OBSERVATORIO ENSO · CARIBE ORIENTAL
Academia de GeoHistoria del Estado Sucre (AGHES) · Cumaná, Venezuela

Debilitamiento sostenido de los alisios y la surgencia costera, y su atribución al forzante atlántico (AMM/AMV)

Nororiente de Venezuela (estación de referencia: Cumaná) · señal 2015–2026, atribución sobre récord largo 1982–2024

Autor: Físico Licdo. **Rommel J. Contreras G.** — Academia de GeoHistoria del Estado Sucre (AGHES), Cumaná, Venezuela. *Coautor de Aparicio y Contreras (2003)*. Contacto: rommeljose@gmail.com
Marco: Observatorio ENSO · Caribe Oriental.
Fuentes de datos: reanálisis **ERA5** (ECMWF) vía Open-Meteo Archive, viento a 10 m horario, 2015–2026 (8 estaciones costeras), y media anual ERA5 1982–2024 para el récord largo; **OISST v2.1** (NOAA/PSL) para la SST costera 1982–2026; índices **AMM** (NOAA/PSL), **AMV/AMO** (Trenberth–Shea, ERSST; cross-check HadISST1/UCAR), **ONI/RONI** (NOAA/CPC) y posición de la **ZCIT** (centroide de precipitación ERA5).
Métodos: transporte de **Ekman costa-afuera** (Aparicio y Contreras, 2003, DOI 10.6084/m9.figshare.5660704); tendencias por **Mann-Kendall** + **pendiente de Sen** (verificadas con el MK modificado de Hamed-Rao); correlaciones de **Pearson** sobre anomalías desestacionalizadas con número efectivo de grados de libertad (Bretherton *et al.*, 1999); atribución causal por **análisis desfasado** (lag/lead).
Versión 2 · junio de 2026 — revisión para consultoría experta. Esta versión amplía la v1 (junio de 2026, archivada en `informe_viento_surgencia_v1.md`): la v1 documentó la señal (giro y debilitamiento del viento, caída de la surgencia 2015–2026) y *conjeturó* un forzante atlántico termodinámico. La v2 **prueba esa hipótesis**: incorpora la SST costera (OISST), descarta por eliminación a la ZCIT, las ondas tropicales y el ENSO como causas de la tendencia, e **identifica el Modo Meridional del Atlántico (AMM), sobre el fondo multidecadal del AMV, como la causa próxima** (r anual = −0.80 sobre 1982–2024). Se añaden la predicción falsable y una sección explícita de lo que se afirma, lo que sigue en gris y hacia dónde va el trabajo. *Documento sometido a revisión del Dr. Frank Muller-Karger (USF) y abierto a comentarios.*

Introducción

Los **vientos alisios del este** son el motor de la **surgencia costera** del nororiente de Venezuela: al empujar el agua superficial mar afuera (transporte de Ekman) provocan el ascenso de aguas frías y ricas en nutrientes que sostienen la productividad del mar y, en particular, la **pesca de la sardina** (*Sardinella aurita*) en el Golfo de Cariaco, Araya y Margarita (Aparicio y Contreras, 2003). Por ello, la intensidad y la dirección del régimen de vientos son variables críticas para la pesquería y el clima costero de la región.

Sobre este sistema actúan, además, la variabilidad interanual del ciclo **El Niño–Oscilación del Sur (ENSO)** y la variabilidad propia del Atlántico tropical. En la última década se han reportado cambios en los patrones de viento de la cuenca del Caribe, pero su expresión local en la costa oriental venezolana —y, sobre todo, **cuál es la fuerza física que la produce**— no había sido cuantificada con datos homogéneos.

Este trabajo procede en dos movimientos. Primero **caracteriza la señal**: las tendencias del viento costero (dirección, intensidad, componentes zonal y meridional), del índice de surgencia y de la SST entre 2015 y 2026. Segundo, y como aporte central de esta versión, **atribuye la causa** de ese debilitamiento por eliminación de candidatos (Sol, ZCIT, ondas tropicales, ENSO, AMM/AMV), apoyándose en el récord largo 1982–2024 y en la prueba del *momento* (análisis desfasado). El grupo canónico de la cuenca de Cariaco (Müller-Karger, USF) ya había concluido, con datos y métodos independientes, que la **posición de la ZCIT no es el motor** de la surgencia (Colna, 2017); nuestra contribución diferencial es identificar el **AMM como la causa próxima** del viento y la surgencia, eslabón que esa literatura no probó.

Resumen ejecutivo

1. **Existe una variación sostenida de la dirección del viento.** En Cumaná la dirección dominante gira en sentido horario **+1.48°/año** en los últimos 7 años (2019–2025; Mann-Kendall p=0.016, **significativa**), ≈ **+8.9°** acumulados, de E-NE hacia el E. El giro es coherente en la costa central de Sucre y Anzoátegui.
2. **Los alisios se debilitan** de forma robusta: rapidez **−0.077 m/s/año** (p=0.016) en Cumaná y −0.056 m/s/año (p=0.003) en el promedio regional. En medias anuales, Cumaná pasa de **3.65 m/s (2016) a 3.21 m/s (2024): −12 %**.
3. **La surgencia disminuye:** índice de Ekman **−29.4 m²/s/año** (p=0.035); en bloques, el ISCIV de Cumaná cae de **75 a 54 m³·s⁻¹/100 m (−28 %)**, y el índice físico de **−69.7 a −52.9 (−24 %)** entre 2016 y 2024. Los años 2023–2024 son los de viento y surgencia mínimos del registro.
4. **La surgencia la gobierna la intensidad, no la dirección:** correlaciona con la rapidez r=+0.98 (r^2=0.96) y con la anomalía de dirección apenas r=−0.15 (r^2=0.02). El factor crítico para la productividad costera es la **pérdida de intensidad de los alisios**, no su giro.
5. **El mar se calienta:** la SST costera (OISST v2.1, 1982–2026) sube **+0.017 °C/año**, acumulando **+2.4 °C en 43 años** (24.9 °C en 1982 → 27.3 °C en 2024), con máximos de récord en 2023–24, consistentes con un transporte de Ekman debilitado.
6. **La causa próxima del debilitamiento es el Modo Meridional del Atlántico (AMM), sobre el fondo del AMV.** Sobre el récord largo 1982–2024, **AMM vs rapidez anual de Cumaná r=−0.80** ($p<10^{-8}$) y **AMV vs rapidez r=−0.81**. La ZCIT (co-síntoma, prueba de desfase 0), las ondas tropicales (marcador estacional) y el ENSO (modulador interanual, ≤10 % de la varianza de la SST con 15 ciclos) **quedan descartados como causas de la tendencia**. Se formula una **predicción falsable**: cuando el AMV gire hacia fase neutra/fría (≈2030–2040), el viento de Cumaná debería recuperarse hacia 3.8–4.0 m/s.

Materiales y Métodos

Datos

- **Viento ERA5 (ECMWF) vía Open-Meteo Archive.** Ante la **escasez crónica y la discontinuidad** de registros anemométricos *in situ* continuos en el margen costero del nororiente de Venezuela, se emplea el reanálisis global **ERA5** (estándar validado; Hersbach *et al.*, 2020), que asimila datos satelitales y observacionales en un modelo dinámico global. Para la **señal** se usan **ocho estaciones virtuales** (nodos de grilla ~31

km) en la interfaz costa–mar (de oeste a este: Barcelona, Araya, Cumaná, golfo de Cariaco, Porlamar, Pampatar, Carúpano y Güiria), con datos **horarios** 2015–2026 (n = 100 056 h por estación). Para la **atribución** se usa la **media anual ERA5 1982–2024** en Cumaná (n = 43 años).

