



Proyecto PLANCLIMAC2

ANÁLISIS TEMPORAL DE VARIABLES OCEÁNICAS EN LAS REGIONES DE LAS ISLAS CANARIAS, CABO VERDE Y SANTO TOMÉ Y PRÍNCIPE (2022-2025)

Informe Científico-Técnico

**Irene Sánchez-Mendoza, David Curbelo-Hernández, Melchor González-Santana, J.
Magdalena Santana-Casiano, David González-Santana, Adrián Castro-Álamo,
Aridane G. González**



INFORME TÉCNICO

PROYECTO PLANCLIMAC2

ANÁLISIS TEMPORAL DE VARIABLES OCEÁNICAS EN LAS REGIONES DE LAS ISLAS CANARIAS, CABO VERDE Y SANTO TOMÉ Y PRÍNCIPE (2022-2025)

**Irene Sánchez-Mendoza, David Curbelo-Hernández, Melchor González-Santana,
J. Magdalena Santana-Casiano, David González-Santana, Adrián Castro-Álamo,
Aridane G. González**

**Instituto de Oceanografía y Cambio Global, IOCAG. Universidad de Las Palmas
de Gran Canaria.**



Este informe ha sido realizado en el marco del proyecto PLANCLIMAC2 (1/MAC/2/2.4/0006), enmarcado en el Programa de Cooperación Territorial Interreg VI 25 Madeira–Azores–Canarias (MAC) 2021–2027, cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

Contenido

Resumen Ejecutivo	3
Resumen	5
1. Introducción	6
2. Material y métodos	8
3. Resultados y discusión.....	10
4. Conclusiones.....	16
Referencias	17

Resumen Ejecutivo

Este informe científico-técnico analiza la evolución reciente de cinco variables oceánicas relevantes para el seguimiento climático: temperatura superficial del mar (SST), profundidad de la capa de mezcla (MLD), clorofila-a (Chl-*a*), presión parcial superficial de CO₂ (pCO_{2,sw}) y pH. Al estar enmarcado en el proyecto de cooperación de la Macaronesia PLANCLIMAC2, compara las Islas Canarias, Cabo Verde y Santo Tomé y Príncipe, tres regiones de islas con dinámicas oceanográficas diferenciadas.

El objetivo de este trabajo es caracterizar la variabilidad observada entre 2022 y 2025 y aportar una base común de información que pueda apoyar el seguimiento climático, la planificación de la adaptación y la toma de decisiones en el marco de PLANCLIMAC2.

En este sentido, de acuerdo con los datos analizados para este informe se resaltan los siguientes puntos:

- **Canarias y Cabo Verde** presentan pendientes positivas de SST y una somerización de la MLD durante 2022-2025.
- **Santo Tomé y Príncipe** muestra una respuesta distinta: pendiente negativa de SST y profundización de la MLD en la ventana temporal analizada.
- **Las tres regiones** muestran que el sistema del carbono presenta incremento de pCO_{2,sw} y descenso de pH en las tres regiones.
- **Las diferencias entre territorios** indican que la respuesta oceánica no es uniforme y está modulada por la circulación, la estratificación, la mezcla y la dinámica biológica local.

A modo de resumen, se presenta la siguiente tabla.

Región	SST	MLD	Chl- <i>a</i>	Sistema del carbono
Islas Canarias	+0.238 °C/año	-1.893 m/año	+0.003 mg m ⁻³ /año	pCO _{2,sw} aumenta; pH disminuye
Cabo Verde	+0.159 °C/año	-1.565 m/año	+0.004 mg m ⁻³ /año	pCO _{2,sw} aumenta; pH disminuye
Santo Tomé y Príncipe	-0.114 °C/año	+0.981 m/año	+0.027 mg m ⁻³ /año	pCO _{2,sw} aumenta; pH disminuye

La heterogeneidad de las tres regiones refuerza la necesidad de disponer de indicadores regionales comparables, capaces de distinguir los cambios comunes de las respuestas asociadas a la dinámica oceanográfica local.

La continuidad del seguimiento de la temperatura, la estructura de la capa de mezcla, la clorofila y el sistema del carbono puede aportar información útil para la planificación de la adaptación, la gestión de ecosistemas marinos y costeros y la priorización de medidas de resiliencia.

Prioridades para la acción climática pública

1	Mantener series de observación continuadas Dar continuidad al seguimiento para evaluar si las señales observadas persisten y separar mejor la variabilidad natural de cambios de mayor duración.
2	Armonizar indicadores y metodologías Aplicar definiciones, fuentes de datos y procedimientos comparables entre territorios para facilitar la lectura regional de los resultados.
3	Incorporar los indicadores oceánicos a la planificación Utilizar la información de SST, MLD, Chl- <i>a</i> y sistema del carbono como apoyo técnico a los procesos de seguimiento y adaptación climática.
4	Conectar observación y gestión de ecosistemas Relacionar progresivamente los cambios físicos, biológicos y del sistema del carbono con las necesidades de gestión de los ecosistemas marinos y costeros.
5	Consolidar la cooperación regional Mantener el intercambio científico y técnico entre los territorios de PLANCLIMAC2 para convertir las series de observación en información operativa y comparable.

Resumen

Este informe analiza la evolución temporal de cinco variables oceánicas — temperatura superficial del mar (SST), profundidad de la capa de mezcla (MLD), clorofila-*a* (Chl-*a*), presión parcial de CO₂ en agua de mar (pCO_{2,sw}) y pH— en las Islas Canarias, Cabo Verde y Santo Tomé y Príncipe durante los cuatro años completos comprendidos entre enero de 2022 y diciembre de 2025. El análisis integra observaciones y productos oceánicos de referencia para caracterizar la variabilidad estacional y estimar las pendientes lineales observadas durante el periodo de estudio. Los resultados muestran respuestas regionales diferenciadas: Canarias y Cabo Verde presentan pendientes positivas de SST y una somerización de la capa de mezcla, mientras que Santo Tomé y Príncipe muestra un comportamiento distinto en ambas variables. La Chl-*a* refleja patrones estacionales y episódicos asociados a la dinámica regional, y las variables del sistema del carbono presentan cambios coherentes con procesos de acidificación oceánica. Debido a la corta duración de las series, las pendientes obtenidas deben interpretarse como tendencias temporales del periodo 2022-2025 y no como tasas climáticas de largo plazo. El estudio pone de manifiesto la necesidad de mantener observaciones oceánicas continuadas y comparables que apoyen el seguimiento climático, la planificación de la adaptación y la toma de decisiones en los territorios del espacio de cooperación Interreg MAC.

