

Tendencias 1953-2018 de la humedad atmosférica en la parte norte del mar de Cortés a partir de cuatro fuentes de datos

Trends in atmospheric humidity in the northern Gulf of California from 1953 to 2018 based on four data source

Adalberto Tejeda-Martínez,* Aranza Elizabeth Baruch-Vera,** Raquel Elisa Hernández-Parra,***
René Rafael Gómez-Díaz[§] y Jaime Omar Castro-Díaz[¶]

Recibido: 13/05/2025. Aceptado: 5/07/2025. Publicado: 1/08/2025.

Resumen. Se evaluaron las tendencias de temperatura, humedad relativa y humedad absoluta en la isla Rasa, Baja California, ubicada en el centro del Mar de Cortés. Las tendencias de las variables hígricas se obtuvieron de: a) la estación meteorológica automática de Bahía de los Ángeles (28.94°N, 113.55°W y 4 msnm; EMAA), periodo 2001-2019; b) estimaciones a partir de la temperatura mínima de las estaciones climatológicas de El Barril (28.30°N, 112.88°W, 20 msnm), Bahía de Kino (28.82°N, 111.93°W, 2 msnm) y Bahía de los Ángeles (28.94°N, 113.55°W, 4 msnm), periodo 1953-2018; c) estimaciones bajo la hipótesis de la humedad relativa invariante ante el calentamiento (o enfriamiento) local y global; d) datos de reanálisis de temperatura y temperatura de punto de rocío a 2 m de altura para las coordenadas de la isla. Las tendencias de humedad absoluta

resultaron muy bajas e inversas entre los diferentes métodos de obtención de la variable y su tendencia regional estimada es positiva, pero insignificante. La tendencia de humedad relativa a partir de los datos de reanálisis fue de 0.18 puntos porcentuales por década y para la humedad absoluta de 0.25 gm⁻³/década. Como conclusión, en el centro del mar de Cortés las tendencias de humedad son inciertas e insignificantes comparadas con las medias climáticas de la zona. La tendencia térmica resultó de 0.36 °C/década para la EMAA, la tendencia regional fue de 0.21 °C/década y la obtenida con datos de reanálisis de 0.29 °C/década, todas similares a la global reportada por el IPCC.

Palabras clave: temperatura, humedad absoluta, humedad relativa, estimaciones, reanálisis, tendencias.

* Grupo de Climatología Aplicada, Facultad de Instrumentación Electrónica, Universidad Veracruzana. Circuito Aguirre Beltrán s/n, Zona Universitaria, 91090, Xalapa-Enríquez, Veracruz, México. ORCID: 0000-0002-2513-3454. Email: atejeda.martinez@gmail.com. Autor de correspondencia.

** Grupo de Climatología Aplicada, Facultad de Instrumentación Electrónica, Universidad Veracruzana. Circuito Aguirre Beltrán s/n, Zona Universitaria, 91090, Xalapa-Enríquez, Veracruz, México. ORCID: 0009-0000-4504-7927. Email: [vera.aranza@gmail.com](mailto:veranza@gmail.com)

*** Grupo de Climatología Aplicada, Facultad de Instrumentación Electrónica, Universidad Veracruzana. Circuito Aguirre Beltrán s/n, Zona Universitaria, 91090, Xalapa-Enríquez, Veracruz, México. ORCID: 0009-0006-3865-9136. raquelelisahernandezparra@gmail.com

[§] Grupo de Climatología Aplicada, Facultad de Instrumentación Electrónica, Universidad Veracruzana. Circuito Aguirre Beltrán s/n, Zona Universitaria, 91090, Xalapa-Enríquez, Veracruz, México. ORCID: 0009-0007-7519-7740. Email: renedg03@gmail.com

[¶] Grupo de Climatología Aplicada, Facultad de Instrumentación Electrónica, Universidad Veracruzana. Circuito Aguirre Beltrán s/n, Zona Universitaria, 91090, Xalapa-Enríquez, Veracruz, México. ORCID: 0009-0008-2435-1661. Email: omcastro293@gmail.com

Abstract. Temperature, relative humidity, and absolute humidity trends were evaluated on Rasa Island, Baja California, located in the center of the Sea of Cortez. The trends in hygic variables were obtained from: a) the automatic weather station in Bahía de los Ángeles (28.94°N, 113.55°W and 4 m above sea level; EMAA), period 2001-2019; b) estimates based on the minimum temperature of the weather stations in El Barril (28.30°N, 112.88°W, 20 m above sea level), Bahía de Kino (28.82°N, 111.93°W, 2 m above sea level) and Bahía de los Ángeles (28.94°N, 113.55°W, 4 m above sea level), period 1953-2018; c) estimates under the hypothesis of relative humidity invariant to local and global warming (or cooling); d) reanalysis data for temperature and dew point temperature at 2 m above sea level for the island's coordinates. Absolute humidity trends

were very low and inverse between the different methods of obtaining the variable, and their estimated regional trend is positive but insignificant. The relative humidity trend based on reanalysis data was 0.18 percentage points per decade and for absolute humidity 0.25 gm⁻³/decade. In conclusion, in the center of the Sea of Cortez, humidity trends are uncertain and insignificant compared to the climate averages for the area. The temperature trend was 0.36 °C/decade for the EMAA, the regional trend was 0.21 °C/decade, and the trend obtained from reanalysis data was 0.29 °C/decade, all similar to the global trend reported by the IPCC.

Keyword: temperature, relative humidity, absolute humidity, estimations, reanalysis, trends.

INTRODUCCIÓN

Isla Rasa (28.82°N, 112.98°W) es un área natural protegida en el golfo de California, o mar de Cortés, con una superficie de 0.68 km². A pesar de ser pequeña, es de relevancia ecológica, pues se encuentra dentro de una zona de alta productividad marina (Velarde *et al.*, 2014a, b); además, es refugio y sitio de anidación de especies de aves marinas como el charrán elegante y la gaviota ploma, que concentran cerca del 95 % de su población mundial en el golfo de California durante la temporada de anidación (Velarde, 2010; Danemann y Ecurra, 2008).

Según Hernández (1989), debido a su ubicación geográfica, la isla Rasa presenta condiciones típicas de los ambientes áridos, como escasa precipitación y temperaturas altas en el semestre centrado en el verano. Los climas de las islas del golfo de California se ven influenciados por la alta presión del Pacífico norte y la barrera montañosa de la península de Baja California, que limitan la interacción directa con el océano abierto. Las temperaturas más cálidas en la región del Golfo descienden de norte a sur y pueden observarse diferencias térmicas de hasta 10 °C entre sus extremos latitudinales. En la vertiente occidental del mar de Cortés las temperaturas son mayores que en las costas de Sonora y Sinaloa debido a la surgencia de agua fría como consecuencia del desplazamiento de agua cálida superficial por los vientos del oeste, principalmente en el invierno. Por su parte, Velarde *et al.* (2014a) aclaran que durante los meses de verano se desarrollan nieblas debido al aire cálido que se desplaza sobre la zona

de surgencia de agua fría; bajo los efectos de El Niño, también se presentan dichas condiciones en otras épocas del año.