- **SST costera: OISST v2.1** (NOAA/PSL; Reynolds *et al.*, 2007), media mensual 1982–2026 sobre el píxel costero de Cumaná, vía THREDDS/OPeNDAP.
- **Índices climáticos: AMM** (Modo Meridional del Atlántico; Chiang & Vimont, 2004; NOAA/PSL), **AMV/AMO** (índice Trenberth–Shea sobre ERSST; cross-check con HadISST1, UCAR/NCAR), **ONI/RONI** (NOAA/CPC) y posición latitudinal de la **ZCIT** del Atlántico (centroide de precipitación ERA5, 0–20°N, banda 60–45°W).

Índice de surgencia (ISCIV)

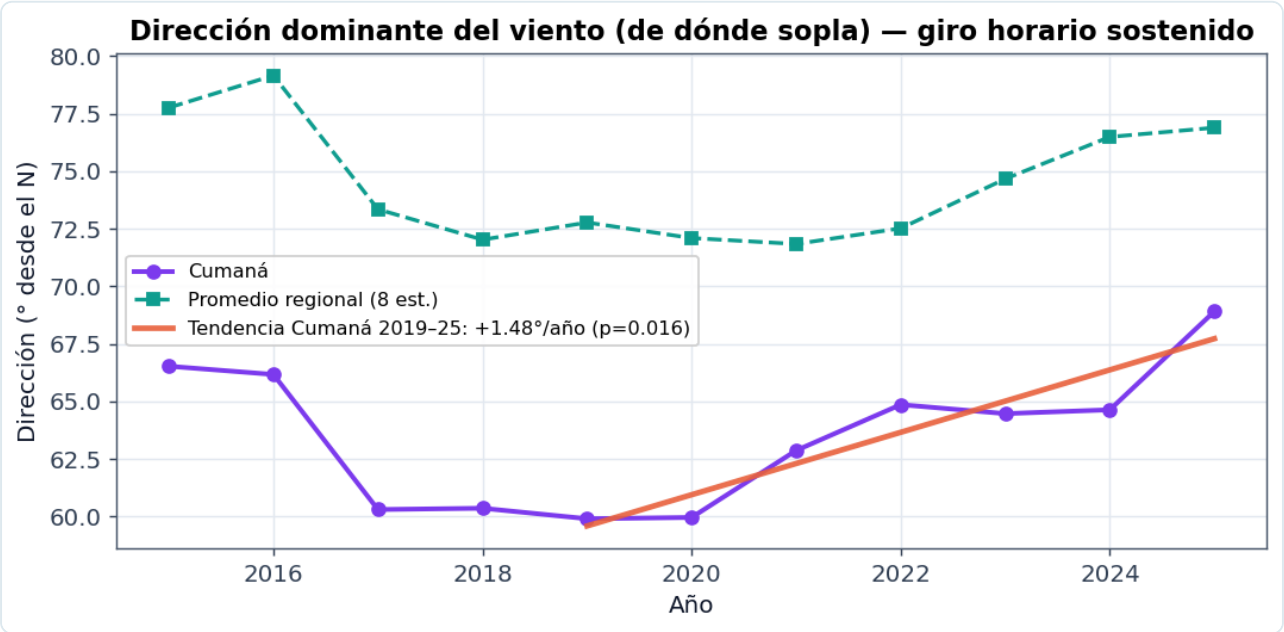
El **índice de surgencia** se calcula como el **transporte de Ekman costa-afuera** siguiendo a **Aparicio y Contreras (2003)**: esfuerzo del viento $\tau = \rho_a \cdot C_D \cdot |V| \cdot \mathbf{V}$, con $\boldsymbol{\rho_a = 1{,}22\ kg \cdot m^{-3}}$ (densidad del aire en el **Sistema Internacional**) y **C_D** según **Large y Pond (1981)** ($1{,}2\times10^{-3}$ para $|V| < 11$ m·s⁻¹; $(0{,}49 + 0{,}065\cdot|V|)\times10^{-3}$ por encima); parámetro de Coriolis $f = 2\Omega\cdot\mathrm{sen}(\varphi)$ y proyección sobre la normal costa-afuera de cada estación. Todo en SI (τ en Pa). Se reporta como **ISCIV físico** (m³·s⁻¹ por 100 m de costa = transporte de Ekman / 10,25).

Análisis estadístico

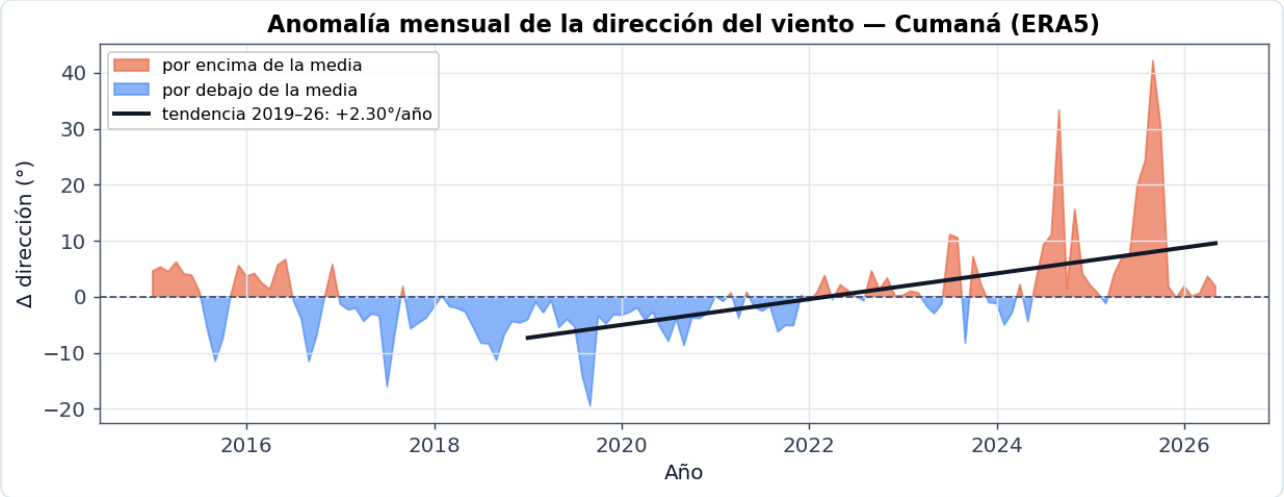
Las medias **mensuales y anuales** del viento se calculan de forma **vectorial**; la **dirección dominante** como **media circular**. Las **tendencias** se evalúan con **Mann-Kendall** y **pendiente de Sen** (1968), y se verifican con el **Mann-Kendall modificado de Hamed-Rao (1998)** para descartar inflación por autocorrelación (§17). Las **correlaciones** usan **Pearson** sobre **anomalías mensuales desestacionalizadas**, reportando el número **efectivo** de grados de libertad ante la autocorrelación serial (Bretherton *et al.*, 1999). La **atribución causal** se apoya en la prueba del *momento*: el **análisis desfasado** (lag/lead) distingue un forzante (pico adelantado) de un origen común (pico en desfase 0). Todo el análisis es **reproducible** (`tools/wind_report.py`, `oisst_costa.py`, `atlantico_forzantes.py`, `era5_largo_plazo.py`, `enso_modulacion.py`, `itcz_atlantico.py`, `ondas_tropicales.py`).