1. Introducción

Las variables oceánicas desempeñan un papel fundamental en la regulación del clima global, ya que actúan como indicadores sensibles de los cambios ambientales y como componentes activos del sistema climático terrestre. El océano absorbe aproximadamente el 90% del exceso de calor generado por el calentamiento global y cerca del 28% del dióxido de carbono antropogénico emitido a la atmósfera (Friedlingstein et al., 2025; Von Schuckmann et al., 2023). La solubilidad del dióxido de carbono (CO_2) en la superficie del mar depende, entre otros factores, de la temperatura superficial del mar (SST), lo que pone de manifiesto el estrecho acoplamiento entre océano y atmósfera (Takahashi et al., 2009). Además, la absorción de CO_2 antropogénico por el agua de mar contribuye a una disminución del pH, proceso conocido como acidificación oceánica (Caldeira & Wickett, 2003; Doney et al., 2009), con posibles efectos sobre organismos calcificadores y ecosistemas marinos. De hecho, estaciones de series temporales oceánicas como ESTOC ha dejado evidencias claras de la transferencia de CO_2 atmósfera-océano y su impacto en la acidificación de la región (Santana-Casiano et al., 2007; González-Dávila et al., 2010; González-Dávila & Santana-Casiano, 2023).

La presión parcial de CO_2 en agua de mar ($p\text{CO}_{2,\text{sw}}$) está controlada por procesos interconectados, entre los que destacan el forzamiento termodinámico, la actividad biológica, la mezcla física y el intercambio de CO_2 entre el aire y el mar (Fennel et al., 2008; Ikawa et al., 2013). El componente termodinámico está fuertemente influido por la SST, que afecta a la solubilidad del CO_2 (Weiss, 1970), mientras que la *Chl-*a** puede utilizarse como indicador de la biomasa fitoplanctónica y de la respuesta biológica del sistema (Bai et al., 2015; Rivas et al., 2025). La profundidad de la capa de mezcla (MLD) aporta, por su parte, información sobre los procesos de mezcla vertical (Chen et al., 2019). Cuantificar de forma individualizada la contribución de estos procesos a la variabilidad de la $p\text{CO}_{2,\text{sw}}$ continúa siendo un reto, especialmente más allá de las aproximaciones que separan únicamente las componentes termodinámicas y no termodinámicas (Takahashi et al., 1993, 2002; Fassbender et al., 2022).

El desarrollo de la observación satelital, los reanálisis oceánicos y las mediciones *in situ* ha ampliado de forma sustancial la capacidad para realizar el seguimiento de estas variables a escalas espaciales y temporales amplias. Plataformas como Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) proporcionan productos oceánicos

derivados de sensores y modelos numéricos (Traon et al., 2019), mientras que bases de datos como SOCAT (Surface Ocean CO₂ Atlas; Bakker et al., 2014) y GLODAP (Global Ocean Data Analysis Project; Olsen et al., 2016) integran observaciones del sistema marino del carbono obtenidas mediante diferentes plataformas de muestreo. La combinación de estas fuentes permite analizar series temporales, caracterizar la variabilidad regional y establecer bases comparables para el seguimiento de los cambios oceánicos.

Las Islas Canarias, Cabo Verde y Santo Tomé y Príncipe presentan características oceanográficas diferenciadas que las convierten en áreas de especial interés para analizar la variabilidad del océano en el Atlántico oriental y comparar respuestas entre sistemas subtropicales, tropicales y ecuatoriales.

Cabo Verde se localiza en el Atlántico tropical nororiental (14-17°N, 22-25°W), en una zona de transición entre aguas subtropicales y tropicales y bajo la influencia del sistema de afloramiento de África occidental (Aristegui et al., 2009; Gaurisas et al., 2024). La región presenta una estacionalidad marcada asociada, entre otros factores, al desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) (Mayer & Weisberg, 1993; Stramma & Schott, 1999) y a la intensidad de los vientos alisios (Cardoso, 2022).

Santo Tomé y Príncipe, situado cerca del ecuador geográfico (0-2°N, 6-8°E), en el Golfo de Guinea, se caracteriza por aguas ecuatoriales cálidas y por una dinámica compleja influida por corrientes ecuatoriales, procesos de surgencia costera y aportes continentales (Chou et al., 2020; Okafor, 2025). Esta combinación de procesos contribuye a una variabilidad oceanográfica distinta de la observada en las regiones subtropicales del estudio.

La región de las Islas Canarias (13-19°W; 27-30°N), situada en el Atlántico subtropical oriental, se encuentra entre el sistema de afloramiento del noroeste africano y las aguas oligotróficas del giro subtropical del Atlántico Norte (González et al., 2024). La región está asimismo influida por la Corriente de Canarias, que forma parte del sistema de circulación del límite oriental del giro subtropical (Knoll et al., 2002).

El presente estudio tiene como objetivo analizar la evolución temporal de cinco variables oceánicas —SST, MLD, Chl-a, pCO_{2,sw} y pH— en las tres regiones durante el periodo comprendido entre enero de 2022 y diciembre de 2025, caracterizar su variabilidad estacional, estimar las tendencias lineales observadas durante esta ventana

temporal, comparar los patrones regionales y contextualizar los resultados en el marco del conocimiento científico sobre el cambio oceánico. El análisis pretende, además, aportar información técnica útil para el seguimiento ambiental y la planificación de la adaptación en el espacio de cooperación Interreg MAC.

2. Material y métodos

2.1 Áreas de Estudio

El análisis se centró en tres áreas del Atlántico oriental con dinámicas oceanográficas diferenciadas: las Islas Canarias, Cabo Verde y Santo Tomé y Príncipe. La selección permite comparar regiones subtropicales, tropicales y ecuatoriales sometidas a forzamientos físicos y biogeoquímicos distintos.

