

PROGRAMA DE MONITOREO DE ARRECIFES ROCOSOS

CAMPAÑA 2024-2025





PREPARADO POR:

Eduardo León Solórzano

Centro para la Biodiversidad Marina y la Conservación A.C.

Fabio Favoretto

Marine Station, School of Biological & Marine Sciences
University of Plymouth

Octavio Aburto Oropeza

Scripps Institution of Oceanography

Catalina López-Sagástegui

Marine Research and Science Literacy Program
Institute of the Americas



DISEÑO
dataMares

COMO CITAR:

León Solórzano, E., F. Favoretto, O. Aburto-Oropeza. (2026). Programa de Monitoreo de Arrecifes Rocosos: Campaña 2024-2025. Reporte Técnico. Gulf of California Marine Program. 22 pp.

MARZO 2026

Este informe es un resumen de las actividades de investigación relacionadas con el programa de monitoreo ecológico de arrecifes rocosos coordinado por el Programa Marino del Golfo de California. Todos los datos están disponibles previa solicitud mediante dataMares o contactando a Catalina López-Sagástegui (clopez@iamericas.org).





RESUMEN EJECUTIVO

El monitoreo ecológico de largo plazo en el Golfo de California muestra cambios estructurales acelerados en los ecosistemas de arrecifes rocosos, asociados principalmente con el calentamiento del océano y la degradación del hábitat. El análisis de la serie temporal 1998–2025 confirma variaciones regionales persistentes en la condición de los ecosistemas: Loreto y El Corredor presentan la mayor biomasa de peces y riqueza de especies, mientras que Santa Rosalía y San Basilio se mantienen en niveles bajos. La presencia de depredadores tope distingue a los arrecifes con alta integridad ecológica, particularmente dentro de áreas totalmente protegidas como Cabo Pulmo. En contraste, varias regiones exhiben truncamiento trófico indicativo de una presión pesquera crónica.

Los registros de temperatura superficial del mar indican una tendencia persistente al calentamiento y un aumento en la frecuencia de las olas de calor marinas desde 2014. Las pruebas de hipótesis mediante métodos de inteligencia artificial identificaron una relación negativa sólida entre la temperatura y la diversidad de peces, mostrando que los arrecifes perdieron aproximadamente 1.2 especies por cada aumento de 1 °C en la temperatura superficial del mar. Los bosques de sargazo han disminuido de manera significativa durante las últimas tres décadas, con una reducción de casi 30% en la biomasa media y múltiples sitios con pérdida total del hábitat. La biomasa de la cabrilla sardinera disminuyó 79% en sitios con sargazo, un resultado consistente con las predicciones de modelos de reclutamiento impulsado por el clima y corroborado con evidencia de la falla en el reclutamiento. Estos datos indican que la degradación del hábitat impulsada por el cambio climático es un factor principal de cambio ecológico en los ecosistemas arrecifales del Golfo de California, con impactos comparables a los de la presión pesquera.





INTRODUCCIÓN

El programa de Monitoreo Ecológico de Largo Plazo (LTEM, por sus siglas en inglés) ha documentado las condiciones ecológicas de los ecosistemas costeros del Golfo de California (GC) desde 1998. Este esfuerzo colaborativo ha integrado a un equipo internacional de científicos y estudiantes para monitorear comunidades de arrecifes rocosos y hábitats asociados y, a lo largo de 27 años consecutivos, ha generado un amplio conjunto de datos ecológicos para la región. Estos datos establecen una base para comprender la variabilidad natural, detectar cambios ecológicos de largo plazo y evaluar los efectos relativos de las presiones locales y las tendencias climáticas regionales.

Los arrecifes rocosos del GC albergan diversos ensamblajes de peces, invertebrados y macroalgas que sostienen procesos ecológicos y pesquerías regionales. El monitoreo de estos ecosistemas facilita la evaluación del estado de los ecosistemas mediante indicadores como la riqueza de especies, la biomasa y la estructura trófica. Estas métricas aportan información complementaria sobre la biodiversidad, la composición de las comunidades y el funcionamiento de los ecosistemas, lo que permite realizar comparaciones en distintas escalas espaciales y temporales.