El régimen termopluviométrico de la región de estudio queda descrito en las Figuras 1 y 2. Las estadísticas regionales para estas figuras se obtuvieron de promedios de la temperatura y la precipitación pluvial de tres estaciones climatológicas—El Barril (28.30°N, 112.88°W y 20 msnm), Bahía de Kino (28.82°N, 111.93°W y 2 msnm) y Bahía de los Ángeles (28.94°N, 113.55°W y 4 msnm; Ángeles, EC)— cercanas a isla Rasa, ubicadas en la Región de las Grandes Islas del Golfo de California (Velarde, 2010), al sureste de Baja California y al oeste de Sonora (Tabla 1 y Figura 3); los extremos corresponden a los valores máximos y mínimos de cada mes, independientemente del lugar que los presente. Se utilizaron datos diarios de temperaturas máxima y mínima y precipitación de esas tres estaciones, con registros de un periodo relativamente largo (1953-2018). En bahía de los Ángeles hay también una estación meteorológica automática (EMAA en lo sucesivo), con registro de temperatura y humedad relativa cada diez minutos para el periodo 2001-2019.

Las estaciones climatológicas convencionales, como las mencionadas, usan sensores de lectura directa para la temperatura, con un rango de medición de -30 °C a 60 °C y una resolución de 0.2°, mientras que las EMA usan sensores digitales en un rango de -40 °C a 60 °C, con una resolución de 0.1 °C para la temperatura, y para la humedad relativa el

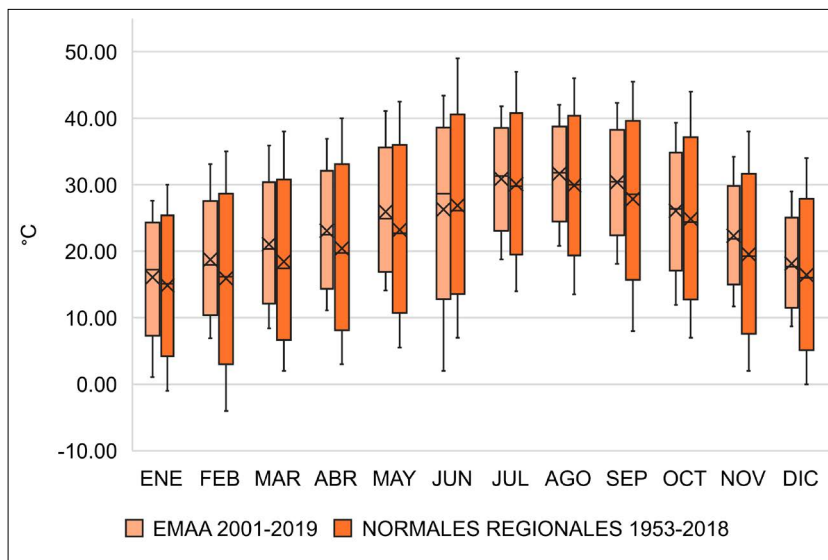


Figura 1. Temperaturas (máxima extrema, promedio de la máxima, media, promedio de la mínima y mínima extrema) de la EMAA (2001-2019) y de las normales climatológicas regionales (1953-2018).

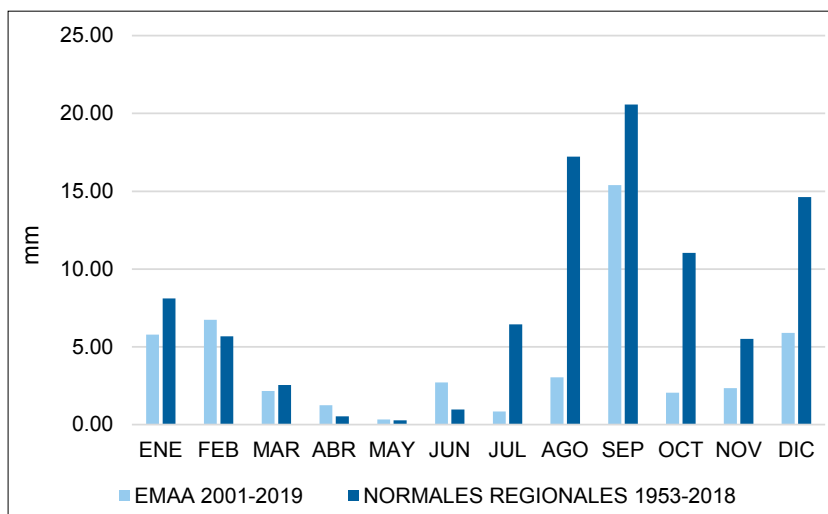


Figura 2. Precipitación acumulada mensual de la EMAA y de las normales climatológicas regionales (1953-2018).

Tabla 1. Disponibilidad de datos en el periodo 1953-2018 (%).

	Periodo	Mensuales			Diarios	
		T_M	\bar{T}	T_m	T_M	T_m
EMAA	2001-2019	100	100	100	99	99
Ángeles EC	1953-2018	91	91	97	90	90
Bahía de Kino	1974-2016	50	50	50	51	51
El Barril	1955-2016	91	91	97	90	90

T_m = Temperatura mínima, T_M = Temperatura máxima y \bar{T} = Temperatura media.