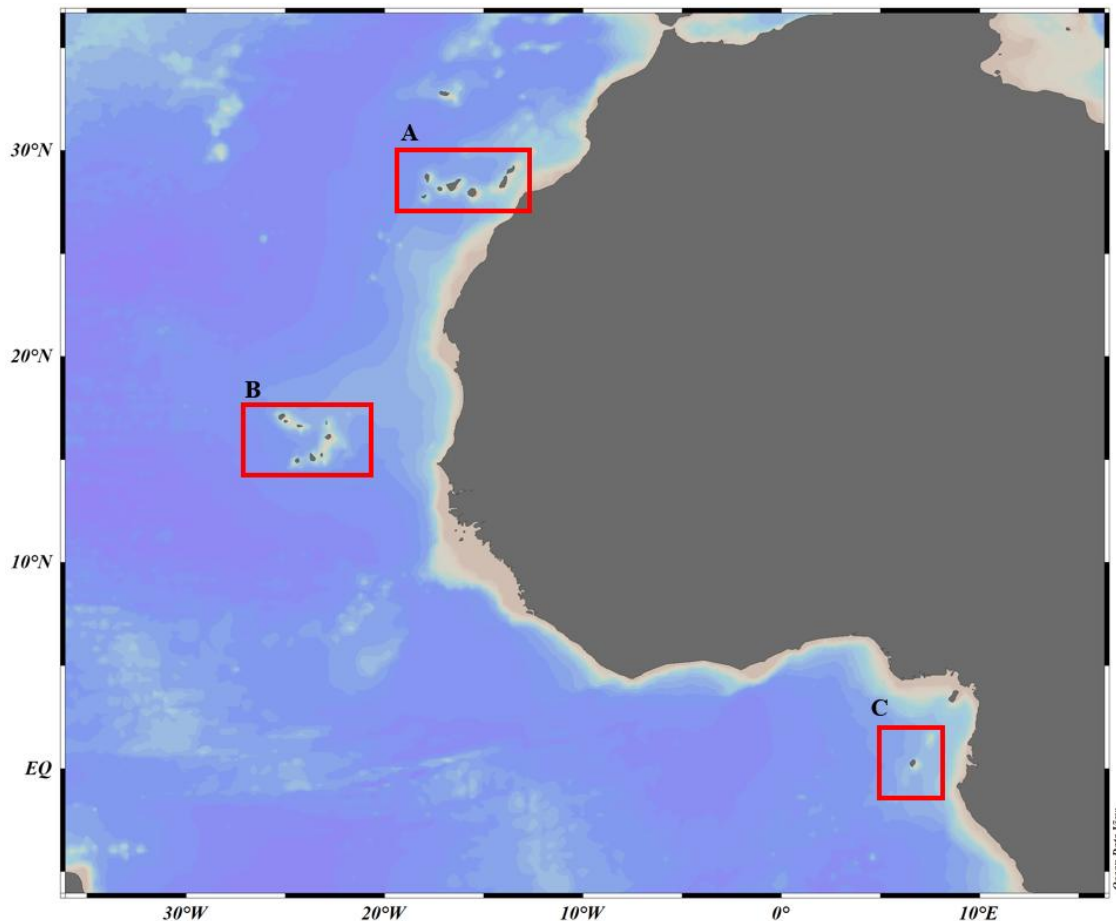


Fig. 1. Localización geográfica de los archipiélagos de estudio en el Atlántico oriental: (a) Islas Canarias, (b) Cabo Verde y (c) Santo Tomé y Príncipe.

En primer lugar, se estudia la región de las Islas Canarias, situada en el margen oriental del Atlántico Norte (13–19°W; 27–30°N). El archipiélago se encuentra bajo la influencia de la Corriente de Canarias y próximo al sistema de afloramiento del noroeste africano.

En segundo lugar, se analiza Cabo Verde, situado aproximadamente entre 14–17°N y 22–25°W, en la transición entre los regímenes subtropical y tropical.

Por último, el estudio incluye Santo Tomé y Príncipe, localizado entre 0–2°N y 6–8°E, en el golfo de Guinea.

2.2 Fuentes de Datos

El conjunto de datos utilizado integra información procedente de dos plataformas de referencia internacional, combinando mediciones in situ con productos de teledetección y reanálisis oceánico.

Para la caracterización física y biológica de la capa superficial del océano se emplearon series temporales diarias procedentes de Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS), que integra información de sensores satelitales y modelos de reanálisis (Traon et al., 2019). Se analizaron las siguientes variables:

- Temperatura superficial del mar (SST): se utilizaron datos con una resolución espacial aproximada de 0.05°, adecuada para caracterizar la variabilidad regional de la temperatura superficial (Service, 2016).
- Profundidad de la capa de mezcla (MLD): se emplearon datos derivados de modelos de reanálisis oceánico que incorporan información vertical de temperatura y salinidad para representar la extensión de la mezcla en la columna de agua (Senapati et al., 2024; Service, 2016).
- Concentración de clorofila-*a* (Chl-*a*): se utilizaron productos de color del océano (Ocean Colour) basados en algoritmos estándar para estimar la concentración superficial de clorofila-*a* como indicador de la biomasa fitoplanctónica (Service, 2019).
- pH del agua de mar: se utilizaron datos procedentes de un producto biogeoquímico de Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) para caracterizar la variabilidad espacial y temporal del pH en las aguas superficiales de las tres regiones de estudio durante el periodo 2022–2025 (Service, 2016).

Para el análisis del sistema del carbono se utilizaron datos procedentes de dos fuentes. Los registros superficiales de CO₂ se obtuvieron del *Surface Ocean CO₂ Atlas* (SOCAT), que integra observaciones de fugacidad de CO₂ en el agua de mar (fCO_{2,sw}) sometidas a procedimientos armonizados de control de calidad (Bakker et al., 2016). Los datos de pH se obtuvieron del producto biogeoquímico de Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) empleado en este estudio. De este producto se extrajeron las series temporales correspondientes a las tres regiones durante el periodo comprendido entre enero de 2022 y diciembre de 2025.

El tratamiento y análisis de la información se realizó con Python 3.x y bibliotecas científicas especializadas. El flujo de trabajo incluyó la organización de las series temporales, el control de calidad, el cálculo de estadísticos descriptivos y la estimación de tendencias lineales.

Para la gestión de datos se utilizaron NumPy, para operaciones numéricas vectorizadas, y Pandas, para la manipulación y estructuración de las series temporales. Se extrajeron los datos diarios correspondientes a las áreas de estudio entre el 1 de enero de 2022 y el 31 de diciembre de 2025. Durante el procesamiento se aplicaron filtros de control de calidad para identificar y excluir valores anómalos que pudieran sesgar la interpretación de los resultados.

Se calcularon tendencias lineales para cada variable mediante regresión de mínimos cuadrados ordinarios, expresando las pendientes en las unidades correspondientes por año (°C/año para SST, m/año para MLD, mg m⁻³/año para Chl-*a*, µatm/año para pCO_{2,sw} y unidades de pH/año para pH). Asimismo, se generaron series temporales diarias con las líneas de tendencia superpuestas para facilitar la comparación entre regiones. Dado que el periodo analizado comprende cuatro años completos, estas pendientes se interpretan como tendencias temporales de la ventana 2022-2025 y no como estimaciones de una tendencia climática de largo plazo.

3. Resultados y discusión

Los resultados muestran patrones diferenciados de variabilidad temporal en las tres regiones analizadas. Las pendientes lineales estimadas para 2022-2025 resumen la evolución observada durante esta ventana temporal y deben interpretarse junto con la marcada estacionalidad y la variabilidad interanual propias de cada contexto

oceanográfico. Las Figs. 2, 3 y 4 muestran la evolución temporal de las cinco variables analizadas (SST, MLD, Chl-a, $pCO_{2,sw}$ y pH) para las Islas Canarias, Cabo Verde y Santo Tomé y Príncipe, respectivamente. En cada caso se representan los valores medios diarios y la tendencia lineal calculada para el periodo 2022-2025.