En años recientes, el programa LTEM ha ampliado su alcance para incluir hábitats críticos para las redes tróficas costeras. El sargazo forma bosques estacionales densos sobre arrecifes rocosos someros, proporcionando zonas esenciales de crianza y alimentación para muchas especies asociadas a los arrecifes. Estudios realizados en la década de 1990 documentaron extensos mantos de sargazo en las región central y sur del Golfo de California. Visitar estos sitios de nuevo permite comparaciones directas a lo largo de más de dos décadas, proporcionando los datos necesarios para evaluar cambios de largo plazo en la extensión del hábitat y su biomasa.

Las condiciones ambientales en el GoC están cambiando rápidamente. Los registros de la temperatura superficial del mar muestran una clara tendencia al calentamiento, acompañada de olas de calor marinas frecuentes e intensas. Estas anomalías térmicas alteran la distribución de las especies, las interacciones tróficas y la estabilidad de los ecosistemas, y se han convertido en factores importantes impulsando el cambio ecológico regional. Comprender las respuestas biológicas a estos cambios ambientales requiere del monitoreo consistente en múltiples hábitats y escalas temporales.

La expedición del LTEM 2025 se llevó a cabo entre abril y mayo en cinco regiones del GC, y evaluó arrecifes rocosos, mantos de rodolitos y bosques de sargazo mediante métodos de campo estandarizados para asegurar la comparabilidad con estudios previos. Después de la expedición de sargazo, monitoreamos arrecifes durante octubre y noviembre como parte de nuestro monitoreo histórico anual. Las evaluaciones de peces, invertebrados y comunidades bentónicas proporcionaron una visión integrada de las condiciones de los ecosistemas en distintos hábitats. Al combinar datos del monitoreo de largo plazo con comparaciones históricas y nuevos enfoques analíticos, este informe evalúa el estado actual de los ecosistemas e identifica patrones emergentes de cambio ecológico.

El programa del LTEM proporciona evidencia científica necesaria para evaluar acciones de conservación, interpretar los efectos de la variabilidad climática y apoyar el manejo basado en ecosistemas. A medida que las condiciones ambientales continúan cambiando, el monitoreo se vuelve fundamental para comprender y proteger los ecosistemas costeros que sostienen a la biodiversidad y el bienestar regional.





RESUMEN DE LA EXPEDICIÓN 2025

La expedición de 2025 se llevó a cabo del 19 de abril al 7 de mayo a bordo del M/V Storm, una embarcación de 48 pies de eslora con capacidad para 12 pasajeros y 4 tripulantes. Este esfuerzo de monitoreo cubrió aproximadamente 1,000 km a lo largo de 18 días en cinco regiones: La Paz, El Corredor, Loreto, San Basilio y Santa Rosalía (Figura 1). Aunque la ruta fue más corta que la de la expedición de 2023 (~1,600 km en 30 días), incorporó una mayor diversidad de hábitats.

Históricamente, el LTEM se ha enfocado en arrecifes rocosos (Aburto-Oropeza et al., 2007); sin embargo, esta campaña revisó sitios con hábitats críticos, como los mantos de sargazo muestreados originalmente en 1998 y 1999. Este muestreo permitió realizar comparaciones temporales sobre el estado actual de los hábitats a lo largo de 26 años.

La expedición incluyó sitios de monitoreo en 32 arrecifes rocosos, 6 mantos de rodolitos y 13 bosques de sargazo, donde se evaluaron peces, invertebrados y la cobertura algal.

Las localidades evaluadas incluyeron dos áreas naturales protegidas: el Parque Nacional Zona Marina del Archipiélago de Espíritu Santo (PNZMAES) y el Parque Nacional Bahía de Loreto (PNBL). Además de evaluar la salud de los arrecifes rocosos en el pico de la productividad invernal, el equipo científico examinó la condición ecológica, biomasa, extensión y comunidades asociadas de los mantos de sargazo.





