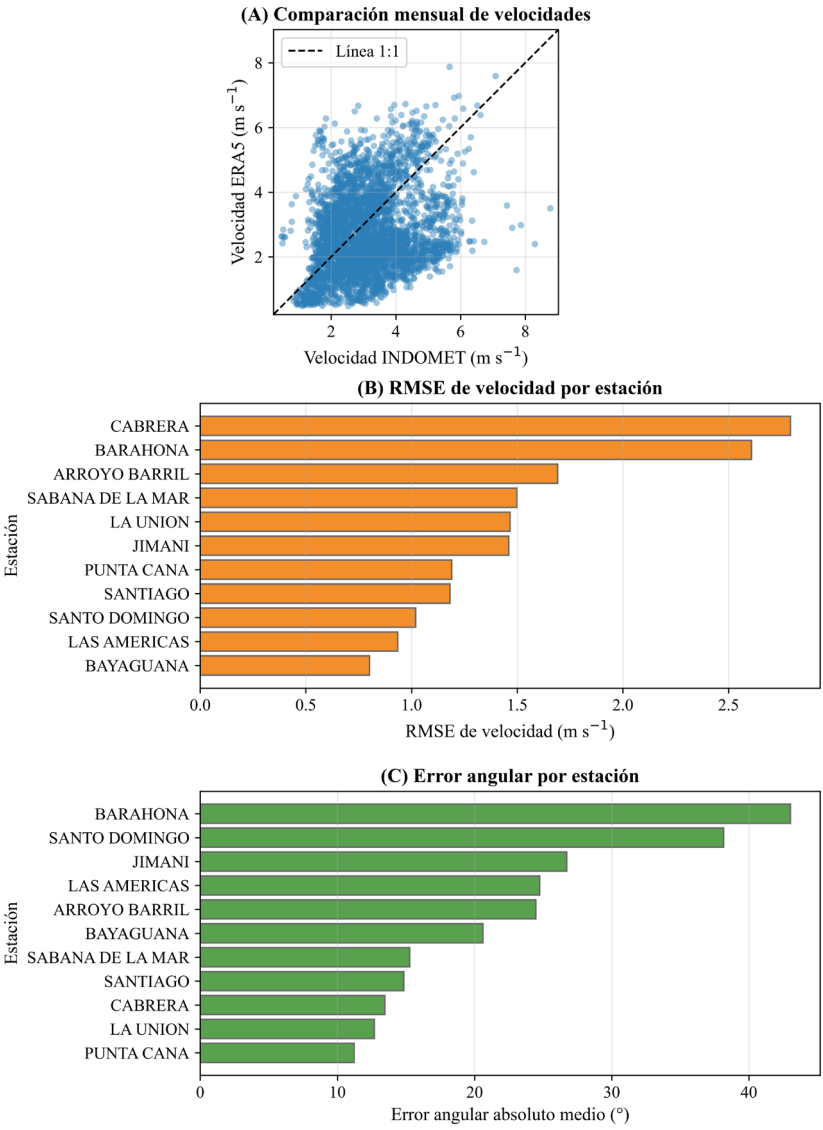


Figura 9. Validación mensual de ERA5 con once estaciones de INDOMET: A) comparación de velocidades y línea de referencia 1:1; B) raíz del error cuadrático medio de la velocidad por estación; C) error angular absoluto medio de la dirección por estación.

DISCUSIÓN

El análisis direccional del viento en superficie sobre la República Dominicana, realizado con datos mensuales promediados por hora del día del reanálisis ERA5 para el periodo 1990–2020, evidencia el predominio persistente de flujos del este, que constituyen más

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4162

del 70 % de los registros válidos. Este régimen es coherente con la influencia regional de los alisios y del ASAN documentada para el Caribe y áreas vecinas [1, 5, 6].

La variabilidad estacional revela una clara alternancia entre la estación seca, con predominio del este, mayor participación relativa del noreste y presiones más elevadas, y la estación húmeda, con fortalecimiento de los flujos del este y sureste, acompañados de mayor humedad y convección. Este comportamiento es coherente con la estacionalidad de la circulación caribeña y con el papel del ASAN y la ZCIT en la modulación del ciclo de precipitación [6, 10].