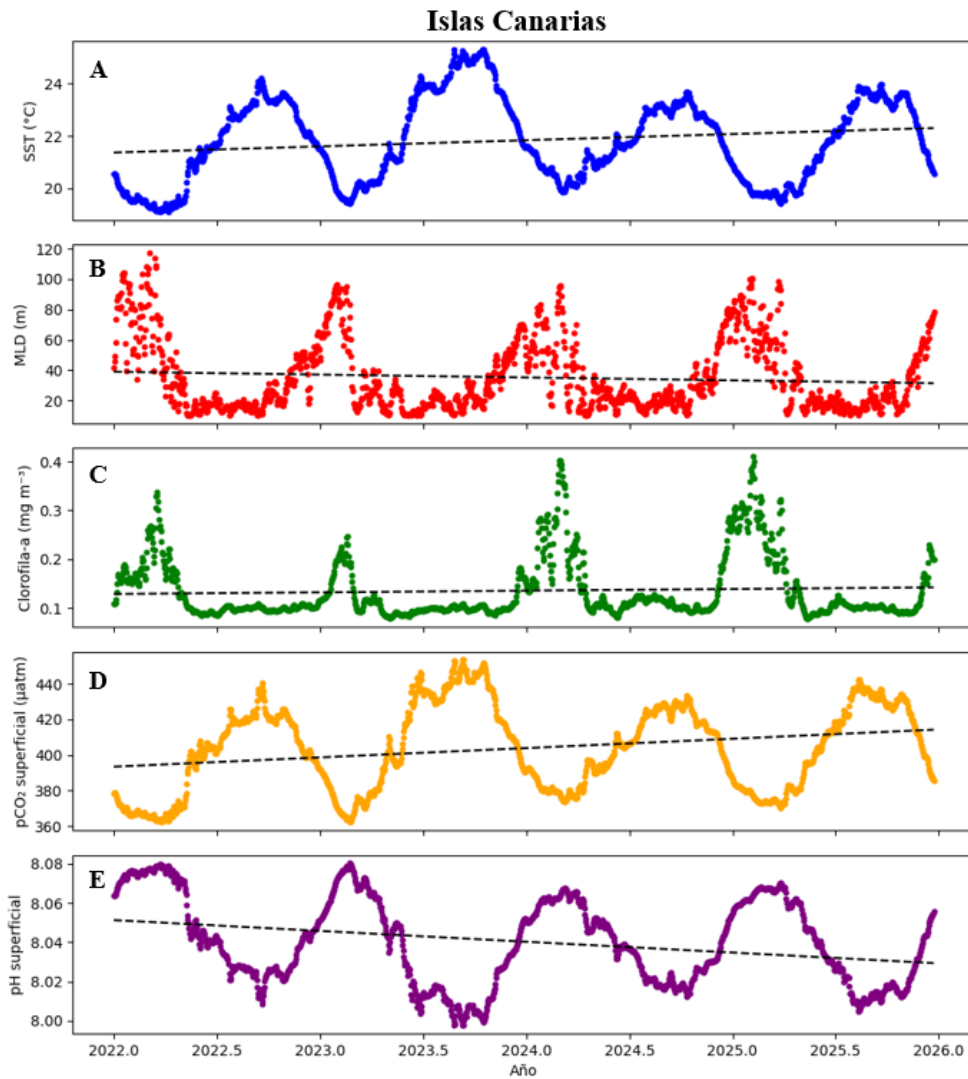


Fig. 2. Serie temporal de las medias diarias en las Islas Canarias durante 2022-2025 de: (a) temperatura superficial del mar (SST), (b) profundidad de la capa de mezcla (m), (c) clorofila-a ($mg\ m^{-3}$), (d) $pCO_{2,sw}$ (μatm) y (e) pH.

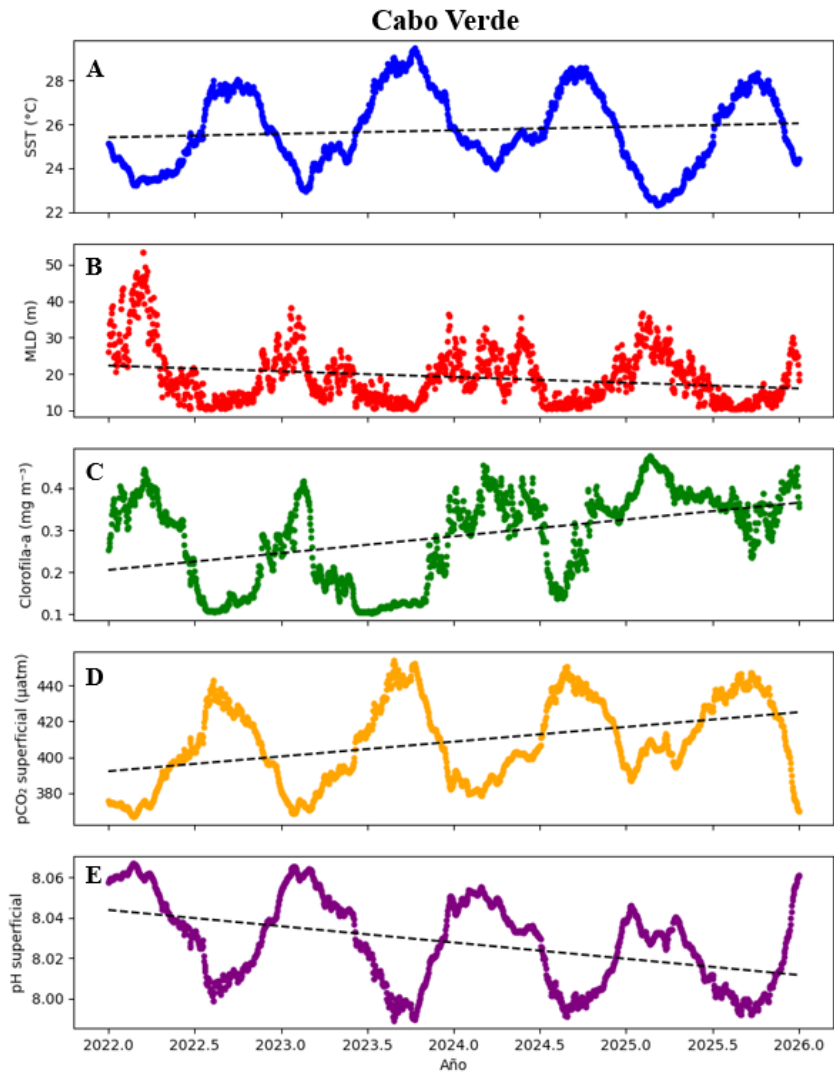


Fig. 3. Serie temporal de las medias diarias en Cabo Verde durante 2022-2025 de: (a) temperatura superficial del mar (SST), (b) profundidad de la capa de mezcla (m), (c) clorofila-a (mg m^{-3}), (d) $\text{pCO}_{2,\text{sw}}$ (μatm) y (e) pH.