REGIONES Y SITIOS DE MONITOREO DE ARRECIFES ROCOSOS

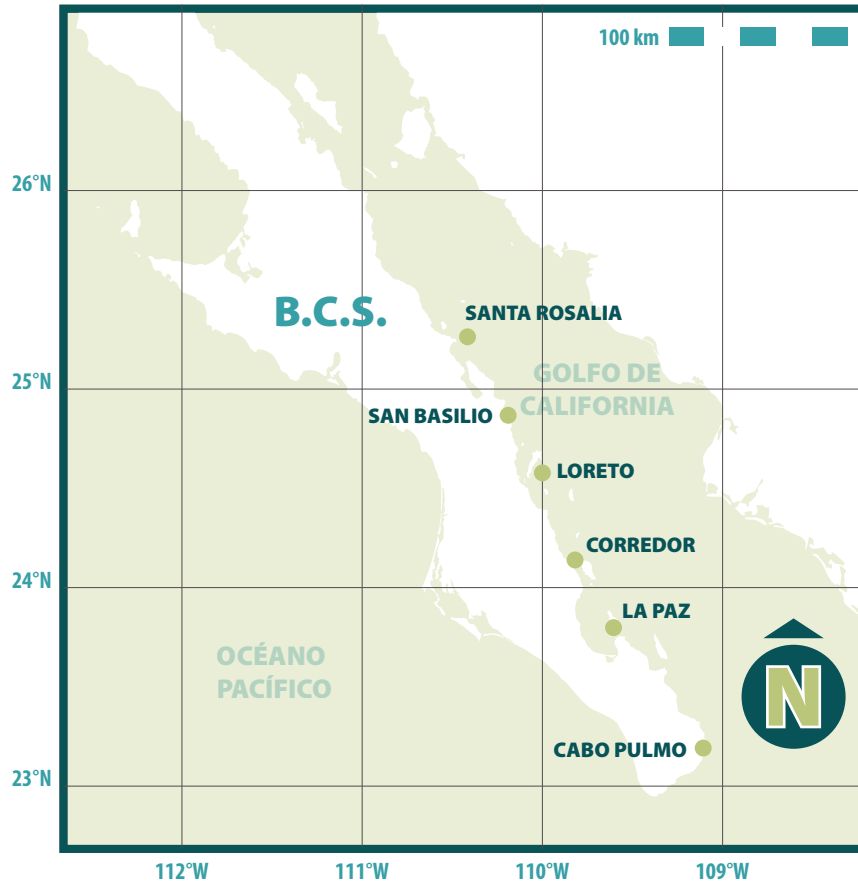


Figura 1. Regiones y sitios de monitoreo de arrecifes rocosos visitados durante la Campaña de Primavera-Otoño 2025.



NÚMERO DE ARRECIFES ROCOSOS
47



NÚMERO DE TRANSECTOS
561



INVERTEBRADOS
289



PECES
272



AREA TOTAL MONITOREADA
2,750 m²



TIEMPO TOTAL BAJO EL AGUA
140 HORAS/CIENTÍFICO



PUNTOS CONTACTO
23,247



ESPECIES DE INVERTEBRADOS
42



NÚMERO DE ESPECIES IDENTIFICADAS
217



INVERTEBRADOS
95



PECES
122



NÚMERO DE ORGANISMOS CONTADOS Y MEDIDOS
147,603



INVERTEBRADOS
20,646



PECES
126,957





NUEVAS COLABORACIONES Y FORTALECIMIENTO DE CAPACIDADES

En 2025, el equipo científico creció mediante nuevas colaboraciones con cuatro grupos académicos de destacadas instituciones de investigación marina en México: el Laboratorio de Botánica Marina de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), el Laboratorio de Plancton y Ecología Marina del Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR), el Laboratorio de Bioingeniería en Ciencias Ambientales de la Universidad Autónoma de Baja California Sur (UABCS) y el Laboratorio de Botánica Marina del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR).

En 2025, el equipo de investigación estuvo integrado por 15 científicos, incluidos dos estudiantes de doctorado y dos de maestría. Estos cuatro estudiantes utilizarán los datos generados durante la expedición y los conjuntos de datos recopilados a lo largo del programa en sus respectivas investigaciones. Además, adquirieron experiencia práctica en operaciones de campo y análisis de datos bajo la guía de investigadores expertos.

SALUD DEL ECOSISTEMA DE ARRECIFES ROCOSOS

La riqueza de especies, la biomasa y la biomasa relativa se utilizan como métricas complementarias para evaluar la condición ecológica de los arrecifes rocosos en 2025. La riqueza refleja el número total de especies registradas por región y funciona como un indicador directo de la diversidad taxonómica (Figura 2). En la campaña de 2025, las regiones centrales (Loreto y Corredor) presentaron los valores más altos de riqueza, seguidas por La Paz, mientras que Santa Rosalía y San Basilio mostraron los valores más bajos. Dado que la diversidad por sí sola no describe por completo el estado del ecosistema, se incorporaron métricas de funcionalidad de las comunidades de peces.