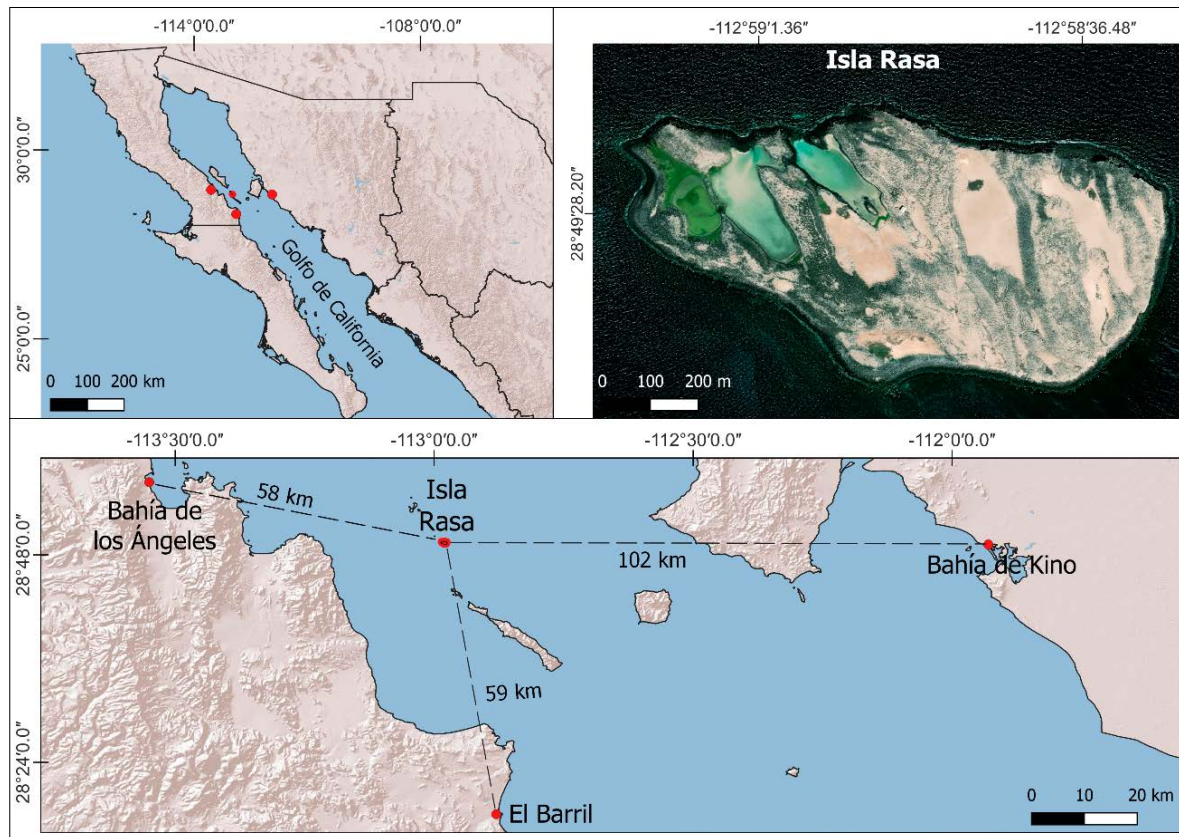


Figura 3. Ubicación de la isla Rasa y de las estaciones climatológicas más cercanas. Fuente: elaboración propia a partir de: <https://smn.conagua.gob.mx/es/información/información-climatologica/información-estadistica-climatologica>. (no funciona).

rango va de 0 a 100%, con una resolución de 1% (Secretaría de Economía, 2013).

De la Figura 2 se observa que las mayores precipitaciones suelen ocurrir entre finales del verano y el invierno. En consecuencia, como se verá más adelante, la EMAA muestra que el contenido de vapor en la atmósfera medido por la humedad absoluta, en promedio durante el semestre de junio-noviembre, es casi el doble que en el resto del año: 14.1 contra 7.8 gm^{-3} .

MÉTODOS

Datos y área de estudio

En la Figura 1 se aprecia que las temperaturas medias de la estación meteorológica automática en

bahía de los Ángeles (EMAA) representan adecuadamente el régimen térmico de la región, aunque las extremas regionales –por la forma en que se obtuvieron– tienen un rango mayor. Se evaluaron las tendencias de temperatura y humedad de las anomalías 2001-2019 para la EMAA; para las estaciones climatológicas de El Barril, Bahía de Kino y Ángeles EC se calcularon las tendencias de las anomalías térmicas y se estimaron las de humedad relativa y humedad absoluta para periodos comprendidos entre 1953-2018. Se usaron datos diarios de temperatura mínima para estimar las variables hídricas de las estaciones climatológicas durante el semestre junio-noviembre, pues para el resto de los meses no se obtuvo un modelo de estimación con bondades de ajuste que reflejaran suficiente confiabilidad.

Se utilizaron datos de reanálisis ERA 5 con resolución $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (Hersbach *et al.*, 2023) para la región comprendida entre las coordenadas $112.88-113.13^\circ\text{W}$ y $28.68-28.93^\circ\text{N}$, y se interpolaron para la ubicación de isla Rasa. Se obtuvieron dos datos por día (00 Z y 12 Z) para el periodo 2001-2023 de las variables de temperatura a 2 metros (t_{2m} , $^\circ\text{C}$) y temperatura de punto de rocío a 2 metros (d_{2m} , $^\circ\text{C}$) para el cálculo de las tendencias. Además, para fines comparativos se calculó la presión de vapor del semestre junio-noviembre del periodo 2001-2019, cuyo método se describe en secciones posteriores.

En resumen, los datos de humedad con los que se calcularon las tendencias fueron obtenidos a partir de cuatro procedimientos:

- Con datos observados en la EMAA, para el periodo 2001-2019.
- A partir de estimaciones con un modelo de regresión lineal de la presión de vapor contra la temperatura, para las tres estaciones climatológicas en los respectivos periodos indicados en la Tabla 1.
- Para los mismos periodos del procedimiento anterior, considerando la hipótesis de la humedad relativa invariante ante el calentamiento (o enfriamiento) local y global, es decir, manteniendo constante el promedio del primer año.
- Con datos de reanálisis interpolados a las coordenadas de isla Rasa, para el periodo 2001-2023.

Estaciones climatológicas y estación meteorológica automática

Para identificar datos atípicos en las bases de datos de las estaciones climatológicas y la EMAA, se elaboraron diagramas de cajas y bigotes de las temperaturas máxima y mínima medias mensuales con el software Minitab, versión 17. Se eliminaron los datos fuera del intervalo entre la media ± 2 desviaciones estándares. Las series de datos de la EMAA pasaron esta prueba. En cambio fueron eliminados datos fuera de rango no consecutivos en 28 casos mensuales en la estación de El Barril, 25 en Ángeles EC y 11 en Bahía de Kino. Posteriormente, por interpolación lineal, se imputaron los valores

mensuales faltantes (por ausencia o eliminación) con el promedio de dos años anteriores y dos posteriores para el mes respectivo. Como máximo se interpolaron dos años faltantes consecutivos para cada mes o, en su defecto, se dejaron como datos faltantes. Después de imputar los faltantes, la base de datos quedó con las características mostradas en la Tabla 1.

Análisis de la humedad

La temperatura media de cada mes (en $^\circ\text{C}$) se obtuvo como:

$$\bar{T} = \frac{(T_M + T_m)}{2} \quad \text{Ec. 1}$$

donde T_M es la temperatura máxima y T_m es la temperatura mínima medias mensuales.

Para las estaciones climatológicas, los promedios mensuales de humedad relativa (cantidad de vapor presente en la atmósfera con relación al necesario para la saturación, f en %) se obtuvieron mediante el procedimiento siguiente.

Para cada mes se calculó el valor normal (promedio del periodo 1956-1985) de la presión de vapor de saturación (e_s en hPa), aplicando el polinomio de Adem (1967):

$$e_s = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i \bar{T}^i \quad \text{Ec. 2}$$

con $b_0=6.115$, $b_1=0.42915$, $b_2=1.4205 \times 10^{-2}$, $b_3=3.046 \times 10^{-4}$, $b_4=3.2 \times 10^{-6}$, con la T en $^\circ\text{C}$ y e_s en hPa.

Para la presión de vapor (e en hPa) media se generaron modelos de regresión con los datos mensuales de la EMAA en función de la temperatura media, temperatura máxima, oscilación térmica y temperatura mínima para cada mes, agrupados por trimestres y semestres.