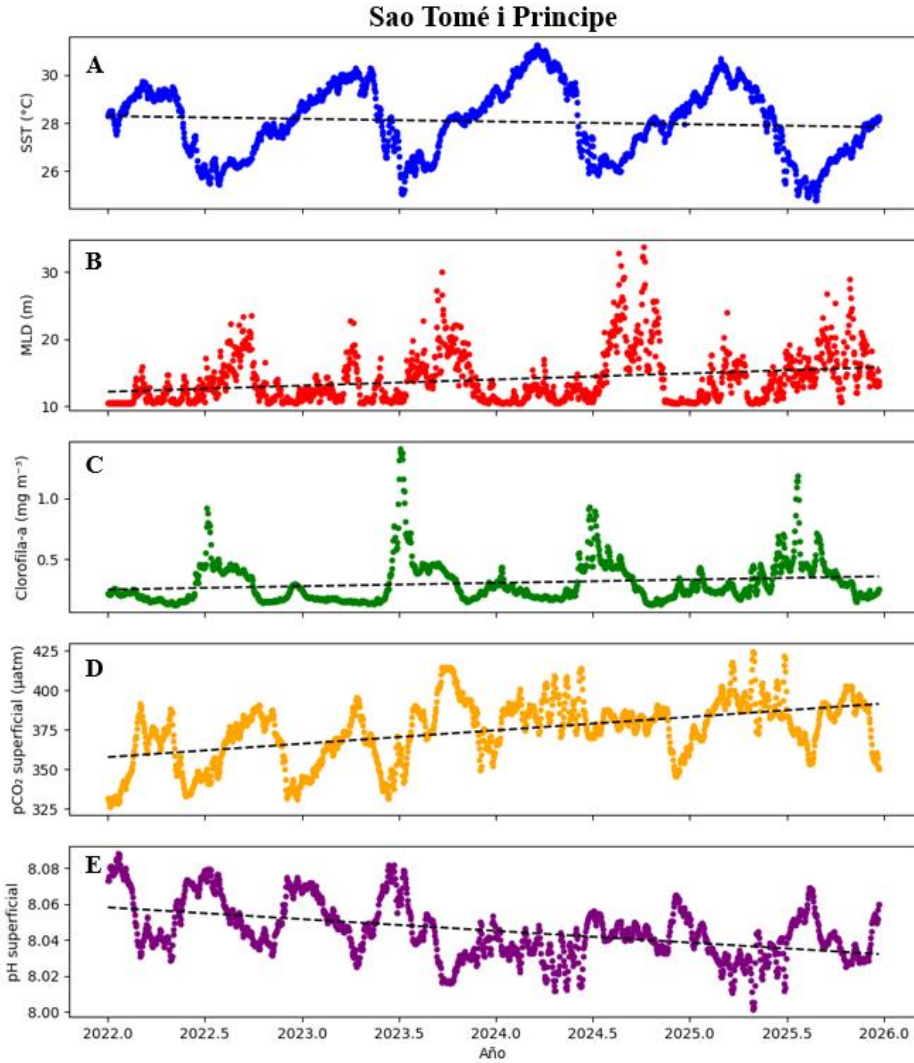


Fig. 4. Serie temporal de las medias diarias en Santo Tomé y Príncipe durante 2022-2025 de: (a) temperatura superficial del mar (SST), (b) profundidad de la capa de mezcla (m), (c) clorofila-a (mg m^{-3}), (d) $\text{pCO}_{2,\text{sw}}$ (μatm) y (e) pH.

La SST muestra comportamientos diferenciados entre las tres regiones. Las Islas Canarias presentan la mayor pendiente positiva del periodo, con $0.238\text{ }^{\circ}\text{C/año}$, seguidas de Cabo Verde, con $0.159\text{ }^{\circ}\text{C/año}$, equivalente a un incremento aproximado de $0.64\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante los cuatro años analizados. En ambas regiones se observa una estacionalidad marcada, aunque con rangos térmicos distintos: en Canarias la SST oscila aproximadamente entre 18 y $26\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que Cabo Verde presenta una temperatura media más elevada, próxima a $25.7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Estas pendientes describen la evolución observada en 2022-2025 y no deben extrapolarse directamente como tasas de calentamiento de largo plazo.

En contraste, Santo Tomé y Príncipe presenta una pendiente negativa de SST ($-0.114\text{ }^{\circ}\text{C/año}$) durante el periodo analizado. Aun así, registra la temperatura media más alta de las tres regiones, en torno a $27.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, y una amplitud estacional menor, coherente con su localización ecuatorial. La evolución observada podría reflejar la influencia combinada de la variabilidad interanual y de cambios en la circulación o en los procesos de surgencia del Golfo de Guinea, por lo que no puede atribuirse de forma directa a una tendencia climática de largo plazo (Cardoso et al., 2025; Kohyama et al., 2018).

Durante 2022-2025, las dos regiones subtropicales presentan pendientes negativas de la profundidad de la MLD: -1.893 m/año en las Islas Canarias y -1.565 m/año en Cabo Verde. En Canarias los valores oscilan aproximadamente entre 15 y 60 m, con capas más profundas en invierno y más someras en verano. La estacionalidad de los vientos alisios y de la estratificación modula la profundidad de la capa de mezcla y condiciona la disponibilidad de nutrientes y la productividad primaria (Aristegui et al., 2009).

Cabo Verde muestra un patrón estacional comparable, con valores aproximados de 10-50 m y capas de mezcla más someras durante los periodos de mayor estratificación. Sus aguas presentan, en general, condiciones oligotróficas, aunque la dinámica regional puede verse modificada estacionalmente por la circulación y por la influencia del sistema de afloramiento de África occidental. Estas variaciones afectan a la estructura de la columna de agua y a la respuesta biológica (Leonelli et al., 2022). Este comportamiento es coherente con el control estacional ejercido por el viento y la estratificación térmica (Pelegrí et al., 2004; González-Dávila et al., 2003).

Santo Tomé y Príncipe es la única región con una pendiente positiva de MLD (0.981 m/año), es decir, con una profundización media de la capa de mezcla durante el periodo analizado. Los valores son, en general, inferiores a los de Canarias y Cabo Verde, con una media próxima a 15 m y un rango aproximado de 10-35 m. La serie presenta una mayor dispersión y episodios de profundización hasta 30-35 m, compatibles con la elevada variabilidad dinámica de las regiones ecuatoriales. La relación concreta con la circulación ecuatorial requeriría análisis adicionales.

La Chl-*a* presenta respuestas diferentes entre regiones. En las Islas Canarias, la pendiente estimada es de $0.003\text{ mg m}^{-3}/\text{año}$, lo que indica una evolución media relativamente estable durante el periodo analizado. La serie muestra picos estacionales recurrentes, con valores que alcanzan aproximadamente $0.4\text{--}0.6\text{ mg m}^{-3}$, y mínimos

inferiores a 0.2 mg m^{-3} . Este patrón es compatible con la influencia estacional de la mezcla y del sistema de afloramiento sobre la disponibilidad de nutrientes y la biomasa fitoplanctónica (Arístegui et al., 2004; Barton et al., 1998). Cabo Verde presenta una pendiente ligeramente superior, de aproximadamente $0.004 \text{ mg m}^{-3}/\text{año}$, con mínimos próximos a $0.1\text{-}0.15 \text{ mg m}^{-3}$ y máximos de $0.4\text{-}0.5 \text{ mg m}^{-3}$. La correspondencia temporal entre algunos máximos de Chl-*a* y periodos de mayor mezcla sugiere un papel relevante del aporte de nutrientes desde aguas subsuperficiales (Zampollo et al., 2023).

Santo Tomé y Príncipe presenta la mayor pendiente de Chl-*a* del estudio, con $0.027 \text{ mg m}^{-3}/\text{año}$, y picos episódicos de hasta 1.5 mg m^{-3} . La variabilidad es menos regular que en Canarias y Cabo Verde, lo que apunta a una mayor influencia de eventos de corta duración y de procesos regionales. La región presenta un carácter ecuatorial y está sometida a una interacción compleja entre la Corriente de Guinea, la Contracorriente Ecuatorial y otros procesos de circulación regional. Asimismo, recibe aportes continentales procedentes de sistemas fluviales africanos, que pueden contribuir a la variabilidad de la salinidad y de los nutrientes en las aguas superficiales (Okafor, 2025). Dado que la Chl-*a* es un indicador de biomasa fitoplanctónica, estos cambios no deben interpretarse directamente como una medida de productividad primaria sin información adicional.