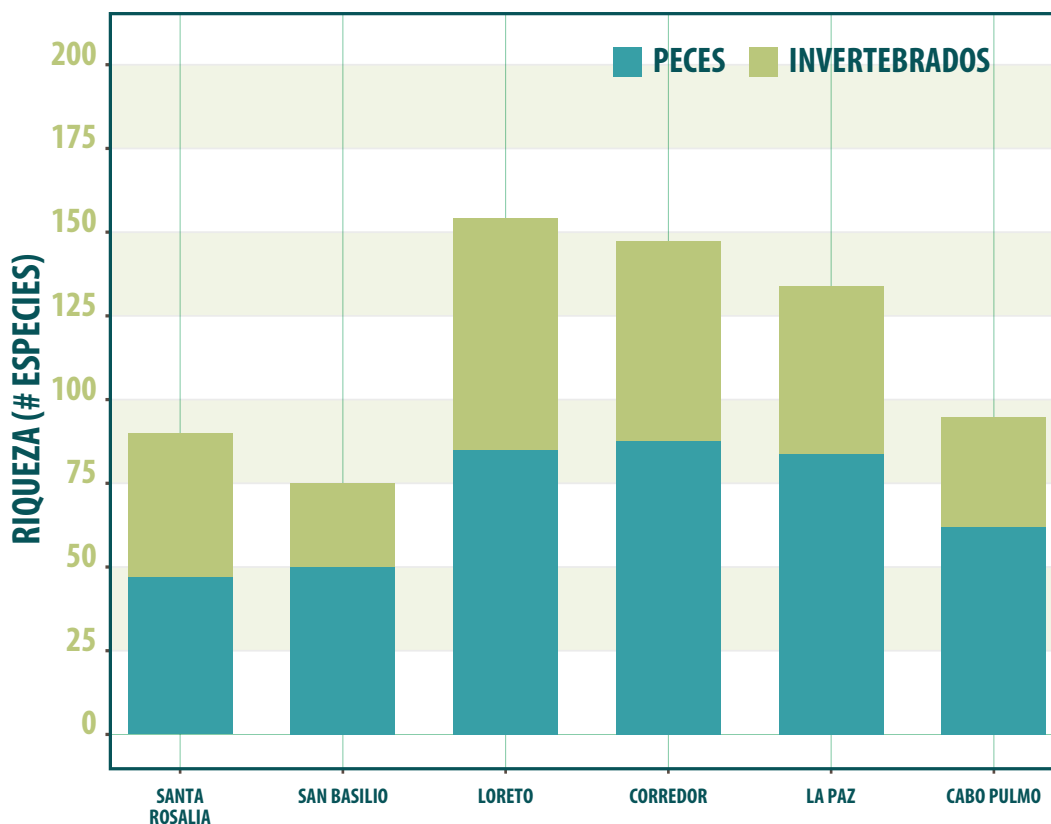


Figura 2. Riqueza de especies de peces e invertebrados observada durante la campaña de monitoreo de Primavera-Otoño 2025.





La biomasa (ton/ha) integra la abundancia y el tamaño corporal, proporcionando una estimación de la biomasa total de peces (Figura 3). En 2025, Loreto, El Corredor y La Paz registraron los valores más altos de biomasa, mientras que Santa Rosalía presentó los más bajos. Valores altos de riqueza y biomasa sugieren comunidades estructuralmente complejas y potencialmente más resilientes; sin embargo, la distribución de la biomasa entre los grupos tróficos es fundamental para interpretar el funcionamiento del ecosistema.