De todos esos modelos, el único que obtuvo un coeficiente de correlación lineal mayor a 0.8 entre datos observados y estimados fue el de la temperatura mínima (T_m) para el semestre de junio a noviembre cuando se presentan los máximos de lluvias mensuales (Figura 2). La relación estadística obtenida es la ecuación 3:

$$e = c_0 + \sum_{i=1}^2 c_i T_m^i \quad \text{Ec. 3}$$

con T en °C y e en hPa, con los coeficientes $c_0 = 25.348$, $c_1 = -2.0041$ y $c_2 = 0.0712$, para una muestra de 114 parejas de datos correspondientes a seis meses (junio a noviembre) durante 19 años (2001-2019). El modelo se puede ver gráficamente en la Figura 4 y su bondad de ajuste se muestra en la Tabla 2.

Como se dijo, no fue posible generar un modelo de regresión para la presión de vapor fuera del semestre junio-noviembre. Debe notarse que en este semestre ocurren los máximos de temperatura y precipitación (Figuras 1 y 2), y de ocurrencia de nieblas (Velarte *et al.*, 2014 a). También en este semestre se presentan los vientos monzónicos, pero ante la falta de datos de viento observados, no fue posible comprobar la influencia de los vientos

monzónicos en la correlación de la presión de vapor y la temperatura mínima. Además, a nivel de superficie el monzón es alterado por las cadenas montañosas que atraviesan la península de Baja California (Monterroso-Rivas *et al.*, 2014).

A partir de las ecuaciones 2 y 3, se obtuvo la humedad relativa media mensual (en %) con:

$$\bar{f} = 100 \frac{e}{e_s} \quad \text{Ec. 4}$$

La aplicación de la ecuación 4 arroja un valor aproximado, puesto que, como afirman Trenberth *et al.* (2007), las relaciones de la termodinámica atmosférica son válidas para condiciones instantáneas y no para promedios de periodos relativamente largos, ya que dichas relaciones no son lineales.

Se generaron datos estimados de humedad relativa de las tres estaciones climatológicas mes a mes de junio a noviembre, para todos los años de las series de tiempo de las estaciones climatológicas.

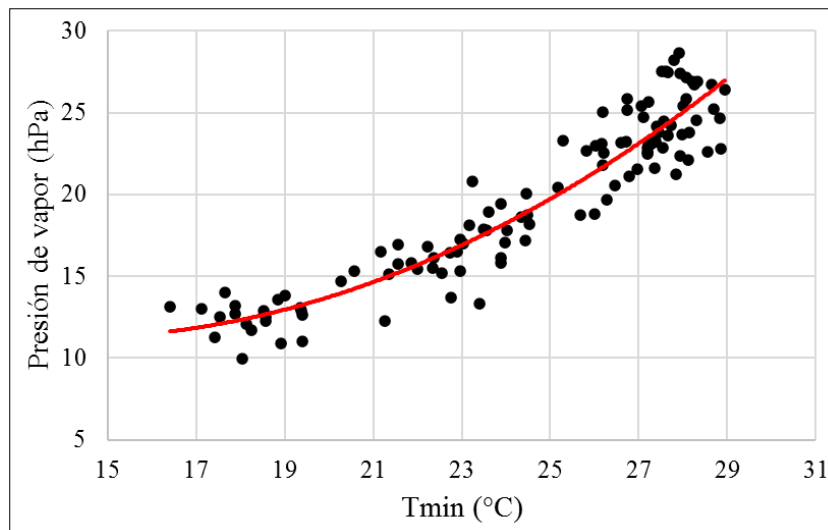


Figura 4. Modelo cuadrático (Ec. 3) de la presión de vapor como función de la temperatura mínima media mensual para el periodo junio-noviembre en la EMAA (tamaño de la muestra =114).

Tabla 2. Estadística de prueba del modelo semestral (junio- noviembre) para la estimación de la presión de vapor (e , en hPa) en la EMAA (tamaño de la muestra =114; nivel de significancia de 0.05).

	Correlación lineal (observado vs estimados)	ESR (hPa)	Sesgo (hPa)	Desviación estándar (e observada hPa)	Desviación estándar (e estimada hPa)	Media (e observada hPa)	Media (e estimada hPa)
Presión de vapor (e)	0.94	1.72	-0.01	5.05	4.74	19.70	19.69

Estimación de la humedad considerando la humedad relativa invariante

Evidentemente, la humedad relativa puede cambiar de mes a mes debido a variaciones meteorológicas del sitio en cuestión. Sin embargo, diversos autores como Manabe y Wetherald (1967), Garduño y Adem (1993), Schneider *et al.* (1999), Stocker *et al.* (2013) y Langendijk *et al.* (2019), mediante observaciones y simulaciones, han documentado la invarianza de la humedad relativa ante cambios de temperatura en periodos de años. Para efectos comparativos se aplicó esta hipótesis a las series de tiempo de cada estación climatológica, es decir, se consideró que la humedad relativa media calculada para cada mes en el primer año de la serie de años analizados (f_n en %) se mantiene invariante, como se muestra en la ecuación 5, donde la presión de vapor del mes i para el año j (e_{ij}), se obtuvo como resultado del producto de f_n y la presión de vapor de saturación del mes i para el año j (e_{sij}):

$$e_{ij} = \frac{f_n e_{sij}}{100} \quad \text{Ec. 5}$$

De igual forma la ecuación 5 fue aplicada a los datos mensuales de la EMAA en el periodo 2001-2019.

La humedad absoluta (gm^{-3}), o densidad del vapor se calculó con la fórmula de recurrencia (véase, por ejemplo, Tejeda-Martínez *et al.*, 2018, Ec. 1.10):

$$\rho_w = 217 \frac{e_{ij}}{\bar{T}_{ij}} \quad \text{Ec. 6}$$

con la temperatura media del mes i para el año j en grados absolutos (K).

Finalmente, para las cuatro estaciones del estudio (una automática y tres climatológicas convencionales) se calcularon las tendencias de la temperatura media a partir de su anomalía (también para la mínima y la máxima, que no se incluyen porque son muy similares a las de la media) y para la humedad absoluta.

Reanálisis

Los datos de reanálisis (Hersbach, 2023) se descargaron de Climate Data Store (2024), que, como único dato de humedad atmosférica, proporciona

la temperatura de punto de rocío. Se promediaron los dos datos diarios para obtener la media diaria de cada variable para el periodo 2001-2023. Dado que la relación entre la temperatura ambiente y la presión de vapor de saturación es equivalente a la que existe entre la temperatura de punto de rocío y la presión de vapor (véase, por ejemplo, Tejeda-Martínez *et al.*, 2018), se aplicó el polinomio de Adem (1967) para calcular la presión de vapor diaria en función de la temperatura de punto de rocío a 2m ($d2m$ en Ec. 7) y la presión de vapor de saturación en función de la temperatura a 2 m ($t2m$ en Ec. 8). Los coeficientes de estas ecuaciones son los mismos que de la ecuación 2:

$$e = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i (d2m)^i \quad \text{Ec. 7}$$

$$e_s = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i (t2m)^i \quad \text{Ec. 8}$$

A partir de la base de datos diaria de presión de vapor se calculó la humedad relativa mediante la ecuación 4, y la humedad absoluta siguiendo la ecuación 9, con $t2m$ en grados absolutos (K).

$$\rho_w = 217 \frac{e}{(t2m)_i} \quad \text{Ec. 9}$$

Posteriormente, con el fin de comparar los datos de reanálisis con los datos de estimación de humedad atmosférica, se calculó el promedio mensual en el periodo junio a noviembre de temperatura y de presión de vapor a 2 m para el periodo 2001-2019. Los resultados se mostrarán más adelante.