En las variables del sistema del carbono también se observan cambios durante el periodo de estudio. Las Islas Canarias muestran un incremento de $\text{pCO}_{2,\text{sw}}$ de $5.239 \text{ } \mu\text{atm}/\text{año}$. Los valores medios oscilan aproximadamente entre 360 y $440 \text{ } \mu\text{atm}$, con una señal estacional caracterizada, en general, por valores menores en invierno y mayores en verano. Este patrón puede reflejar la combinación de efectos térmicos y biológicos y es compatible con la variabilidad estacional previamente descrita para la región (González-Dávila et al., 2010).

Cabo Verde muestra una pendiente de $\text{pCO}_{2,\text{sw}}$ de $8.246 \text{ } \mu\text{atm}/\text{año}$, con valores aproximados entre 360 y $450 \text{ } \mu\text{atm}$. La serie presenta una variabilidad estacional clara, con mínimos que coinciden en varios periodos con una mayor señal de Chl-*a* y máximos durante fases de mayor temperatura superficial. La tendencia creciente observada es coherente con cambios del sistema del carbono, aunque la $\text{pCO}_{2,\text{sw}}$ por sí sola no permite determinar el signo ni la magnitud del flujo neto de CO_2 entre el océano y la atmósfera.

Santo Tomé y Príncipe presenta la mayor pendiente de $pCO_{2,sw}$ del estudio, con un incremento de $8.475 \mu atm/año$, ligeramente superior al de Cabo Verde. Los valores oscilan aproximadamente entre 325 y 425 μatm . La elevada variabilidad temporal aconseja interpretar esta pendiente dentro del contexto de la corta duración de la serie y de la dinámica ecuatorial regional.

En cuanto al pH, las tendencias son negativas en las tres regiones de estudio. Las Islas Canarias muestran una disminución de -0.0055 unidades de pH/año, Cabo Verde de -0.008 unidades de pH/año y Santo Tomé y Príncipe una disminución de -0.065 unidades de pH/año. Las series muestran una señal estacional, con valores generalmente más altos en invierno y más bajos en verano. La disminución observada es compatible con procesos de acidificación oceánica descritos en el Atlántico (Santana-Casiano et al., 2007; González-Dávila et al., 2010; González-Dávila & Santana-Casiano, 2023), aunque las magnitudes obtenidas para 2022-2025 deben interpretarse con cautela por la limitada longitud temporal de las series.

En conjunto, el periodo 2022-2025 muestra cambios temporales relevantes en las variables oceánicas de las Islas Canarias, Cabo Verde y Santo Tomé y Príncipe. Entre los patrones observados destacan las pendientes positivas de SST en Canarias y Cabo Verde, el aumento de $pCO_{2,sw}$ en las tres regiones y las pendientes negativas de pH. La dirección de varios de estos cambios es coherente con procesos documentados en estudios de mayor duración en el Atlántico (Bates et al., 2020). No obstante, las diferencias regionales ponen de manifiesto que la respuesta oceánica depende también de la circulación, la estratificación, la mezcla y la dinámica biológica local.

La duración de cuatro años limita la capacidad para separar la variabilidad estacional e interanual de una señal climática de largo plazo. Por ello, las pendientes calculadas deben entenderse como descriptores de la evolución observada durante la ventana 2022-2025. La consolidación de series temporales más largas, junto con análisis de incertidumbre y métodos que tengan en cuenta la variabilidad natural, permitirá evaluar con mayor robustez la magnitud y persistencia de los cambios detectados.

4. Conclusiones

El análisis conjunto de SST, MLD, Chl-*a*, $pCO_{2,sw}$ y pH durante 2022-2025 evidencia respuestas diferenciadas entre las Islas Canarias, Cabo Verde y Santo Tomé y

Príncipe. Canarias y Cabo Verde presentan pendientes positivas de SST y una somerización de la capa de mezcla, mientras que Santo Tomé y Príncipe muestra un comportamiento distinto, con pendiente negativa de SST y profundización de la MLD. La Chl-*a* presenta una marcada componente regional y estacional, y las variables del sistema del carbono muestran cambios que justifican mantener un seguimiento específico y continuado.

El periodo de cuatro años es suficiente para describir la variabilidad reciente y detectar cambios dentro de la ventana analizada, pero no para atribuir por sí solo esas pendientes al cambio climático antropogénico ni para estimar tasas climáticas de largo plazo. La variabilidad interanual, los procesos locales, el promediado espacial y las incertidumbres asociadas a las distintas fuentes de datos deben formar parte de la interpretación. La extensión de las series a escalas temporales más largas será esencial para determinar la persistencia de las señales observadas y mejorar la evaluación de la vulnerabilidad oceánica regional.

Desde una perspectiva de gestión pública, los resultados respaldan la conveniencia de consolidar un sistema regional de observación con indicadores armonizados y metodologías comparables entre territorios. La continuidad del seguimiento de la temperatura, la estructura de la capa de mezcla, la biomasa fitoplanctónica y el sistema del carbono puede aportar información útil para la planificación de la adaptación, la gestión de ecosistemas marinos y costeros y la priorización de medidas de resiliencia en el marco de PLANCLIMAC2 e Interreg MAC.

Referencias

- Aristegui, J., Barton, E. D., Álvarez-Salgado, X. A., Santos, A. M. P., Figueiras, F. G., Kifani, S., Hernández-León, S., Mason, E., Machú, E., & Demarcq, H. (2009). Sub-regional ecosystem variability in the Canary Current upwelling. *Progress In Oceanography*, 83(1-4), 33-48. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.031>
- Aristegui, J., Barton, E. D., Tett, P., Montero, M. F., García-Muñoz, M., Basterretxea, G., Cussatlegras, A., Ojeda, A., & De Armas, D. (2004). Variability in plankton community structure, metabolism, and vertical carbon fluxes along an upwelling filament (Cape Juby, NW Africa). *Progress In Oceanography*, 62(2-4), 95-113. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2004.07.004>