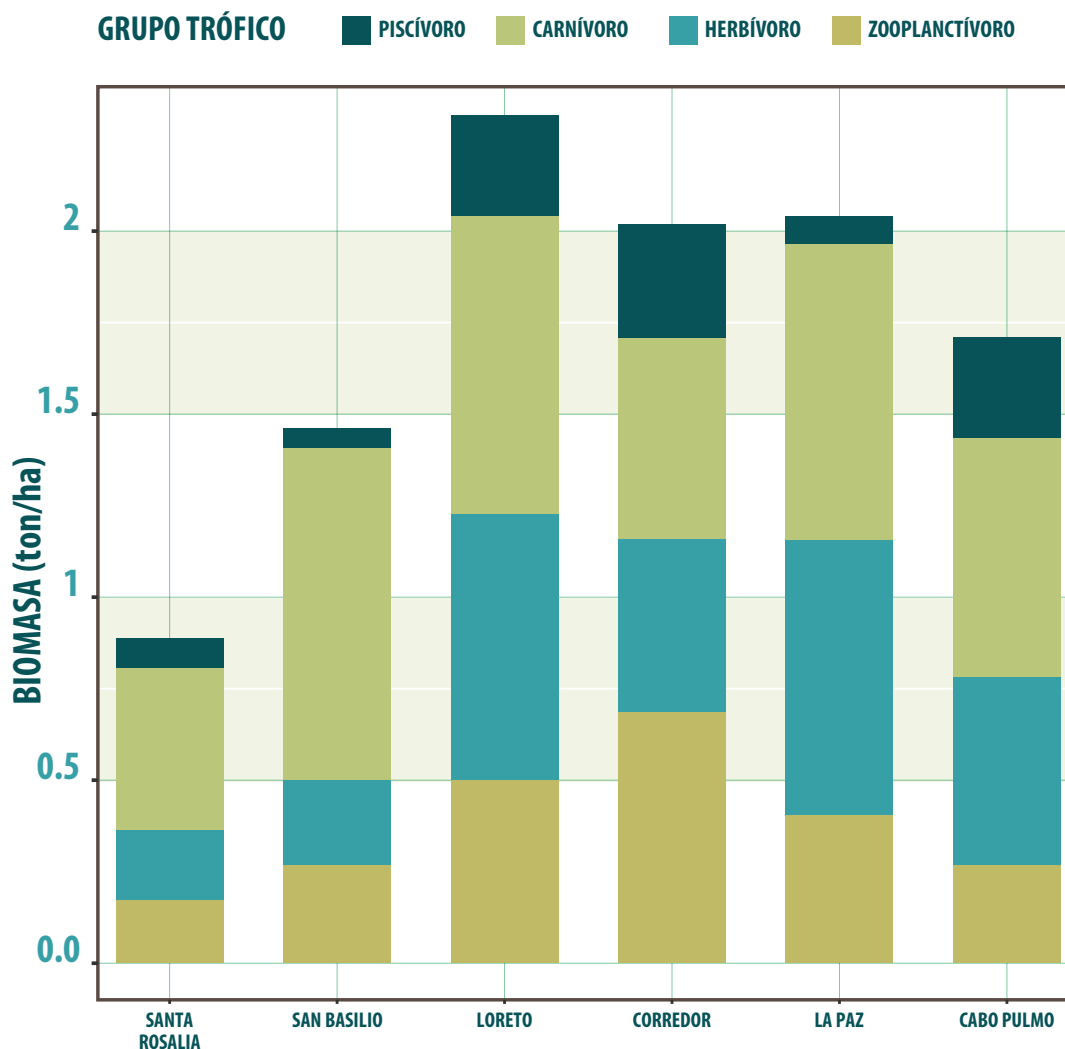


Figura 3. Biomasa promedio (ton/ha) de los grupos tróficos de peces en las regiones monitoreadas.

La biomasa relativa (%) facilita evaluar la estructura trófica al comparar la contribución de piscívoros, carnívoros, herbívoros y zooplanctívoros a la biomasa total en un ecosistema (Figura 4). En regiones como San Basilio y Santa Rosalía, los carnívoros dominan y los piscívoros están subrepresentados, lo que sugiere un truncamiento trófico asociado con la presión pesquera. En contraste, Cabo Pulmo presentó una mayor proporción relativa de depredadores tope y una distribución equilibrada entre los grupos funcionales, un patrón consistente con una alta integridad ecológica (Aburto-Oropeza et al., 2011). La combinación de estas métricas permite cuantificar la diversidad y la biomasa, al tiempo que hace posible inferir el grado de funcionalidad y perturbación en los arrecifes monitoreados.





Los datos de la serie temporal (1998–2025) permiten evaluar los cambios interanuales en la biomasa promedio de peces y detectar respuestas a factores ambientales y presiones locales (Figura 5). Loreto y La Paz muestran una variación moderada a lo largo del tiempo, con periodos de disminución seguidos de una recuperación parcial, lo que sugiere dinámicas influenciadas tanto por la variabilidad ambiental como por una presión pesquera sostenida. En Santa Rosalía y San Basilio, la biomasa total se mantiene baja y variable, sin una tendencia clara de incremento a largo plazo.