RESULTADOS

La tendencia –entendida como la pendiente de las rectas de regresión de la anomalía de la temperatura media– en la EMAA fue de $0.36 \text{ }^\circ\text{C}/\text{década}$ en el periodo 2001-2019, para los datos de reanálisis la tendencia fue de $0.29 \text{ }^\circ\text{C}/\text{década}$ para el periodo 2019-2023. Las tendencias de las anomalías a partir de datos diarios de la temperatura en la EMAA y de

datos de reanálisis se presentan en la Figura 5. Los niveles de significancia fueron de 0.05.

En la Tabla 3 se consignan las tendencias térmicas de los datos de la EMAA, de las estaciones climatológicas y de reanálisis, así como el promedio

de las estaciones climatológicas y la EMAA representativo de la tendencia regional. La tendencia media del periodo 1955-2020 reportada por el IPCC en su Sexto Reporte de Evaluación, Grupo 1 (IPCC, 2021), es de $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{década}$, la tendencia regional

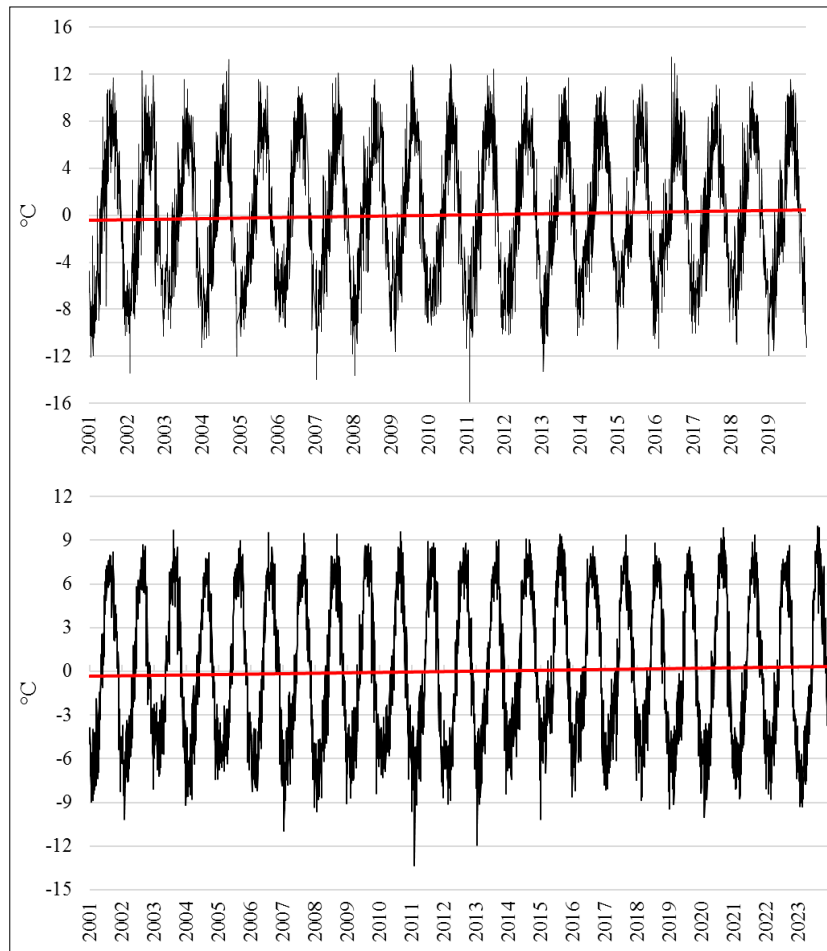


Figura 5. Anomalía de las temperaturas medias diarias de la EMAA 2001-2019, con línea de tendencia $y = 10^{-4}x - 5.1004$ (arriba); y de los datos de reanálisis 2001-2023 con línea de tendencia $y = 8 \cdot 10^{-5}x - 3.2339$ (abajo).

Tabla 3. Tendencias de las anomalías térmicas de las estaciones utilizadas.

	Periodo	Datos	Tamaño de la muestra	Tendencia ($^{\circ}\text{C}/\text{década}$)
EMAA	2001-2019	Diarios	6737	0.36
Ángeles EC	1953-2018	Promedio semestral (jun-nov)	66	0.05
Bahía de Kino	1974-2016	Promedio semestral (jun-nov)	29	0.27
El Barril	1955-2016	Promedio semestral (jun-nov)	58	0.18
Tendencia Regional		Promedio EMAA y estaciones climatológicas		0.21
Reanálisis	2001-2023	Diarios	8400	0.29

es de 0.21°C/década considerando tanto EMAA y las estaciones climatológicas; o de 0.17 °C/década si solo se utilizan las estaciones climatológicas, y la tendencia obtenida con los datos de reanálisis es de 0.29 °C/década. Como se ve, estos resultados presentan tendencias similares.

Por su parte, las tendencias de las anomalías de la humedad atmosférica observadas en la EMAA se pueden ver en la Tabla 4. En la Figura 6 se presentan únicamente las tendencias de la humedad atmosféricas calculadas a partir de datos diarios. La tendencia de la humedad relativa a partir de datos

Tabla 4. Tendencia promedio semestral (junio-noviembre) y diaria 2001-2019 de las anomalías de humedad relativa media (en puntos porcentuales por década, pp/década) y de las anomalías de humedad absoluta media (gm⁻³ por cada década), observadas en la EMAA y estimadas con la hipótesis de la humedad relativa invariante.