- Bai, Y., Cai, W.-J., He, X., Zhai, W., Pan, D., Dai, M., and Yu, P.: A mechanistic semi- analytical method for remotely sensing sea surface pCO₂ in river-dominated coastal oceans: A case study from the East China Sea, *J. Geophys. Res. Ocean.*, 120, 2331-2349, <https://doi.org/10.1002/2014JC010632>, 2015.
- Bakker, D. C. E., Pfeil, B., Smith, K., Hankin, S., Olsen, A., Alin, S. R., Cosca, C., Harasawa, S., Kozyr, A., Nojiri, Y., O'Brien, K. M., Schuster, U., Telszewski, M., Tilbrook, B., Wada, C., Akl, J., Barbero, L., Bates, N. R., Boutin, J., . . . Watson, A. J. (2014b). An update to the Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT version 2). *Earth System Science Data*, 6(1), 69-90. <https://doi.org/10.5194/essd-6-69-2014>
- Barton, E., Aristegui, J., Tett, P., Cantón, M., García-Braun, J., Hernández-León, S., Nykjaer, L., Almeida, C., Almunia, J., Ballesteros, S., Basterretxea, G., Escánez, J., García-Weill, L., Hernández-Guerra, A., López-Laatzén, F., Molina, R., Montero, M., Navarro-Pérez, E., Rodríguez, J., . . . Wild, K. (1998). The transition zone of the Canary Current upwelling region. *Progress In Oceanography*, 41(4), 455-504. [https://doi.org/10.1016/s0079-6611\(98\)00023-8](https://doi.org/10.1016/s0079-6611(98)00023-8)
- Bates, N. R., Bates, N. R., & Johnson, R. J. (2020). Acceleration of ocean warming, salinification, deoxygenation and acidification in the surface subtropical North Atlantic Ocean. *Nature Communications*, 11(1), 33. <https://doi.org/10.1038/S43247-020-00030-5>
- Caldeira, K., & Wickett, M. E. (2003). Anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature*, 425(6956), 365-365.
- Cardoso, I. C. A. (2022). *Space-Time Variability of the Eastern Tropical Atlantic Ocean Circulation and Its Relationship with Climate Indices* (Master's thesis, Universidade do Porto (Portugal)).
- Chen, S., Hu, C., Barnes, B.B., Wanninkhof, R., Cai, W.J., Barbero, L., and Pierrot, D.: A machine learning approach to estimate surface ocean pCO₂ from satellite measurements, *Remote Sens. Environ.*, 228, 203–226, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.04.019>, 2019.
- Chou, S. C., De Arruda Lyra, A., Gomes, J. L., Rodriguez, D. A., Martins, M. A., Resende, N. C., Da Silva Tavares, P., Dereczynski, C. P., Pilotto, I. L., Martins, A. M., De Carvalho, L. F. A., Onofre, J. L. L., Major, I., Penhor, M., & Santana, A. (2020). Downscaling projections of climate change in Sao Tome and Principe Islands, Africa. *Climate Dynamics*, 54(9-10), 4021-4042. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05212-7>

- Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., & Kleypas, J. A. (2008). Ocean acidification: the other CO₂ problem. *Annual Review Of Marine Science*, 1(1), 169-192. <https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163834>
- Fassbender, A. J., Schlunegger, S., Rodgers, K. B., & Dunne, J. P. (2022). Quantifying the role of seasonality in the marine carbon cycle feedback: An ESM2M case study. *Global Biogeochemical Cycles*, 36(6), e2021GB007018.
- Fennel, K., Wilkin, J., Previdi, M., and Najjar, R.: Denitrification effects on air-sea CO₂ flux in the coastal ocean: Simulations for the northwest North Atlantic, *Geophys. Res. Lett.*, 35, <https://doi.org/10.1029/2008GL036147>, 2008.
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Landschützer, P., Le Quéré, C., Li, H., Luijkx, I. T., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Arneeth, A., Arora, V., Bates, N. R., Becker, M., Bellouin, N., Berghoff, C. F., Bittig, H. C., Bopp, L., Cadule, P., Campbell, K., Chamberlain, M. A., Chandra, N., Chevallier, F., Chini, L. P., Colligan, T., Decayeux, J., Djeutchouang, L. M., Dou, X., Duran Rojas, C., Enyo, K., Evans, W., Fay, A. R., Feely, R. A., Ford, D. J., Foster, A., Gasser, T., Gehlen, M., Gkritzalis, T., Grassi, G., Gregor, L., Gruber, N., Gürses, Ö., Harris, I., Hefner, M., Heinke, J., Hurtt, G. C., Iida, Y., Ilyina, T., Jacobson, A. R., Jain, A. K., Jarníková, T., Jersild, A., Jiang, F., Jin, Z., Kato, E., Keeling, R. F., Klein Goldewijk, K., Knauer, J., Korsbakken, J. I., Lan, X., Lauvset, S. K., Lefèvre, N., Liu, Z., Liu, J., Ma, L., Maksyutov, S., Marland, G., Mayot, N., McGuire, P. C., Metzl, N., Monacchi, N. M., Morgan, E. J., Nakaoka, S.-I., Neill, C., Niwa, Y., Nützel, T., Olivier, L., Ono, T., Palmer, P. I., Pierrot, D., Qin, Z., Resplandy, L., Roobaert, A., Rosan, T. M., Rödenbeck, C., Schwinger, J., Smallman, T. L., Smith, S. M., Sospedra-Alfonso, R., Steinhoff, T., Sun, Q., Sutton, A. J., Séférian, R., Takao, S., Tatebe, H., Tian, H., Tilbrook, B., Torres, O., Tourigny, E., Tsujino, H., Tubiello, F., van der Werf, G., Wanninkhof, R., Wang, X., Yang, D., Yang, X., Yu, Z., Yuan, W., Yue, X., Zaehle, S., Zeng, N., and Zeng, J.: Global Carbon Budget 2024, *Earth Syst. Sci. Data*, 17, 965–1039, <https://doi.org/10.5194/essd-17-965-2025>, 2025.
- Gaurisas, D. Y., De Jonge, D. S., Sweetman, A. K., & Bernardino, A. F. (2024). Effects of increased temperature and altered POC composition on a bathyal macrofaunal community in Cabo Verde, NE Atlantic. *Progress In Oceanography*, 229, 103352. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2024.103352>
- González, A. G., Aldrich-Rodríguez, A., González-Santana, D., González-Dávila, M., & Santana-Casiano, J. M. (2024). Seasonal variability of coastal pH and CO₂ using an oceanographic

- buoy in the Canary Islands. *Frontiers In Marine Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1337929>
- González-Dávila, M., & Santana-Casiano, J. M. (2023). Long-term trends of pH and inorganic carbon in the Eastern North Atlantic: the ESTOC site. *Frontiers In Marine Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1236214>
- González-Dávila, M., Santana-Casiano, J. M., Rueda, M. J., & Llinás, O. (2010). The water column distribution of carbonate system variables at the ESTOC site from 1995 to 2004. *Biogeosciences*, 7(10), 3067-3081. <https://doi.org/10.5194/bg-7-3067-2010>
- González-Dávila, M., Santana-Casiano, J. M., Rueda, M., Llinás, O., & González-Dávila, E. (2003). Seasonal and interannual variability of sea-surface carbon dioxide species at the European Station for Time Series in the Ocean at the Canary Islands (ESTOC) between 1996 and 2000. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(3). <https://doi.org/10.1029/2002gb001993>
- Gruber, N., Keeling, C. D., & Bates, N. R. (2002). Interannual Variability in the North Atlantic Ocean Carbon Sink. *Science*, 298(5602), 2374-2378. <https://doi.org/10.1126/science.1077077>
- Ikawa, H., Falloona, I., Kochendorfer, J., Paw U, K. T., and Oechel, W. C.: Air–sea exchange of CO₂ at a Northern California coastal site along the California Current upwelling system, *Biogeosciences*, 10, 4419–4432, <https://doi.org/10.5194/bg-10-4419-2013>, 2013.
- Knoll, M., Hernández-Guerra, A., Lenz, B., Laatzen, F. L., Machín, F., Müller, T., & Siedler, G. (2002). The Eastern Boundary Current system between the Canary Islands and the African Coast. *Deep Sea Research Part II Topical Studies In Oceanography*, 49(17), 3427-3440. [https://doi.org/10.1016/s0967-0645\(02\)00105-4](https://doi.org/10.1016/s0967-0645(02)00105-4)
- Kohyama, T., Hartmann, D. L., & Battisti, D. S. (2018). Weakening of Nonlinear ENSO Under Global Warming. *Geophysical Research Letters*, 45(16), 8557-8567. <https://doi.org/10.1029/2018gl079085>
- Leonelli, F. E., Bellacicco, M., Pitarch, J., Organelli, E., Nardelli, B. B., De Toma, V., Cammarota, C., Marullo, S., & Santoleri, R. (2022). Ultra-Oligotrophic Waters Expansion in the North Atlantic Subtropical Gyre Revealed by 21 Years of Satellite Observations. *Geophysical Research Letters*, 49(21). <https://doi.org/10.1029/2021gl096965>