El Corredor presenta picos episódicos de biomasa asociados principalmente con aumentos en los zooplanctívoros o pulsos temporales de piscívoros, más que una recuperación estructural sostenida. En contraste, Cabo Pulmo registra de manera consistente mayores proporciones de piscívoros y eventos de biomasa elevada en años recientes, un patrón congruente con su condición de área totalmente protegida. La serie temporal indica que, aunque ocurren fluctuaciones naturales interanuales, la presencia sostenida de depredadores tope sigue siendo el rasgo distintivo de los sistemas con menor presión pesquera y mayor integridad trófica.



BIOMASA RELATIVA (%)

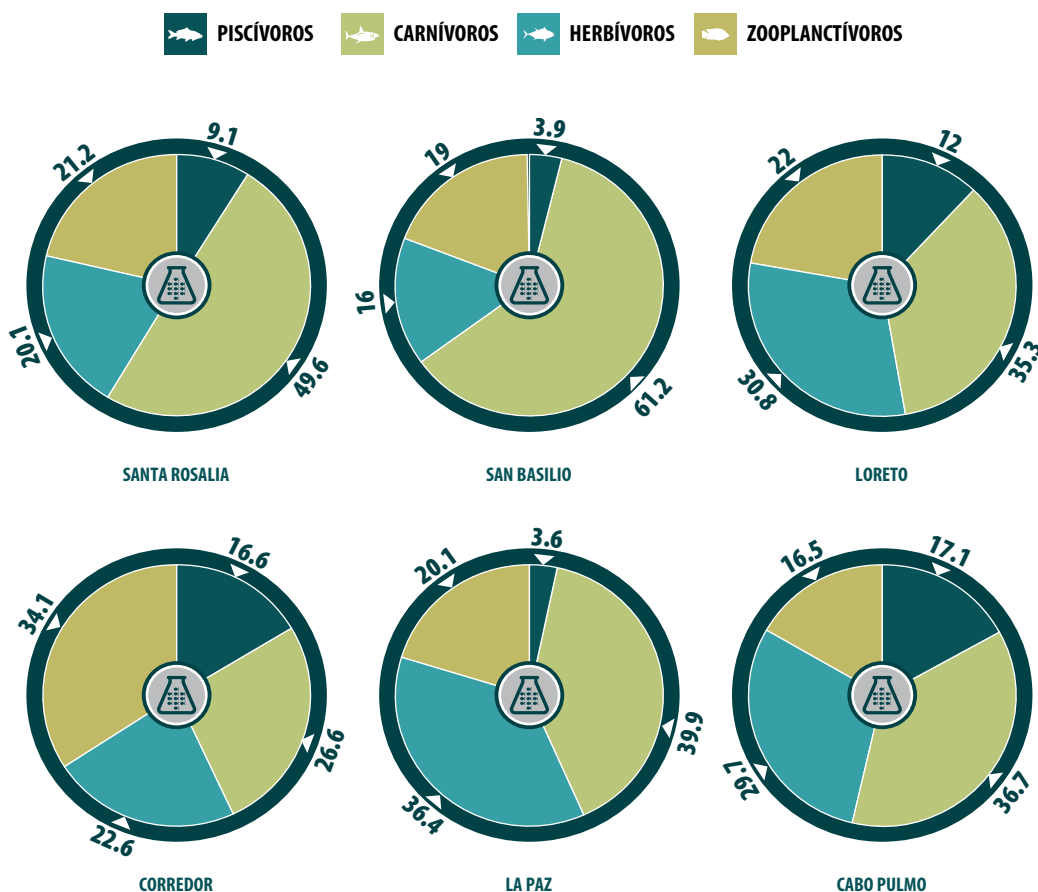


Figura 4. Biomasa relativa (porcentaje) por grupo trófico en las regiones monitoreadas durante 2025.





BIOMASA (TON/HA) A TRAVÉS DEL TIEMPO

PISCÍVOROS
 CARNÍVOROS
 HERBÍVOROS
 ZOOPLANCTÍVOROS



Figura 5. Serie de tiempo mostrando biomasa promedio (ton/ha) de cada grupo trófico en las regiones monitoreadas.