Parte A — La señal observada (2015–2026)

1. Dirección del viento: giro horario sostenido



Dirección dominante del viento



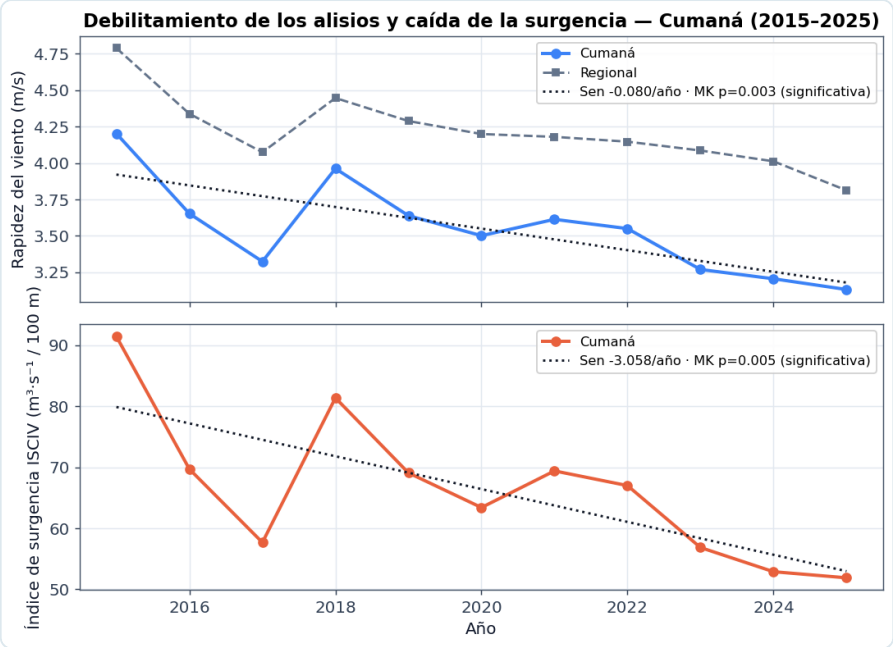
Anomalía mensual de dirección — Cumaná

Tendencias de la dirección dominante (° desde el N):

Serie	Periodo	Sen (°/año)	MK Z	p	Significancia
Cumaná	2019–25	+1.482	+2.40	0.016	**significativa**
Cumaná	2015–25	+0.304	+0.62	0.533	no signif.
Araya	2019–25	+0.605	+3.00	0.003	**significativa**
Barcelona	2019–25	+0.530	+0.60	0.548	no signif.
Golfo Cariaco	2019–25	+0.335	+1.20	0.230	no signif.
Promedio regional	2019–25	+0.857	+1.80	0.072	marginal
Promedio regional	2015–25	−0.062	+0.00	1.000	no signif.

La dirección anual de Cumaná pasa de ≈60° (2019) a ≈69° (2025). La anomalía mensual muestra el predominio de valores **positivos** desde 2022, señal del giro horario.

2. Intensidad del viento y surgencia: debilitamiento



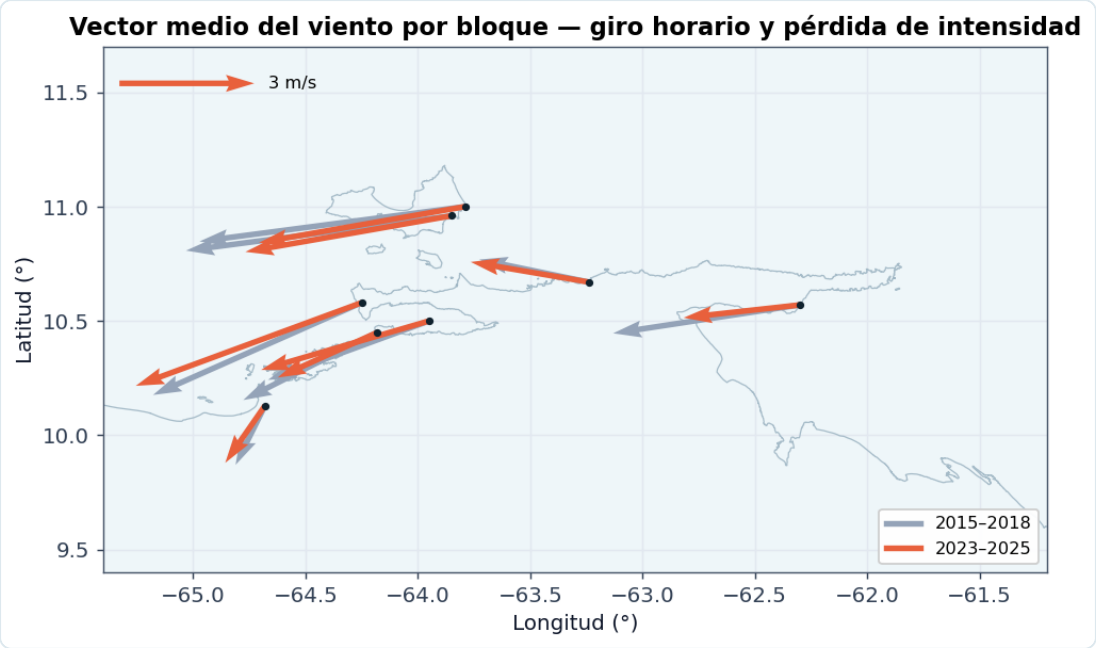
Intensidad y surgencia

Tendencias (Cumaná y promedio regional):

Variable	Periodo	Sen/año	MK Z	p	Significancia
Cumaná · rapidez (m/s)	2019–25	−0.077	−2.40	0.016	**significativa**
Cumaná · rapidez (m/s)	2015–25	−0.080	−2.96	0.003	**significativa**
Cumaná · surgencia Ekman (m²/s)	2019–25	−29.367	−2.10	0.035	**significativa**
Cumaná · surgencia Ekman (m²/s)	2015–25	−31.340	−2.80	0.005	**significativa**
Regional · rapidez (m/s)	2019–25	−0.056	−3.00	0.003	**significativa**
Regional · rapidez (m/s)	2015–25	−0.061	−3.11	0.002	**significativa**

Comparación por bloques (vector medio, Cumaná):

Bloque	u (m/s)	v (m/s)	|V| (m/s)	Dirección	ISCIV (m³·s⁻¹/100 m)
2015–2018	−2.98	−1.48	3.33	64°	75
2023–2025	−2.22	−0.99	2.43	66°	54



Vectores por bloque

El vector medio por bloque resume ambas señales: las flechas recientes son **más cortas** (menor rapidez) y están **rotadas en sentido horario** (más zonales), de manera coherente a lo largo de la costa central.

3. El mecanismo físico de control: componentes vectoriales vs. rapidez

Para entender por qué el índice de surgencia cae un **~28 %** aun cuando el viento del este no exhibe una tendencia significativa, se descompone el viento en su componente **zonal *u*** y **meridional *v***. Según Ekman, para el margen suroriental del Caribe (costa ≈ zonal, mar afuera ≈ norte) la surgencia costa-afuera *E_y* es **proporcional al esfuerzo de la componente zonal** τ_x:

$$E_y = \frac{\tau_x}{f}$$

donde *f* es el parámetro de Coriolis (el signo lo fija la normal a la costa; Aparicio y Contreras, 2003). Aplicando Mann-Kendall y Sen a las componentes en Cumaná (2019–2025):

Componente (Cumaná, 2019–25)	Pendiente de Sen	*p* (MK)	Significancia
u zonal (E–O)	+0.071	0.133	no signif.
v meridional (N–S)	+0.116	0.003	**significativa**