- Mayer, D. A., and Weisberg, R. H. (1993). A description of COADS surface meteorological fields and the implied sverdrup transports for the Atlantic ocean from 30°S to 60°N. *J. Phys. Oceanogr.* 23, 2201–2221. doi: 10.1175/1520-0485(1993)023
- McSweeney C, Lizcano G, New M, Lu X. 2010. The UNDP climate change country profiles. *Bulletins of the American Meteorological Society* 91: 157–166. DOI: 10.1175/2009BAMS2826.1
- Okafor, G. C. (2025). Temporal trends of ocean acidification in the gulf of guinea and the potential impact on socio economic development. *International Journal Of Maritime And Interdisciplinary Reasearch (Ijmir)*, 7(3), 258-276.
- Olsen, A., Key, R. M., Van Heuven, S., Lauvset, S. K., Velo, A., Lin, X., ... & Suzuki, T. (2016). The Global Ocean Data Analysis Project version 2 (GLODAPv2)—an internally consistent data product for the world ocean. *Earth System Science Data*, 8(2), 297-323.
- Pelegrí, J., Arístegui, J., Cana, L., González-Dávila, M., Hernández-Guerra, A., Hernández-León, S., Marrero-Díaz, A., Montero, M., Sangrà, P., & Santana-Casiano, M. (2004). Coupling between the open ocean and the coastal upwelling region off northwest Africa: water recirculation and offshore pumping of organic matter. *Journal Of Marine Systems*, 54(1-4), 3-37. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2004.07.003>
- Santana-Casiano, J. M., González-Dávila, M., Rueda, M., Llinás, O., & González-Dávila, E. (2007). The interannual variability of oceanic CO₂ parameters in the northeast Atlantic subtropical gyre at the ESTOC site. *Global Biogeochemical Cycles*, 21(1). <https://doi.org/10.1029/2006gb002788>
- Senapati, B., O'Reilly, C. H., & Robson, J. (2024). Pivotal Role of Mixed-Layer Depth in Tropical Atlantic Multidecadal Variability. *Geophysical Research Letters*, 51(15). <https://doi.org/10.1029/2024gl110057>
- Service, E. U. M. (2016). Global Ocean 1/12° Physics Analysis and Forecast updated Daily [Conjunto de datos]. En *Mercator Ocean International*. <https://doi.org/10.48670/moi-00016>
- Service, E. U. M. (2019). Global Ocean Biogeochemistry Analysis and Forecast [Conjunto de datos]. En *Mercator Ocean International*. <https://doi.org/10.48670/moi-00015>
- Stramma, L., and Schott, F. (1999). The mean flow field of the tropical Atlantic ocean. *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 46, 279–303. doi: 10.1016/S0967-0645(98) 00109-X

- Takahashi, T., Olafsson, J., Goddard, J. G., Chipman, D. W., & Sutherland, S. C. (1993). Seasonal variation of CO₂ and nutrients in the high-latitude surface oceans: A comparative study. *Global Biogeochemical Cycles*, 7(4), 843-878.
- Takahashi, T., Sutherland, S. C., Sweeney, C., Poisson, A., Metzl, N., Tilbrook, B., ... & Nojiri, Y. (2002). Global sea-air CO₂ flux based on climatological surface ocean pCO₂, and seasonal biological and temperature effects. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49(9-10), 1601-1622.
- Takahashi, T., Sutherland, S. C., Wanninkhof, R. H., Sweeney, C., Feely, R. A., Chipman, D. W., Hales, B., Friederich, G., Chavez, F. P., Sabine, C. L., Watson, A. J., Bakker, D. C. E., Schuster, U., Metzl, N., Yoshikawa-Inoue, H., Ishii, M., Midorikawa, T., Nojiri, Y., Körtzinger, A., Steinhoff, T., Hoppema, M., Olafsson, J., Arnarson, T. S., Tilbrook, B., Johannessen, T., Olsen, A., Bellerby, R., Wong, C. S., Delille, B., Bates, N. R., and de Baar, H. J. W.: (2009b). Corrigendum to «Climatological mean and decadal change Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO₂, and net sea-air CO₂ flux over the global oceans, Deep. Res. II, 56, 554–577, <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.12.009>, 2009.
- Traon, P. y. L., Reppucci, A., Fanjul, E. A., Aouf, L., Behrens, A., Belmonte, M., Bentamy, A., Bertino, L., Brando, V. E., Kreiner, M. B., Benkiran, M., Carval, T., Ciliberti, S. A., Claustre, H., Clementi, E., Coppini, G., Cossarini, G., De Alfonso Alonso-Muñoyerro, M., Delamarche, A., . . . Zacharioudaki, A. (2019b). From Observation to Information and Users: The Copernicus Marine Service Perspective. *Frontiers In Marine Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00234>
- Von Schuckmann, K., Minière, A., Gues, F., Cuesta-Valero, F. J., Kirchengast, G., Adusumilli, S., Straneo, F., Ablain, M., Allan, R. P., Barker, P. M., Beltrami, H., Blazquez, A., Boyer, T., Cheng, L., Church, J., Desbruyeres, D., Dolman, H., Domingues, C. M., García-García, A., . . . Zemp, M. (2023). Heat stored in the Earth system 1960–2020: where does the energy go? *Earth System Science Data*, 15(4), 1675-1709. <https://doi.org/10.5194/essd-15-1675-2023>
- Weiss, R.F.: The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater, *Deep Sea Res. Oceanogr. Abstr.*, 17, 721–735, [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(70\)90037-9](https://doi.org/10.1016/0011-7471(70)90037-9), 1970.
- Zampollo, A., Cornulier, T., Murray, R. O., Tweddle, J. F., Dunning, J., & Scott, B. E. (2023b). The bottom mixed layer depth as an indicator of subsurface Chlorophyll a distribution. *Biogeosciences*, 20(16), 3593-3611. <https://doi.org/10.5194/bg-20-3593-2023>