CAMBIO CLIMÁTICO Y ARRECIFES ROCOSOS EN EL GOLFO DE CALIFORNIA

TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR Y OLAS DE CALOR

Al desagregar la serie temporal de temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés) por grado latitudinal se puede observar una tendencia general de calentamiento a lo largo del periodo 1982–2025, superpuesta a la variabilidad interanual (Figura 6). Las latitudes más bajas muestran de manera consistente temperaturas más altas y una señal de calentamiento más pronunciada en años recientes, mientras que las latitudes más altas mantienen valores absolutos menores, pero presentan una trayectoria ascendente similar. Eventos cálidos notables, particularmente en 1998, 2015–2016 y 2019, son evidentes a lo largo del gradiente, lo que refleja la influencia de impulsores climáticos a escala regional.

TENDENCIA LATITUDINAL EN LA SST

Serie de tiempo desagregada

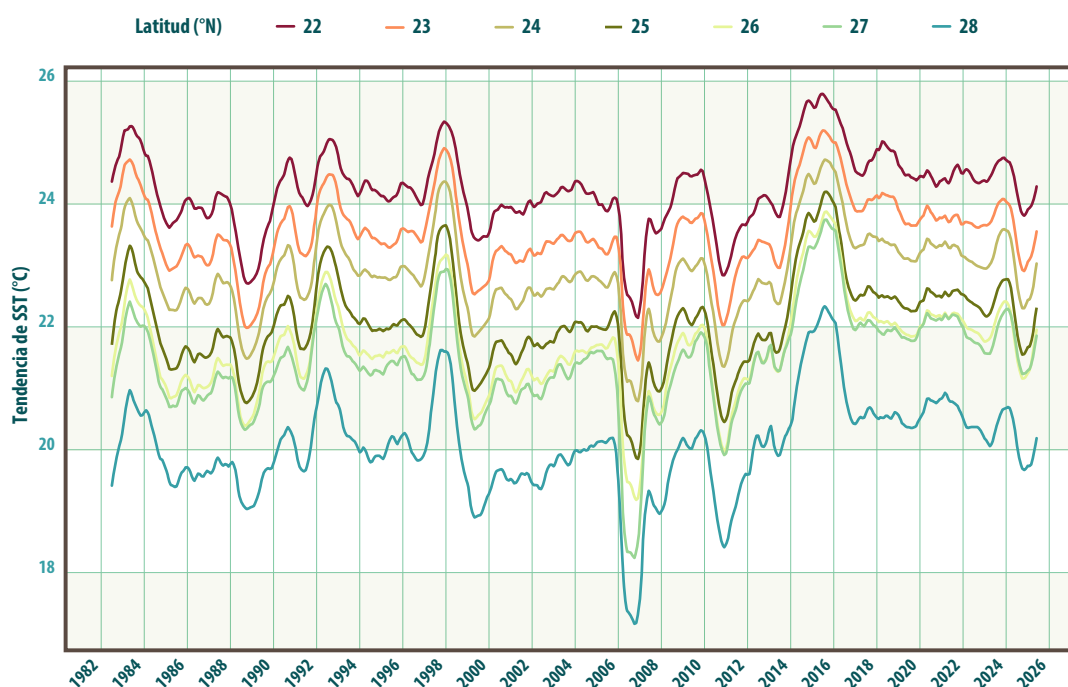


Figura 6. Serie de tiempo de la temperatura superficial del mar por grado latitudinal durante el periodo 1982-2025.

La serie temporal de anomalías de la temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés) para la región de estudio (23.3–27.5°N), calculada con respecto a la línea base 1998–2011, muestra variabilidad interanual con una tendencia hacia anomalías cálidas más frecuentes e intensas durante las últimas dos décadas (Figura 7). En los primeros años de la serie predominaron las anomalías frías, mientras que a partir del 2000, y particularmente después de 2014, se observa un aumento sostenido en la magnitud y duración de los eventos cálidos.

Los picos positivos asociados con eventos de gran escala, como los de 2015–2016, superan los 2–3 °C y reflejan condiciones regionales de olas de calor marinas. Aunque persisten periodos fríos intermitentes, la mayor recurrencia de anomalías positivas en años recientes sugiere un cambio hacia un régimen térmico más cálido. Este contexto es central para interpretar los cambios en riqueza, biomasa y estructura trófica observados en 2025, ya que las anomalías térmicas prolongadas modifican la distribución de las especies, favorecen procesos de tropicalización y alteran la dinámica funcional de los arrecifes rocosos.