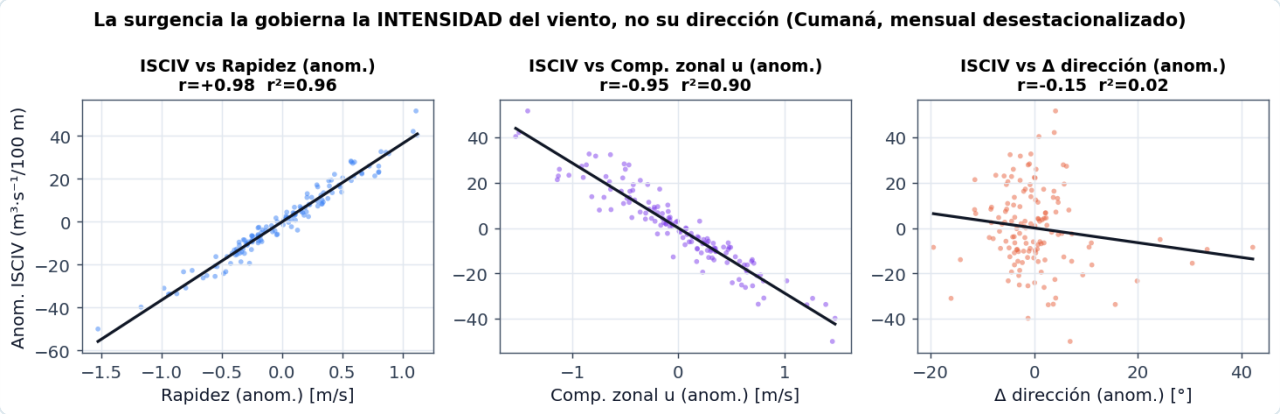
1. **El motor zonal no ha cambiado de forma significativa** (*u*: p = 0,133): el viento del este sigue dentro de sus rangos. *(Sobre el récord completo y por bloques, |u| también desciende algo.)*
2. **El viento del norte se está apagando** (*v*: p = 0,003). Como el viento del norte tiene signo negativo, ese incremento numérico hacia cero demuestra un **debilitamiento sistemático del viento del norte**.
3. **El origen del giro horario.** Al debilitarse selectivamente el norte mientras el este se mantiene, el vector resultante se «acuesta»: de ahí el giro de **+1.48°/año**.

El esfuerzo zonal se calcula con la **rapidez total** |**V**|:

$$\tau_x = \rho_a C_D |\vec{V}| u$$

Al colapsar v, la rapidez $|\mathbf{V}| = \sqrt{(u^2 + v^2)}$ disminuye (−0.077 m/s·año en Cumaná). Es ese descenso de la velocidad absoluta —y **no** el cambio de ángulo por sí solo— el que sofoca el transporte de Ekman. En síntesis: **el ejecutor de la surgencia es el esfuerzo zonal τ_x, pero su magnitud la fija $|\mathbf{V}|$, que se desploma arrastrada por la pérdida de la componente meridional.**

4. Correlación con la surgencia



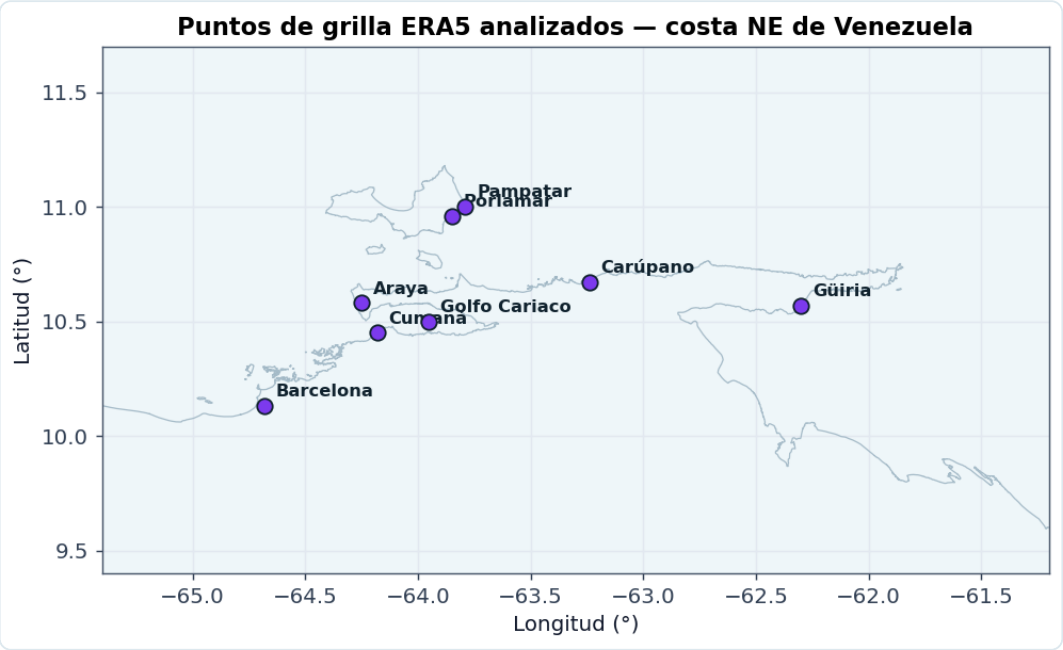
Correlaciones

Pearson sobre anomalías mensuales desestacionalizadas (Cumaná, n=137):

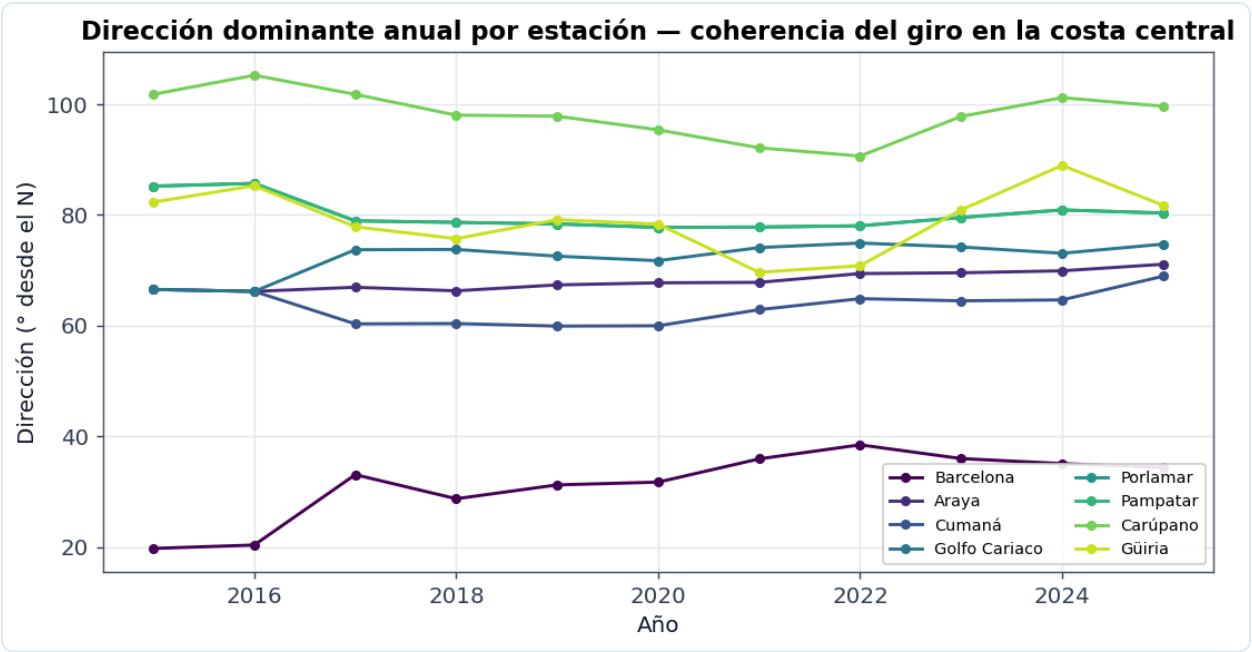
Variable	r	r²	p
Rapidez del viento	+0.981	0.962	<0.001
Componente zonal u (E–O)	−0.947	0.897	<0.001
Componente meridional v (N–S)	−0.796	0.634	<0.001
Anomalía de dirección (Δdir)	−0.146	0.021	0.086

La surgencia está determinada casi por completo por la **rapidez** ($r^2 \approx 0{,}96$) y la **componente zonal** ($r^2 \approx 0{,}90$); la dirección por sí sola explica ~2 %.