De la misma manera, el análisis del ciclo diurno del viento y la presión muestra la presencia de una oscilación barométrica semidiurna tropical y máximos diurnos de velocidad del viento, coherentes respectivamente con la literatura sobre mareas atmosféricas tropicales [14] y con estudios globales del ciclo diurno del viento superficial, especialmente sobre tierra [12]. El patrón espacial de precipitación de WorldClim aporta un contexto complementario con la influencia del relieve: los mayores acumulados se concentran en sectores montañosos del centro y noreste, mientras que los menores se observan hacia el suroeste. Esta comparación es descriptiva y no constituye una prueba estadística de causalidad ni una validación temporal directa del análisis ERA5.

Desde el punto de vista metodológico, el enfoque propuesto, basado en la clasificación direccional automatizada y en el uso de datos mensuales del reanálisis ERA5 promediados por hora del día, constituye una metodología eficiente, replicable y adaptable a estudios sinópticos en otras regiones tropicales con baja densidad de observaciones.

En conjunto, los resultados aportan una caracterización climatológica regional y reproducible del régimen de vientos en superficie en la República Dominicana y ofrecen una base útil para aplicaciones en meteorología operativa, información de base potencialmente útil para futuras evaluaciones de riesgos hidrometeorológicos, modelización climática y planificación territorial. Futuras investigaciones podrían profundizar en la interacción entre los patrones sinópticos identificados y la ocurrencia de eventos extremos, como ciclones tropicales o lluvias torrenciales, a fin de fortalecer la comprensión del sistema climático regional.

La validación observacional mostró que ERA5 representa parcialmente la orientación regional predominante del viento, pero su desempeño disminuye cuando se evalúa la variabilidad mensual y las estaciones individuales. El sesgo circular agregado de −1.95° fue próximo a cero; sin embargo, este indicador no debe interpretarse aisladamente, porque diferencias positivas y negativas entre estaciones pueden compensarse. El error angular absoluto medio de 21.34° y la concordancia sectorial de 58.90 % proporcionan una evaluación más completa de la correspondencia direccional.

La correlación de 0.269 para la velocidad indica una capacidad limitada para reproducir la variabilidad mensual observada. Además, las diferencias entre estaciones fueron considerables: mientras Punta Cana y La Unión mostraron una correspondencia direccional elevada, Barahona presentó un error angular próximo a la amplitud de un sector de 45°. Esta heterogeneidad puede estar relacionada con la resolución espacial de 0.25° de ERA5, la complejidad orográfica y costera, la exposición local de los

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4162

instrumentos, la distancia entre las estaciones y los centros de las celdas, las diferencias de cobertura temporal y los procedimientos de promediado. La resolución efectiva de los reanálisis puede limitar la representación de procesos de escala fina y de efectos asociados con la topografía local [16].

Por consiguiente, ERA5 resulta adecuado para describir patrones climatológicos regionales y direcciones predominantes, pero no sustituye las observaciones locales ni debe utilizarse como representación exacta de la velocidad o de la dirección a escala mensual en cada emplazamiento.

Limitaciones y alcance

ERA5 es un producto de reanálisis que combina un modelo de pronóstico, observaciones y un sistema de asimilación para producir estimaciones coherentes del estado atmosférico [3, 17]. Como ocurre con otros reanálisis, su representación está sujeta a incertidumbres asociadas al modelo, al sistema de asimilación, a la disponibilidad de observaciones y a la resolución efectiva, que puede limitar la representación de procesos de menor escala [16, 17]. En este estudio, esas limitaciones se reflejan en las diferencias observadas entre ERA5 y las estaciones individuales de INDOMET. Además, el análisis se limita a variables superficiales y no aborda procesos en niveles superiores ni eventos extremos (p. ej., ciclones tropicales o vaguadas profundas). No obstante, la caracterización direccional obtenida ofrece una base robusta para investigaciones futuras sobre la relación entre patrones sinópticos y fenómenos extremos en la República Dominicana.

El complemento de precipitación de WorldClim corresponde al período 1970–2000, distinto del período ERA5 (1990–2020); por ello, se utilizó únicamente como referencia climatológica espacial y no para una comparación temporal directa.

CONCLUSIONES

El régimen de viento a 10 m sobre la República Dominicana y las áreas oceánicas adyacentes estuvo dominado por flujos del este durante 1990–2020. Esta dirección representó el 70.25 % de los registros clasificados y aumentó de 65.23 % durante la estación seca a 75.28 % durante la estación húmeda. El noreste adquirió mayor importancia relativa en la estación seca, mientras que el sureste aumentó durante la húmeda.