	Humedad relativa (pp/década)	Humedad absoluta (gm ⁻³ /década)
Observadas con datos de promedio semestral(N=19)	-2.7	-0.6
Observadas con datos diarios (N=6745)	-3.3	-0.36
Humedad relativa invariante (N=19)	0	0.14

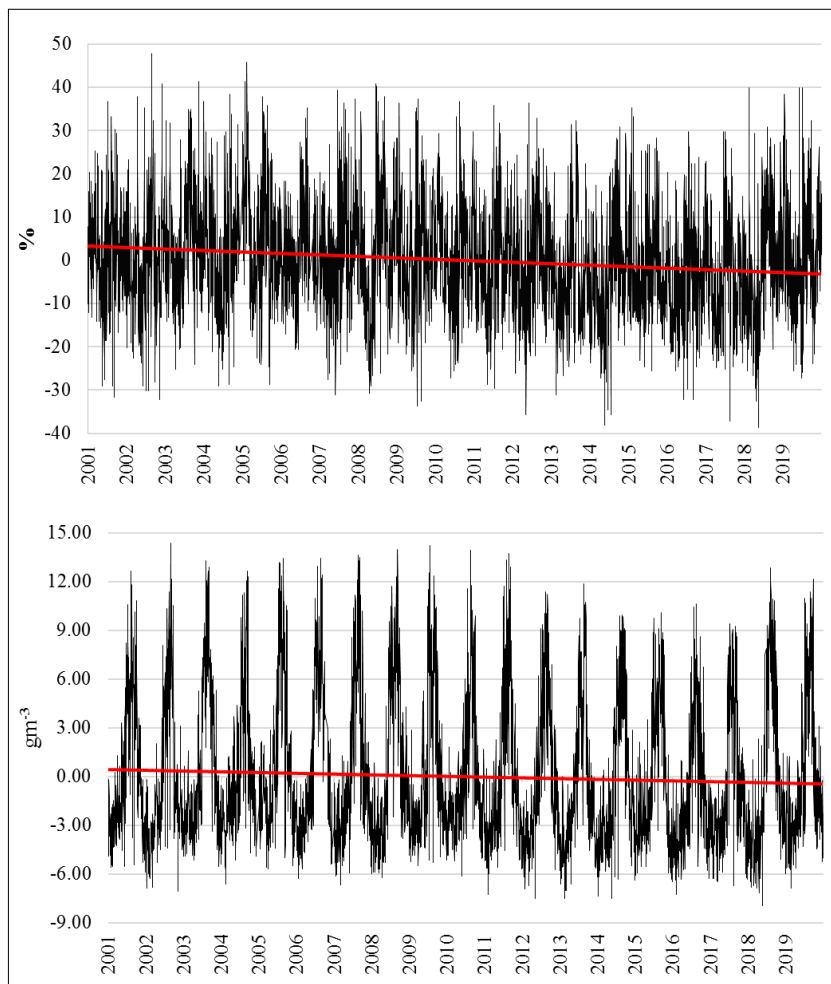


Figura 6. Anomalía de la humedad relativa media diaria con línea de tendencia $y = -9 \cdot 10^{-4}x + 38.016$ (arriba); y de la humedad absoluta media diaria, con línea de tendencia $y = -10^{-4}x + 5.2059$ (abajo), de la EMAA 2001-2019.

semestrales junio-noviembre es de -2.7 puntos porcentuales por cada década (pp/década), mientras que la tendencia a partir de datos diarios es de -3.3 pp/década, la cual representa apenas el 7% de la media anual de 47.2%, por lo que se puede considerar que está en el intervalo de las incertidumbres observacional y de cálculo de esta variable. La tendencia de humedad absoluta con datos semestrales muestra una disminución del contenido de vapor atmosférico de $-0.6 \text{ gm}^{-3}/\text{década}$, que es el 5.5% de la media de 11 gm^{-3} . Por su parte, la tendencia a partir de datos diarios resultó de $-0.36 \text{ gm}^{-3}/\text{década}$ (Figura 6, abajo) que corresponde al 3.2% de la media antes mencionada.

Al adoptar la hipótesis de la humedad relativa invariante —que es defendible puesto que la tendencia observada es baja respecto de la humedad relativa media— se tendría una tendencia decadal de la humedad absoluta de 1.2% respecto de la anomalía del promedio semestral. En cualquier caso, las tendencias de la humedad absoluta son muy bajas y, como además algunos resultados son de signos contrarios entre sí, se puede afirmar que para el periodo 2001-2019 el cambio en el contenido de vapor del aire cercano a la superficie observado en la EMAA es incierto (es decir, positivo si se calcula con un procedimiento y negativo si se calcula con otro) e insignificante (del orden de la resolución de los equipos de medición, de $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ para la temperatura y 1% para la humedad relativa).

En la Tabla 5 se presentan las tendencias de las anomalías de la humedad absoluta obtenidas con la aplicación del procedimiento de las ecuaciones 2 a 6 para el semestre junio-noviembre, y con la hipótesis de la humedad relativa invariante en las

tres estaciones climatológicas. Conviene recordar que los resultados de la Tabla 5 corresponden a estimaciones (no a mediciones) para el semestre junio-noviembre, cuando la media de la humedad absoluta medida en la EMAA es de 14.1 gm^{-3} . Salvo la estimación para El Barril con humedad relativa variable, el resto de los resultados son positivos. Si se recurre a los promedios de las tres estaciones, resulta que el cambio decadal de la humedad absoluta está entre 0.05 y 0.07 gm^{-3} , es decir, entre el 0.03 y el 0.05 % de la media del semestre de verano. A pesar de que para estas estaciones la tendencia es positiva —ya no incierta, sino que es positiva, independientemente del procedimiento de cálculo—, pero sigue siendo insignificante, o sea del orden de la resolución de los equipos de medición y sin relevancia en términos climáticos.

Las tendencias de la humedad atmosférica con los datos de reanálisis se muestran en la Tabla 6 y en la Figura 7. La tendencia de la humedad relativa de 0.18 puntos porcentuales por década y para la humedad absoluta la tendencia lineal es de 0.25 gm^{-3} por cada década.

Se generó la matriz de correlaciones para conocer el grado de similitud entre los datos de la presión de vapor para el semestre junio-noviembre

Tabla 6. Tendencias de las anomalías de humedad relativa media diaria (en pp/década) y de la humedad absoluta media ($\text{gm}^{-3}/\text{década}$) para el periodo 2001-2023, a partir de los datos de reanálisis (tamaño de la muestra=8400).

	Humedad relativa (pp/década)	Humedad absoluta ($\text{gm}^{-3}/\text{década}$)
Reanálisis	0.18	0.25

Tabla 5. Tendencias de las anomalías de humedad absoluta ($\text{gm}^{-3}/\text{década}$) del promedio semestral (jun-nov) en las estaciones climatológicas.