5. Coherencia regional



Mapa de las estaciones



Dirección por estación

Dirección dominante anual por estación (° desde el N):

Estación	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Barcelona	20	20	33	29	31	32	36	38	36	35	34
Araya	67	66	67	66	67	68	68	69	70	70	71
Cumaná	67	66	60	60	60	60	63	65	64	65	69
Golfo Cariaco	67	66	74	74	73	72	74	75	74	73	75
Porlamar	85	86	79	79	78	78	78	78	80	81	80
Pampatar	85	86	79	79	78	78	78	78	80	81	80
Carúpano	102	105	102	98	98	95	92	91	98	101	100
Güiria	82	85	78	76	79	78	70	71	81	89	82

El giro y el debilitamiento son **coherentes en la costa central de Sucre y Anzoátegui** (Cumaná, Araya, golfo de Cariaco, Barcelona); las estaciones insulares y del golfo de Paria responden con texturas locales (azimut de costa distinto), pero las tendencias de **rapidez** —independientes del azimut— son las más robustas (§18).

6. La temperatura superficial del mar (SST costera)

La SST del píxel costero de Cumaná (**OISST v2.1**, 1982–2026) muestra un **calentamiento sostenido de +0.017 °C/año**, acumulando **+2.4 °C en 43 años** (24.9 °C en 1982 → 27.3 °C en 2024), con los máximos del registro en **2023–24**. Este calentamiento es **consistente con un transporte de Ekman debilitado** (menos agua fría que aflora), aunque por sí solo no distingue causa de efecto: tanto un viento más débil como un Atlántico más cálido de fondo lo producirían. La atribución que sigue (Parte B) resuelve esa ambigüedad por el *momento* y por el récord largo.

Parte B — La atribución causal (por eliminación)

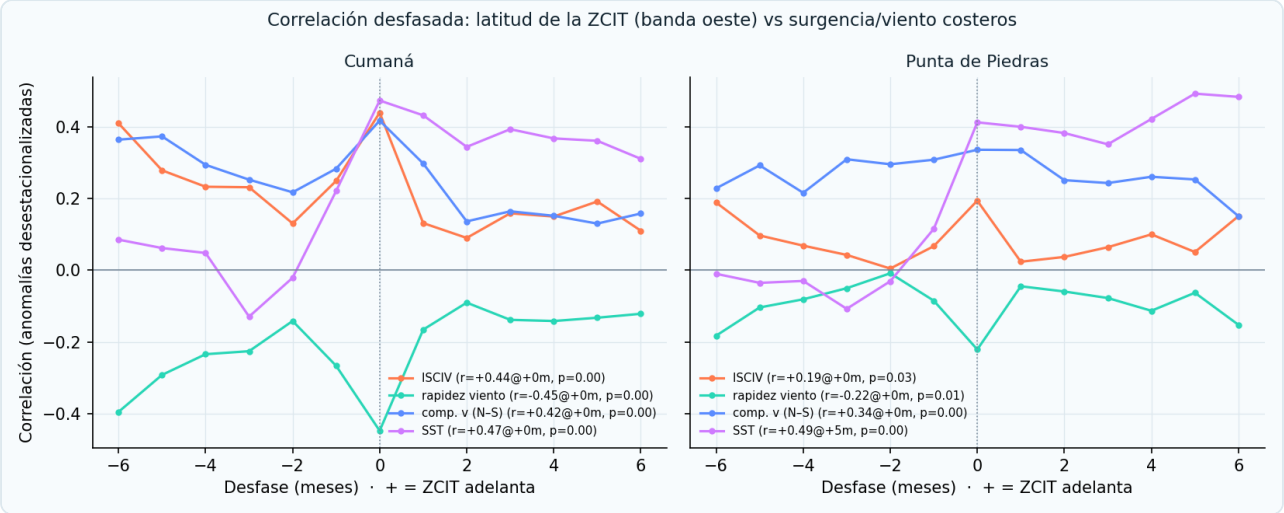
7. Estrategia: signo, magnitud y momento

A la causa de una tendencia se llega por **eliminación**. A cada candidato se le exige coincidir con los datos en tres aspectos: el **signo** (¿varía en el sentido correcto?), la **magnitud** (¿es suficiente?) y, sobre todo, el **momento** (¿se adelanta —lo que indica causa— o va a la par —lo que indica origen común—?). Esta última prueba, el **análisis desfasado**, es la que separa correlación de causalidad y vertebra esta sección.

8. El Sol y la ZCIT *(descartados / co-síntoma)*

El Sol. A escala decadal la irradiancia es esencialmente constante; no puede originar la tendencia. El debilitamiento no se «genera», es una **redistribución interna** del sistema océano–atmósfera.

La ZCIT. La franja de lluvias migra al norte a **+0.048°N/año** (2016–2026) cuando el viento afloja, y es tentador señalarla como causa. Pero el análisis desfasado mensual (anomalías desestacionalizadas) muestra que **todas** las series de Cumaná —ISCIV (+0.44), rapidez (−0.45), componente *v* (+0.42), SST (+0.47)— pican en **desfase 0** con la ZCIT. Si la ZCIT *forzara* la costa, el pico estaría retrasado; no lo está. La simultaneidad es la firma de un **forzante común** (el gradiente de SST de cuenca), no de causalidad directa. Las correlaciones anuales (ZCIT vs ISCIV r=−0.68; vs rapidez r=−0.65; n=10) son fuertes **por causa común**.



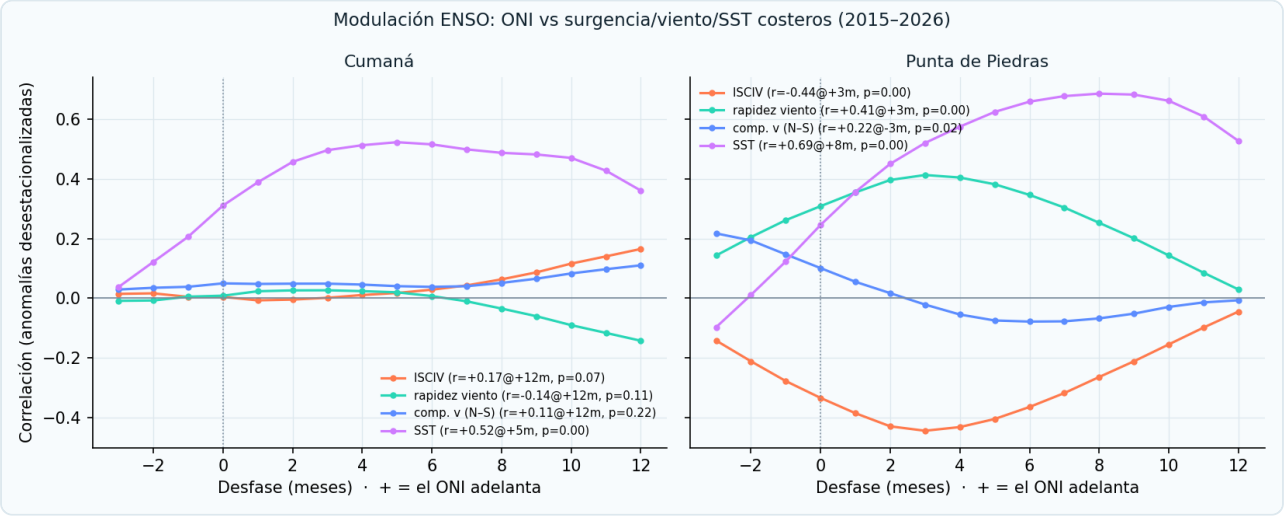
Prueba de desfase ZCIT ↔ costa

Respaldo independiente (Colna, 2017; grupo de Cariaco). Definiendo la ZCIT por el centroide de precipitación y con divergencia del viento satelital (1987–2011), Colna concluyó —con datos y método distintos— que la **posición de la ZCIT no es el motor** de la surgencia del sur del Caribe, y que el **AMO** modula la SST de Cariaco (r≈0.4, coherente con nuestro AMV↔SST r≈+0.5–0.6). **Colna se detuvo en AMO/ENSO y no probó el AMM**: ahí está nuestro aporte diferencial (§11).