Los campos mensuales y los ciclos diarios de presión y velocidad permitieron caracterizar la modulación estacional y diurna de la circulación superficial. La precipitación de WorldClim aportó un contexto espacial complementario para interpretar los contrastes pluviométricos del territorio dominicano, sin constituir una validación temporal de ERA5.

La comparación con once estaciones de INDOMET mostró que ERA5 reproduce parcialmente la dirección regional predominante, con una concordancia sectorial global de 58.90 %, pero presenta una correlación débil para la velocidad mensual y diferencias importantes entre estaciones. En consecuencia, el reanálisis constituye una herramienta útil para la caracterización climatológica regional, aunque no sustituye las observaciones in situ. Investigaciones posteriores deberán examinar la sensibilidad de los resultados a

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4162

la resolución espacial, la orografía, la exposición local de los instrumentos, la distancia entre las estaciones y los centros de las celdas y la cobertura observacional.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Dominicano de Meteorología (INDOMET) por facilitar, para fines académicos y científicos, los registros históricos de velocidad y dirección del viento en superficie utilizados en la validación mensual de ERA5. Asimismo, agradecen al Departamento de Física Aplicada de la Universitat de Barcelona por las facilidades académicas brindadas para el desarrollo de este estudio. R. Gerónimo agradece a la Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD) la formación académica y científica recibida en esa institución, así como a su Escuela de Física el apoyo brindado para el desarrollo de esta investigación. Los datos ERA5 fueron obtenidos del Copernicus Climate Change Service (C3S) del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), y los datos de precipitación de WorldClim v2.1 se obtuvieron de su repositorio oficial. Este trabajo no recibió financiamiento específico de agencias del sector público, comercial o sin fines de lucro.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: R. Gerónimo, T. Molina.
Metodología: R. Gerónimo.
Análisis formal: R. Gerónimo.
Investigación: R. Gerónimo.
Curación de datos: R. Gerónimo.
Recursos: R. Gerónimo.
Validación: R. Gerónimo.
Visualización: R. Gerónimo.
Redacción – borrador original: R. Gerónimo.
Redacción – revisión y edición: R. Gerónimo, T. Molina.
Supervisión: T. Molina.

DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE TECNOLOGÍAS GENERATIVAS Y ASISTIDAS POR IA EN EL PROCESO DE REDACCIÓN

Durante la preparación y revisión de este manuscrito, los autores utilizaron **ChatGPT, de OpenAI**, como herramienta de apoyo para la revisión lingüística, la mejora de la claridad y coherencia formal del texto, la organización de las respuestas a los revisores y la revisión técnica de fragmentos de código.

La herramienta no fue utilizada de manera autónoma para generar datos observacionales, establecer decisiones metodológicas, determinar resultados ni sustituir la interpretación científica de los autores. Los cálculos y análisis fueron ejecutados y verificados por los autores mediante los procedimientos computacionales descritos en el manuscrito. Todo el contenido asistido fue revisado críticamente por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por la exactitud, originalidad, interpretación y versión final del trabajo.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4162

DECLARACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos del reanálisis ERA5 utilizados en este estudio están disponibles públicamente a través del Copernicus Climate Data Store. Los campos mensuales de precipitación de WorldClim v2.1 también están disponibles mediante el repositorio oficial de WorldClim. Los registros observacionales originales de velocidad y dirección del viento fueron facilitados por el Instituto Dominicano de Meteorología (INDOMET) después de una solicitud académica formal y no se redistribuyen como parte de este artículo.

El custodio institucional de los registros es el Instituto Dominicano de Meteorología, a través de la unidad responsable de datos climatológicos. Las solicitudes de acceso pueden dirigirse mediante atencion.usuario@indomet.gov.do. El uso de los registros en este estudio fue autorizado mediante la comunicación institucional correspondiente, conservada por los autores.

El código de procesamiento, los cuadernos reproducibles, los archivos de configuración, las métricas agregadas, los productos derivados no sensibles y las figuras están disponibles en el repositorio: https://github.com/r-geronimo/era5-wind-direction-dominican-republic

Los archivos originales de INDOMET y las series observacionales derivadas a nivel diario o mensual no se incluyen en el repositorio público.

DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés relacionados con la realización o publicación de este estudio.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4162

REFERENCIAS

[1] Ochoa-Moya, C. A., Cala-Pérez, Y. A., Díaz-Esteban, Y., Castro, C. L., Ordoñez-Pérez, P., & Quintanar, A. I. (2020). Climatological large-scale circulation patterns over the Middle Americas Region. Atmosphere, 11(7), 745. https://doi.org/10.3390/atmos11070745

[2] Molina Bosch, T., & Méndez Bravo, F. J. (2025). Casos de estudio de climatología sinóptica ecuatorial: Estudio de algunos casos relevantes del Ecuador continental. Avances en Ciencias e Ingenierías, 17(1), e2829. https://doi.org/10.18272/aci.v17i1.2829

[3] Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146(730), 1999–2049. https://doi.org/10.1002/qj.3803

[4] Lecha Estela, L. B., & Soler Torres, E. (2023). La climatología sinóptica en Cuba. Parte 1: Evolución de los estudios sobre los tipos de situaciones que afectan a Cuba. Revista Cubana de Meteorología, 29(4), e03. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=701977566002

[5] Lecha Estela, L. B., Soler Torres, E., Sánchez Suárez, L. M., & Verdecia Naranjo, Y. (2024). La climatología sinóptica en Cuba. Parte 2: El catálogo de los tipos de situaciones 1970–2022. Revista Cubana de Meteorología, 30(1), e10.

[6] Martínez, C., Goddard, L., Kushnir, Y., & Ting, M. (2019). Seasonal climatology and dynamical mechanisms of rainfall in the Caribbean. Climate Dynamics, 53, 825–846. https://doi.org/10.1007/s00382-019-04616-4

[7] Kelso, N. V., & Patterson, T. (2010). Introducing Natural Earth Data – NaturalEarthData.com. Geographia Technica, Special Issue, 82–89. https://technicalgeography.org/pdf/sp_i_2010/12_introducing_natural_earth_data___naturalearth.pdf

[8] Lecha Estela, L. B., Soler Torres, E., Sánchez Suárez, L. M., Verdecia Naranjo, Y., & Roura Pérez, P. (2024). La climatología sinóptica en Cuba. Parte 3: Características climáticas de los grupos, tipos y subtipos de situaciones (1970–2022). Revista Cubana de Meteorología, 30(2), e07.

[9] Lecha, L. B., Paz, L. R., & Lapinel, B. (1994). El clima de Cuba. Editorial Academia.

[10] Giannini, A., Cane, M. A., & Kushnir, Y. (2001). Interdecadal changes in the ENSO teleconnection to the Caribbean region and the North Atlantic Oscillation. Journal of Climate, 14(13), 2867–2879. https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<2867:ICITET>2.0.CO;2

[11] Jury, M. R. (2023). Springtime Southwest Cloud Bands in the Central Caribbean. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 62(2), 251–262. https://doi.org/10.1175/JAMC-D-22-0126.1

[12] Ashkenazy, Y., & Yizhaq, H. (2023). The diurnal cycle and temporal trends of surface winds. Earth and Planetary Science Letters, 601, 117907. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117907

[13] Stull, R. B. (2017). Practical Meteorology: An Algebra-Based Survey of Atmospheric Science. University of British Columbia. https://www.eoas.ubc.ca/books/Practical_Meteorology/

[14] Hamilton, K. (2024). As Regular as Clockwork: Alexander von Humboldt, Robert de Lamanon and the Beginning of the Scientific Investigation of the Tidal Barometric Oscillation. Atmosphere, 15(9), 1052. https://doi.org/10.3390/atmos15091052

[15] Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology, 37(12), 4302–4315. https://doi.org/10.1002/joc.5086

[16] Bolgiani, P., Calvo-Sancho, C., Díaz-Fernández, J., Quitián-Hernández, L., Sastre, M., Santos-Muñoz, D., Farrán, J. I., González-Alemán, J. J., Valero, F., & Martín, M. L. (2022). Wind kinetic energy climatology and effective resolution for the ERA5 reanalysis. Climate Dynamics, 59, 737–752. https://doi.org/10.1007/s00382-022-06154-y

[17] Fujiwara, M., Wright, J. S., Manney, G. L., Gray, L. J., Anstey, J., Birner, T., Davis, S., Gerber, E. P., Harvey, V. L., Hegglin, M. I., Homeyer, C. R., Knox, J. A., Krüger, K., Lambert, A., Long, C. S., Martineau, P., Molod, A., Monge-Sanz, B. M., Santee, M. L., ... Zou, C.-Z. (2017). Introduction to the SPARC Reanalysis Intercomparison Project (S-RIP) and overview of the reanalysis systems. Atmospheric Chemistry and Physics, 17(2), 1417–1452. https://doi.org/10.5194/acp-17-1417-2017

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4162