Estación	Periodo	Tamaño de la muestra	Estimada con humedad relativa variable	Estimada con humedad relativa invariante
EC Ángeles	1953-2018	66	0.04	0.02
Bahía de Kino	1974-2016	29	0.17	0.09
El Barril	1955-2016	58	-0.07	0.10
Promedio			0.05	0.07

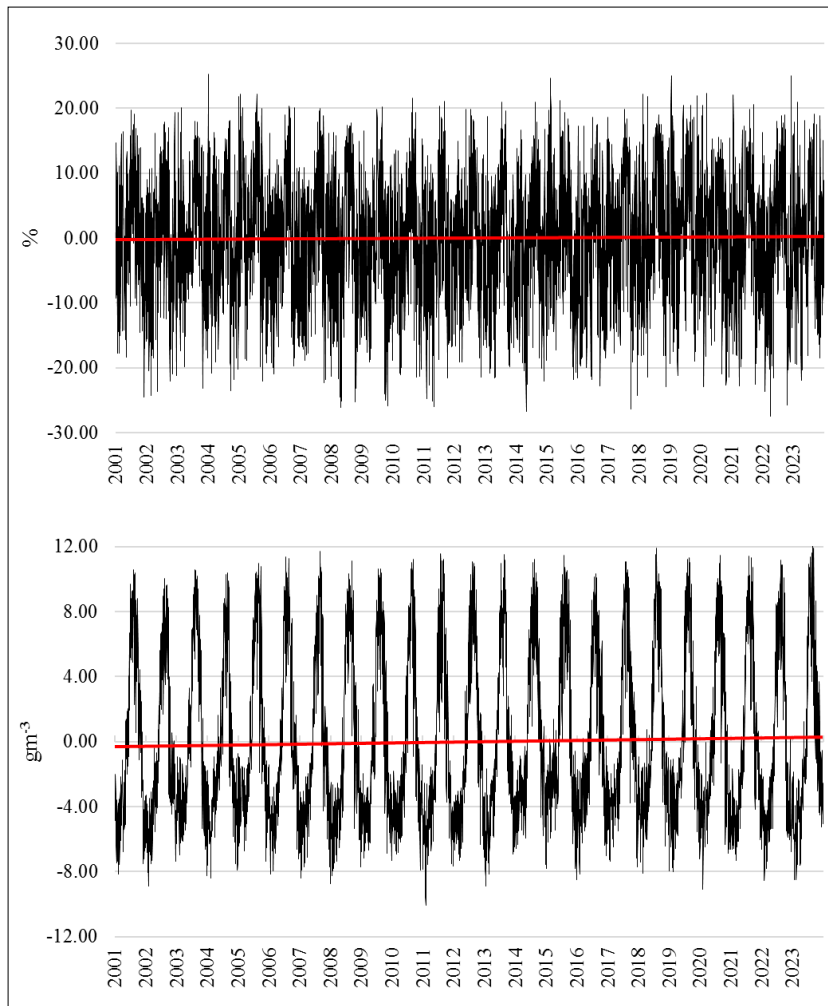


Figura 7. Anomalía de la humedad relativa media diaria con línea de tendencia $y = 5 \cdot 10^{-5}x - 2.0877$ (arriba); y de la humedad absoluta media diaria con línea de tendencia $y = 7 \cdot 10^{-5}x - 2.9473$ (abajo) calculadas con datos de reanálisis 2001-2023.

del periodo 2001-2019 obtenidos con cuatro diferentes fuentes de datos (Tabla 7). Se observa que todas las comparaciones resultan con un coeficiente de correlación superior a 0.9, pero las más altas se

presentaron cuando se comparó la presión de vapor estimada a partir de la temperatura mínima con la estimada considerando la humedad relativa constante (0.99, Figura 8, arriba), y de la comparación

Tabla 7. Matriz de correlaciones lineales (a niveles de significancia de 0.05) de las presiones de vapor obtenidas por las cuatro fuentes, a partir de promedios mensuales junio a noviembre 2001-2019 (tamaño de la muestra = 114 por cada fuente).

	EMAA	Estimado Modelo junio a noviembre	Estimado con humedad relativa constante	Reanálisis
EMAA	1.00			
Estimado Modelo jun-nov	0.94	1.00		
Estimado con HR = constante	0.94	0.99	1.00	
Reanálisis	0.97	0.93	0.93	1.00

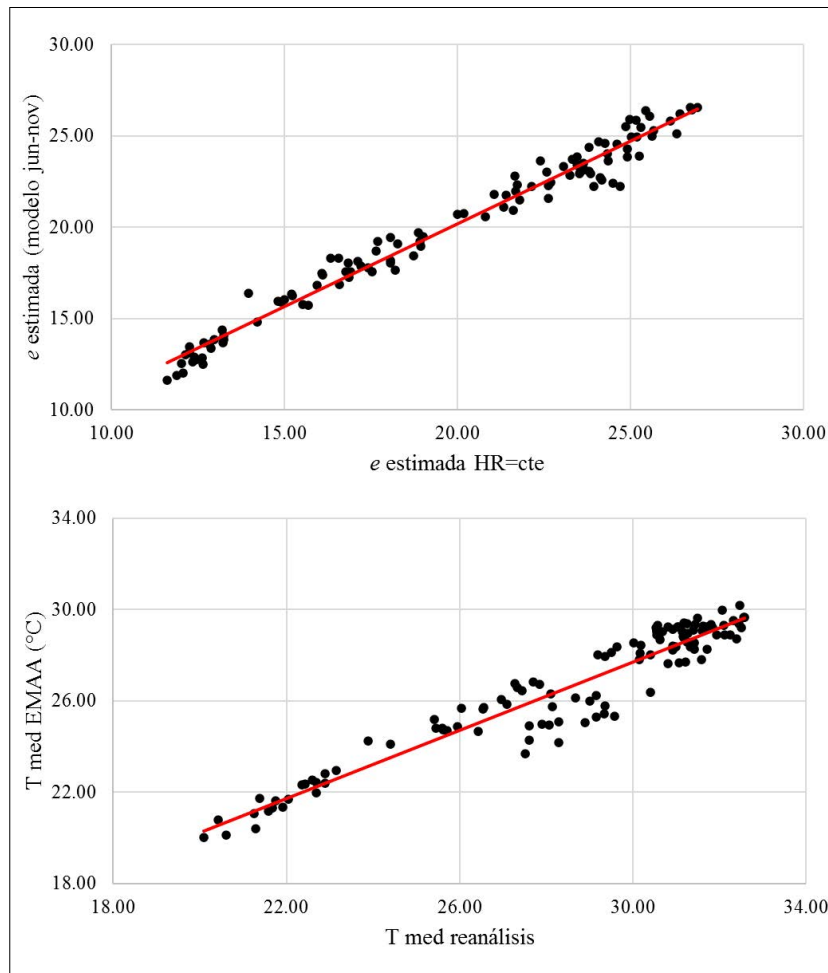


Figura 8. Presión de vapor estimada con el modelo junio-noviembre vs. calculada con datos de reanálisis (arriba), $y = 0.9076x + 2.0393$ con $R^2=0.97$; y temperatura media observada en la EMAA vs. datos de reanálisis (abajo), $y = 0.7459x + 5.3287$ con $R^2=0.92$; (tamaño de muestra=114).

entre los datos de la EMAA y los de reanálisis (0.97). Por su parte, al evaluar la similitud de las series de tiempo de temperatura media, el coeficiente de correlación lineal más alto se presentó entre los datos de la EMAA con los de reanálisis obteniendo un coeficiente de correlación de 0.96 (Figura 8, abajo).