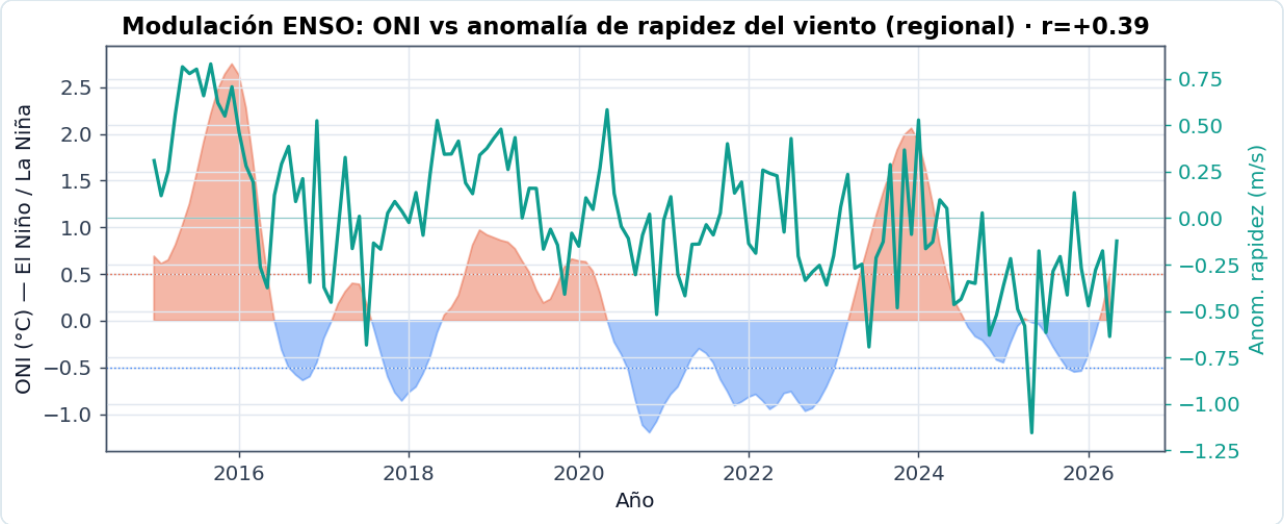
9. Las ondas tropicales del este *(marcador estacional, no causa)*

La actividad de ondas del este (proxy: varianza de la precipitación ERA5 filtrada 2–6 días, corredor 10–13°N) reproduce la fenomenología —mínimo en enero–abril, máximo en junio–noviembre— y muestra una **leve tendencia a la baja** (−0.078/año). Sus correlaciones con la surgencia (r=−0.37) y la rapidez (r=−0.35) son **co-variación estacional**: la temporada de ondas coincide con los alisios relajados del verano boreal. Las ondas son disturbios **embebidos** en los alisios, no su causa; su propia tendencia a la baja es probablemente co-sintomática del mismo estado de cuenca.

10. El ENSO *(modulador interanual, no causa de la tendencia)*



Desfases ENSO ↔ costa



ONI vs rapidez regional

El ENSO actúa por **dos vías**, probadas con desfases −3…+12 meses (anomalías desestacionalizadas):

- **Vía atmosférica (+3 meses):** el pico del Niño refuerza el chorro de bajo nivel del Caribe; en la **plataforma abierta** (Punta de Piedras/Margarita) produce más viento (r=+0.41) y más surgencia (r=−0.44) la primavera siguiente (p<0.001). En **Cumaná** (abrigada en los golfos) la señal **no entra**: la curva de desfases es plana.
- **Vía oceánica (+5…+8 meses):** calentamiento diferido del Atlántico tropical norte. **Corregida con OISST** (45 años, ~15 ciclos), es bifásica y modesta: costa algo fría ~3 meses *antes* del pico del ONI (r≈−0.27/−0.31) y cálida ~9 meses *después* (r≈+0.21). El r=+0.69 que sugería una ventana corta de 43 meses estaba **inflado por un solo evento** (Niño 2023-24 + Atlántico récord 2024). Con 15 ciclos, **el ENSO explica ≤10 % de la varianza** de la SST costera.

Por qué el ENSO no es la causa de la tendencia: en la única estación donde mueve el viento (Punta de Piedras), el Niño lo *fortalece* (+0.41) — **signo contrario** a la tendencia observada. Y la **Niña triple 2020–2022**, que por esa vía debió reforzar la surgencia, coincidió con el peor viento previo a 2023. El ENSO modula de un año a otro; no ordena la década.

11. El forzante atlántico (AMM/AMV): la causa próxima

Qué son. - **AMM** (Modo Meridional del Atlántico; Chiang & Vimont, 2004): modo acoplado del **gradiente trans-ecuatorial de SST** del Atlántico tropical. **AMM⁺** = Atlántico tropical norte anómalamente cálido → gradiente de presión relajado → **alisios más débiles** → menos surgencia (mecanismo Lindzen-Nigam). - **AMV/AMO** (Trenberth–Shea, ERSST): oscilación multidecadal (~60–80 años) de la SST del Atlántico Norte. En **fase cálida** (la actual) eleva el nivel de fondo del AMM y debilita los alisios estructuralmente.

Sobre la ventana corta (2015–, mensual, n_eff≈51–57): AMM vs rapidez Cumaná **r=−0.45 @ lag 0** (p=0.001); AMM vs ISCIV **r=+0.43** (p=0.001); AMV vs rapidez r=−0.38; AMV vs ISCIV r=+0.39.

Sobre el récord largo OISST (1982–, lag 0, n_eff≈120–135): AMM vs SST costera r=+0.51–0.54; AMV vs SST costera r=+0.53–0.58 ($p<10^{-4}$). El canal **cuenca → SST costera es robusto a 45 años**, no un artefacto de la década.

La prueba definitiva — récord ERA5 largo (1982–2024, n=43 años):

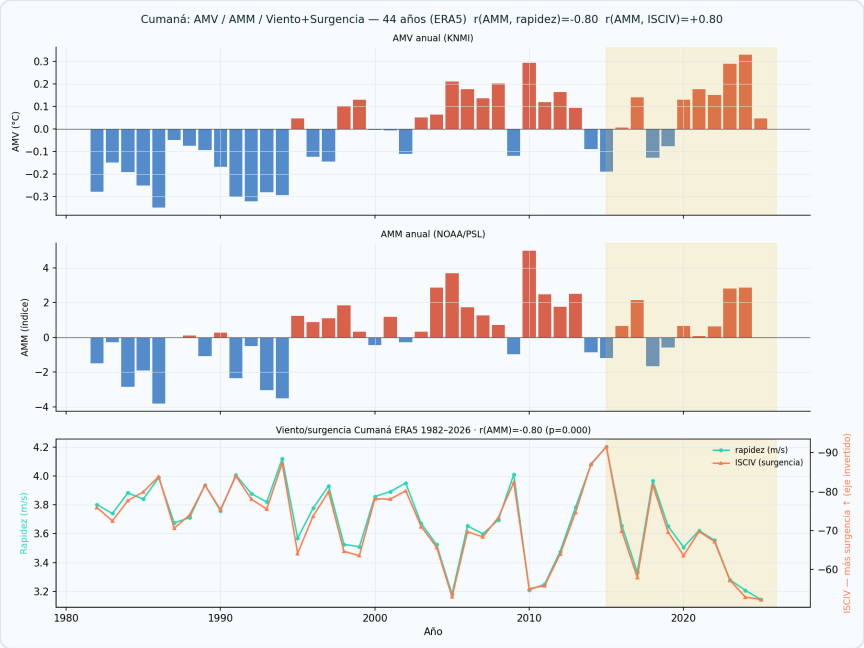


Figura 9. AMV y AMM anuales (paneles superiores) y rapidez del viento e índice de surgencia ISCIV de Cumaná (panel inferior), 1982–2026. El ISCIV es negativo por convención (transporte de Ekman costa-afuera): más negativo = más surgencia; su eje se muestra invertido para que "más surgencia" quede arriba, alineada con "más viento". Así se ve que rapidez y surgencia se mueven juntas y ambas caen en los años recientes (sombreado), cuando el AMM/AMV alcanzan sus máximos cálidos.

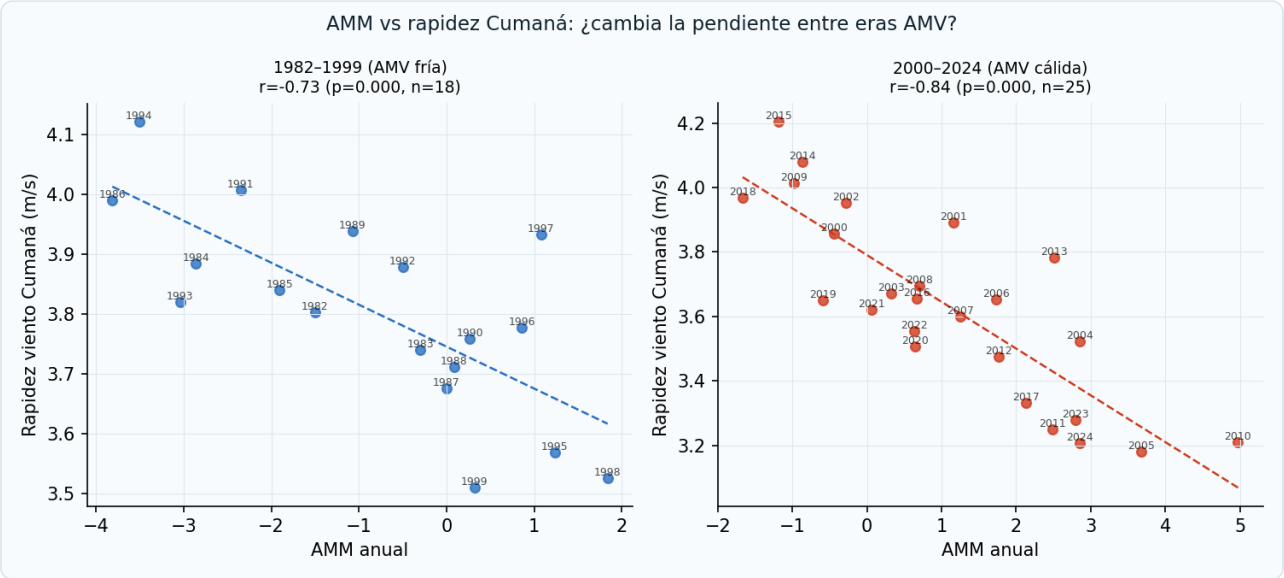
- **AMM vs rapidez anual Cumaná: r = −0.80** ($p<10^{-8}$, n_eff≈32)
- **AMM vs ISCIV anual Cumaná: r = +0.80** ($p<10^{-8}$)
- **AMV vs rapidez anual Cumaná: r = −0.81** ($p<10^{-8}$)

La tabla año a año lo confirma sin ambigüedad:

Año	AMM	AMV (°C)	Rapidez (m/s)
1982	−1.50	−0.28	3.80
1992	−0.50	−0.32	3.88
2002	−0.28	−0.11	3.95
2015	−1.19	−0.19	**4.20**
2018	−1.67	−0.13	3.97
2023	**+2.79**	+0.29	3.28
2024	**+2.85**	+0.33	**3.21**

Los años de viento fuerte (2015, 2018) son años de AMM marcadamente negativo; los de viento mínimo de récord (2023–24) son los de AMM récord positivo. **La causa próxima del debilitamiento es el AMM**, cuyo fondo es la AMV en su fase cálida actual.

12. ¿Ciclo natural o tendencia secular? (la pregunta de fondo)



Relación AMM↔viento por era AMV

Separando el récord por era AMV se responde si la "tendencia" es ciclo o algo más:

- Era AMV **fría** (1982–1999): r(AMM, rapidez) = **−0.73** — la relación **ya existía**; el mecanismo no lo crea la fase cálida.
- Era AMV **cálida** (2000–2024): r(AMM, rapidez) = **−0.84** — la pendiente es **más pronunciada**.

Interpretación. La "tendencia" de la última década es la **superposición de tres componentes**: (1) el **flanco ascendente del ciclo multidecadal AMV** (los alisios ya fueron igualmente débiles en la fase cálida anterior, ~1930–1965); (2) la **variabilidad interanual del AMM** (2018 fue un año excepcional de viento fuerte con AMM=−1.67; 2023–24 son récords de debilidad con AMM≈+2.8); y (3) una **posible amplificación secular** de fondo —la pendiente AMM→viento es hoy mayor que en los 80— **coherente con el calentamiento antropogénico** del Atlántico Norte, pero **no cuantificable** con este dataset de 43 años.

Parte C — Síntesis, predicción y límites

13. La cadena causal completa

```
Sol (constante a escala decadal)
  → Atlántico tropical norte récord cálido  (AMM⁺ sobre fondo AMV⁺ récord)
    → gradiente meridional de SST/presión relajado  (mecanismo Lindzen-Nigam)
      → alisios del NE más débiles            (r anual = −0.80)
        → menos transporte de Ekman → menos surgencia costera  (r anual = +0.80)
          → SST costera más cálida (+2.4 °C/43 a) → presión sobre la pesquería de sardina
  [ ZCIT al norte = co-síntoma (lag 0) · ondas = marcador estacional · ENSO = modulador secundario ]
```

14. La predicción falsable

Este análisis deja explícita una predicción comprobable: cuando la AMV gire hacia su fase **neutra o fría** (estimado **≈2030–2040**, con incertidumbre alta), el viento de Cumaná debería **recuperarse**

hacia ~3.8–4.0 m/s. Si la recuperación se **detiene en ~3.5 m/s**, esa diferencia cuantificaría la componente **secular/antropogénica** montada sobre el ciclo. La señal operativa de vigilancia es el **índice AMM mensual (NOAA/PSL)** —más que el ONI o la ZCIT— para anticipar temporadas de surgencia débiles o fuertes.

15. Lo que afirmamos, lo que sigue gris y hacia dónde vamos

Lo que podemos afirmar (alta confianza): - El debilitamiento de los alisios (−12 %) y de la surgencia (−24 a −28 %) en Cumaná, 2015–2026, es **real y estadísticamente significativo** (MK + Sen, robusto a autocorrelación). - La surgencia la gobierna la **rapidez/componente zonal**, no la dirección (r^2=0.96 vs 0.02). - La **causa próxima es el AMM** (r anual −0.80 sobre 43 años), sobre el **fondo multidecadal del AMV**; el mecanismo existe en ambas fases AMV (no es artefacto de la era cálida). - La **ZCIT, las ondas y el ENSO no son la causa** de la tendencia (descartados por *momento*, signo o magnitud).