COMENTARIOS FINALES

La riqueza de la isla Rasa en fauna, particularmente avícola, motivó la búsqueda de tendencias de la humedad atmosférica en dicha isla, con la intención de buscar posteriormente relaciones entre poblaciones de aves y la humedad atmosférica. Al

no contarse con datos climatológicos observados en la isla, se recurrió a varios procedimientos de estimación en puntos cercanos donde se ubican estaciones termopluviométricas: Bahía de Kino en la costa sonorensis, El Barril y Bahía de los Ángeles, en la costa bajacaliforniana. Gracias a que en bahía de los Ángeles también hay una EMA que sí mide humedad atmosférica, se obtuvo una regresión para la presión de vapor media mensual a partir de datos medios mensuales de la temperatura mínima, válida solo para el semestre de mayores lluvias, temperaturas y nieblas (junio-noviembre). Con estas dos fuentes de datos se obtuvieron las tendencias de la humedad atmosférica (relativa y absoluta). También se calculó la tendencia considerando la hipótesis de la humedad relativa invariante, y

además con el uso de datos de reanálisis para las coordenadas de isla Rasa.

Con datos observados cada diez minutos en el periodo 2001-2019, se obtuvieron tendencias bajas de la humedad absoluta en la EMAA, que además discrepan en signo (lo que se consideró como un resultado “incierto”) cuando se las compara con las deducidas bajo la hipótesis de la humedad relativa invariante; hipótesis razonable a partir de las tendencias bajas de la humedad relativa.

La tendencia regional estimada (no observada) de la humedad absoluta en las estaciones climatológicas no es incierta, sino positiva, pero muy pequeña, insignificante desde un punto de vista climático. Con respecto a los datos de reanálisis, la tendencia de humedad atmosférica es positiva y constituye la tendencia más alta de las cuatro fuentes con 0.25 gm^{-3} en cada década.

Aunque no era el propósito central de este artículo, también se exploraron las tendencias térmicas. Para la EMAA resultó de 0.36 °C/década , la tendencia regional fue de 0.21 °C/década y la tendencia obtenida con los datos de reanálisis, de 0.29 °C/década , todas similares a la reportada por el IPCC para el planeta.

Por lo tanto, las cuatro conclusiones principales de este trabajo son:

- A. La correlación entre los datos de temperatura media observada y con reanálisis resultó alta y positiva, por lo que se deduce que hay congruencia entre los datos de temperatura, que son la base para los análisis aquí presentados.
- B. Como consecuencia de lo anterior, al comparar los resultados para la presión de vapor obtenidos de las diversas fuentes de datos, resultan también altamente correlacionados.
- C. En cuanto al propósito central del artículo, que es evaluar las tendencias hígricas para el centro del mar de Cortés, resultaron inciertas (en algunos casos positivas y en otros negativas, dependiendo del procedimiento o fuente de datos usada) e insignificantes si se las compara con las medias climáticas de la zona.
- D. Por lo anterior, los análisis aquí mostrados no evidencian que la humedad atmosférica haya

estado cambiando significativamente en la isla Rasa durante las últimas siete décadas.

REFERENCIAS

- Adem J. (1967). Parameterization of atmospheric humidity using cloudiness and temperature. *Monthly Weather Review*, 95, 83-88. doi.org/10.1175/1520-0493(1967)095<0083:POAHUC>2.3.CO;2
- Climate Data Store (2024). ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Datos recuperados entre noviembre 2024 y febrero 2025 de <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>
- Danemann, G. D., y Ezcurra, E. (Eds.). (2008). *Bahía de los Ángeles: recursos naturales y comunidad: Línea base 2007*. Instituto Nacional de Ecología.
- Garduño, R. y Adem, J. (1993). Parameterization of cloudiness as a function of temperature for use in thermodynamic model. *World Resource Review*, 5(2), 246-253.
- Hernández, M. E. (1989). Condiciones climáticas del Golfo de California y sus islas. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía de la UNAM*, (20), 71-87.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D. y Thépaut, J.-N. (2023). ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), DOI: [10.24381/cds.adbb2d47](https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47)
- IPCC. (2021). Summary for Policymakers. En V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu y B. Zhou (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 3-34). Cambridge University Press.
- Langendijk, G. S., Rechid, D. y Jacob, D. (2019). Urban areas and urban-rural contrasts under climate change: What does the EURO-CORDEX ensemble tell us? Investigating near surface humidity in Berlin and Its surroundings. *Atmosphere*, 10(12), 730; doi:10.3390/atmos10120730.
- Manabe, S., y Wetherald, R. (1967). Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 24(3): 241-259; doi:

- [10.1175/1520-0469\(1967\)024<0241:TEOTAW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1967)024<0241:TEOTAW>2.0.CO;2).
- Monterroso Rivas, A. I., Gómez Díaz, J. D. y Lechuga, L. M. (2014). Delimitación de zonas de influencia de precipitación para México. *Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Serie A*; 9. <http://hdl.handle.net/20.500.11765/8072>
- Schneider, K., Kirtman, B., Lindzen y R.S. (1999). Tropospheric water vapor and climate sensitivity. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 56(11), 1649-1658. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1999\)056%3C1649:TWVACS%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1999)056%3C1649:TWVACS%3E2.0.CO;2)
- Secretaría de Economía (2013). Norma Mexicana NMX-AA-166/1-SCFI-2013, Estaciones meteorológicas, climatológicas e hidrológicas – Parte 1: especificaciones técnicas que deben cumplir los materiales e instrumentos de medición de las estaciones meteorológicas automáticas y convencionales. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166835/nmx-aa-166-1-scfi-2013_1_.pdf
- Stocker, T., Qin, D., Plattner, G.-K., Alexander, L., Allen, S., Bindoff, N., y más. (2013). *Technical Summary*. En T. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. Allen, J. Boschung, . . . P. M. (eds.). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 33-115). Cambridge University Press.
- Tejeda-Martínez, A., Méndez Pérez, I.R., Rodríguez, N. y Tejeda-Zacarias, E. (2018). *La humedad en la atmósfera: bases físicas, instrumentos y aplicaciones*. Universidad de Colima.
- Trenberth, K., Jones, P., Ambenje, P., Bojariu, R., Easterling, D., Tank, A. K., . . . Zhai, P. (2007). Observations: surface and atmospheric climate change. En S. Solomon, M. M. D. Qin, M. M. Z. Chen, K. Averyt, M. Tignor y H. M. (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press.
- Velarde, E. (2010). Revirtiendo la marea, el caso de Isla Rasa. En J. Carabias, J. Sarukhán J, J. De la Maza y C. Galindo (Coords.), *Patrimonio natural de México. Cien casos de estudio* (pp. 36-37). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Velarde, E., Ezcurra, E., y Anderson, D. W. (2014 a). Seabirds and pelagic fish abundance in the Midriff Island Region. En E. V. Wehncke, J. R. Lara, S. Álvarez-Borrego y E. Ezcurra (Eds.), *Conservation Science in Mexico's Northwest. Ecosystem Status and Trends in the Gulf of California*. UC MEXUS, University of California.
- Velarde, E., Wilder, B. T., Felcer, R. S. y Ezcurra, E. (2014 b). Floristic diversity and dynamics of Isla Rasa, gulf of California-A globally important seabird island. *Botanical Sciences*, 92(1), 89-101.