Lo que sigue en gris (incertidumbre genuina): - **Cuánto del debilitamiento es ciclo reversible y cuánto es secular/antropogénico.** Hay indicios de amplificación (pendiente AMM→viento mayor hoy), pero 43 años no bastan para separarlo del ciclo: **solo el tiempo lo zanjará** (de ahí la predicción §14). - El **valor absoluto** del viento ERA5 en costa abrupta (suavizado del reanálisis): las **tendencias** son robustas, los **niveles** son aproximados. - La **traducción a la pesquería** (sardina) es por ahora una **hipótesis ecológica** coherente con CARIACO, no una medición local de captura/clorofila.

Lo que no sabemos por completo: - La **fecha exacta** del giro de la AMV (≈2030–2040 es una estimación amplia). - El **peso relativo** de cada componente (ciclo vs AMM interanual vs secular) más allá del rango cualitativo dado. - Si la respuesta es **lineal** en AMM extremos (los récords 2023–24 podrían implicar no-linealidades del acoplamiento).

Hacia dónde vamos (próximos pasos, en orden): 1. **Extender el viento ERA5 a 1940** para cubrir la fase cálida AMV anterior (~1930–1965) y comprobar la simetría del ciclo. 2. **Test formal de tendencia** (MK + Sen) sobre el récord largo, no solo correlación. 3. **Replicar en Araya y Carúpano** para confirmar que el debilitamiento es regional, no puntual. 4. **Acoplar SST/clorofila satelital (MODIS/Copernicus Marine) y captura (INSOPESCA)** para cerrar el eslabón ecológico. 5. Vigilancia operativa continua del **AMM mensual** como predictor de temporada.

16. Implicaciones ecológicas (*Sardinella aurita*)

Una caída del **~28 %** del índice de surgencia (75 → 54 $m^3 \cdot s^{-1}$/100 m en Cumaná) es una alteración mayor para el ecosistema del **golfo de Cariaco**. Un debilitamiento sistemático de los alisios implica menor transporte de Ekman, **termoclina más profunda**, SST más cálida, menor **clorofila-a** y posible descenso del **reclutamiento de sardina**, eje de la pesquería del oriente venezolano. La hipótesis es coherente con lo documentado para la cuenca de Cariaco por el programa **CARIACO** y por **Taylor *et al.* (2012)** (debilitamiento de alisios, reducción de surgencia, calentamiento y declive de la pesquería). La corroboración con captura local (INSOPESCA) y clorofila satelital (MODIS/Copernicus Marine) es el siguiente paso natural.

17. Robustez

Autocorrelación (Mann-Kendall modificado). La inferencia principal se hace sobre **medias anuales** (que minimizan la memoria serial) y se verifica con el **MK de Hamed-Rao (1998)**. Las tendencias clave conservan su significancia; el factor de inflación de varianza **n/n* ≈ 1,00** indica que las medias anuales no presentan autocorrelación significativa:

Tendencia	Sen/año	p (MK original)	p (MK Hamed-Rao)	n/n*
Cumaná · dirección (2019–25)	+1.482	0.016	0.016	1.00
Cumaná · rapidez (2015–25)	−0.080	0.003	0.003	1.00
Cumaná · surgencia Ekman (2015–25)	−31.340	0.005	0.005	1.00
Cumaná · v meridional (2019–25)	+0.116	0.003	0.003	1.00
Regional · rapidez (2015–25)	−0.061	0.002	0.002	1.00

Cross-check del AMV con un segundo producto de SST. El índice AMV (Trenberth–Shea sobre ERSST) se contrastó con la **AMO de HadISST1** (UCAR/NCAR), producto independiente: ambos **concuerdan fuertemente** (r=+0.91, n=1443) y el vínculo AMV↔SST costera **no depende del producto de SST**.

18. Salvedades metodológicas

- **ERA5** (~25–30 km) es reanálisis, no medición in situ; suaviza el viento costero local. Robusto para **tendencias**; los valores **absolutos** son aproximados.
- El índice de surgencia depende del **azimut de costa** de cada estación (estimado). Por eso las estaciones insulares pueden dar signos de Ekman distintos; las tendencias de **rapidez y componente zonal son independientes del azimut** y por ello las más robustas.
- La **autocorrelación serial** se atiende con medias anuales y MK de Hamed-Rao (§17).
- La **atribución secular vs. ciclo** requiere series ≥ varias décadas AMV completas; con 43 años se identifica la causa próxima (AMM) pero no se cierra la partición ciclo/antropogénico (§15).
- El eslabón **viento → pesquería** es por ahora hipótesis ecológica respaldada por la literatura de Cariaco, pendiente de datos locales.

Referencias

- Aparicio, R. y Contreras G., R. J. (2003). *Índice de Surgencia Costera Inducida por el Viento (ISCIV) para la región nororiental de Venezuela.* figshare. DOI 10.6084/m9.figshare.5660704.
- Bretherton, C. S., Widmann, M., Dymnikov, V. P., Wallace, J. M. e Bladé, I. (1999). The effective number of spatial degrees of freedom of a time-varying field. *Journal of Climate*, 12(7), 1990–2009.
- Chiang, J. C. H. y Vimont, D. J. (2004). Analogous Pacific and Atlantic meridional modes of tropical atmosphere–ocean variability. *Journal of Climate*, 17(21), 4143–4158.
- Colna, K. E. (2017). *Latitudinal Position and Trends of the ITCZ and its Relationship with Upwelling in the Southern Caribbean Sea and Global Climate Indices.* M.S. thesis, University of South Florida (asesor F. Muller-Karger; comité D. Enfield). usf.edu/etd/6645.
- Enfield, D. B., Mestas-Nuñez, A. M. y Trimble, P. J. (2001). The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S. *Geophysical Research Letters*, 28(10), 2077–2080.
- Hamed, K. H. y Rao, A. R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204(1–4), 182–196.
- Hersbach, H. *et al.* (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049.

- Large, W. G. y Pond, S. (1981). Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds. *Journal of Physical Oceanography*, 11(3), 324–336.
- Lindzen, R. S. y Nigam, S. (1987). On the role of sea surface temperature gradients in forcing low-level winds and convergence in the tropics. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 44(17), 2418–2436.
- Reynolds, R. W., Smith, T. M., Liu, C., Chelton, D. B., Casey, K. S. y Schlax, M. G. (2007). Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature (OISST v2). *Journal of Climate*, 20(22), 5473–5496.
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389.
- Taylor, G. T., Muller-Karger, F. E., Thunell, R. C., *et al.* (2012). Ecosystem responses in the southern Caribbean Sea to global climate change. *PNAS*, 109(47), 19315–19320.
- Trenberth, K. E. y Shea, D. J. (2006). Atlantic hurricanes and natural variability in 2005. *Geophysical Research Letters*, 33, L12704.
- NOAA/CPC. *Oceanic Niño Index (ONI)* y *Relative ONI (RONI)*. Climate Prediction Center.
- NOAA/PSL. *Atlantic Meridional Mode (AMM) index* y *OISST v2.1*. Physical Sciences Laboratory.

Datos y reproducibilidad: series anuales en `series_anuales.csv`; figuras en `docs/figs/`. Análisis reproducible con `tools/wind_report.py` (señal), `oisst_costa.py` (SST), `atlantico_forzantes.py` y `era5_largo_plazo.py` (AMM/AMV), `enso_modulacion.py` (ENSO), `itcz_atlantico.py` (ZCIT) y `ondas_tropicales.py` (ondas). Documentos de análisis por línea en `docs/*_analisis.md` y síntesis en `docs/resumen_ejecutivo.md`. Versión anterior archivada en `informe_viento_surgencia_v1.md`.
Generado a partir de ERA5 (ECMWF)/Open-Meteo, OISST v2.1 (NOAA), índices NOAA/CPC y NOAA/PSL. Observatorio ENSO Caribe — AGHES, Cumaná.