ANOMALÍAS EN LA SST

Huella de monitoreo: Cabo Pulmo a Santa Rosalía (23.3-27.5 °N) Línea base: 1998-2011

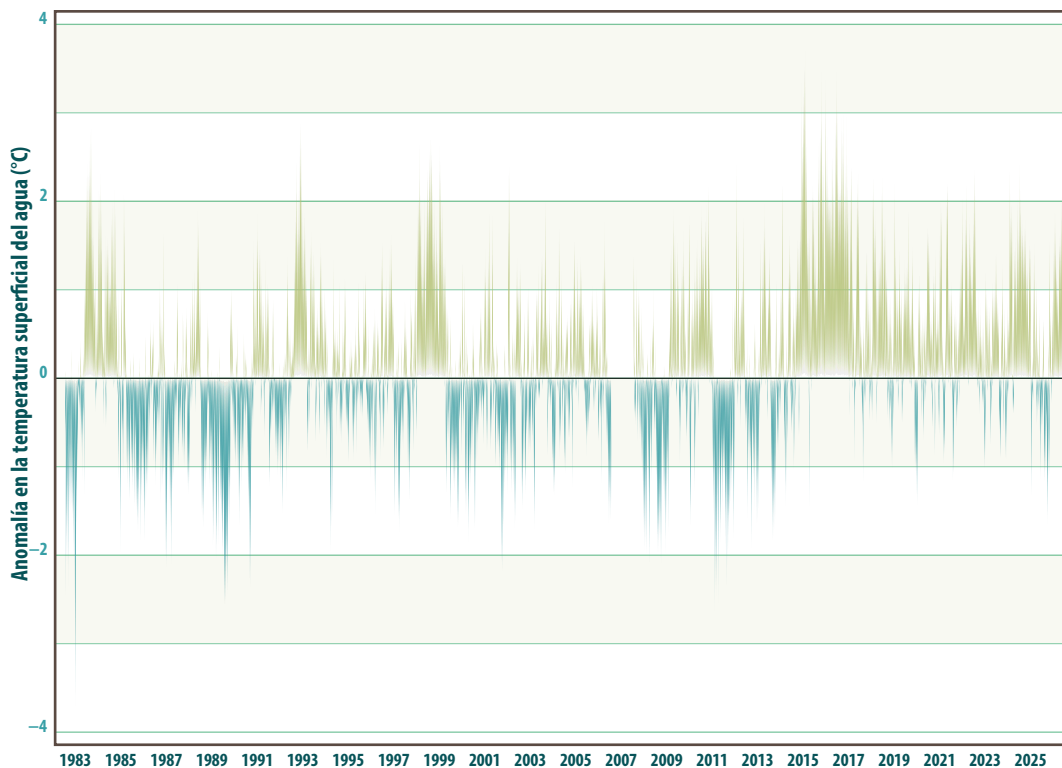


Figura 7. Anomalías en la temperatura superficial del mar en las regiones monitoreadas durante el periodo 1982-2025.



Las olas de calor marinas (MHWs, por sus siglas en inglés) son periodos prolongados durante los cuales la temperatura superficial del mar supera el umbral del percentil 90 de la climatología histórica, generando condiciones térmicas extremas que alteran la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas marinos (Wernberg et al., 2013). Durante 2025, se registraron eventos de MHW en todas las regiones estudiadas, particularmente entre finales del verano y el otoño, cuando las temperaturas observadas excedieron de manera consistente los umbrales climatológicos (Figura 8). La intensidad y duración de estos eventos fueron evidentes en Santa Rosalía, San Basilio, Loreto, El Corredor, La Paz y Cabo Pulmo, lo que indica una exposición térmica sincronizada a escala regional.

Estas anomalías térmicas impulsan cambios en la composición de especies, favorecen a los organismos afines a aguas cálidas y modifican las interacciones tróficas, contribuyendo a la tropicalización y a la homogeneización biogeográfica (Favoretto et al., 2022). La recurrencia de eventos cálidos en 2025, combinada con la tendencia de calentamiento de largo plazo, indica que los arrecifes rocosos del Golfo de California están experimentando un régimen térmico cada vez más extremo. Integrar esta información con los patrones de riqueza, biomasa y estructura trófica es esencial para interpretar las respuestas ecológicas observadas por el equipo de investigación en el contexto más amplio del cambio climático.



OLAS DE CALOR (2025)

TEMPERATURA OBSERVADA
 CLIMATOLOGÍA
 90% DEL RANGO
 EVENTOS DE OLAS DE CALOR

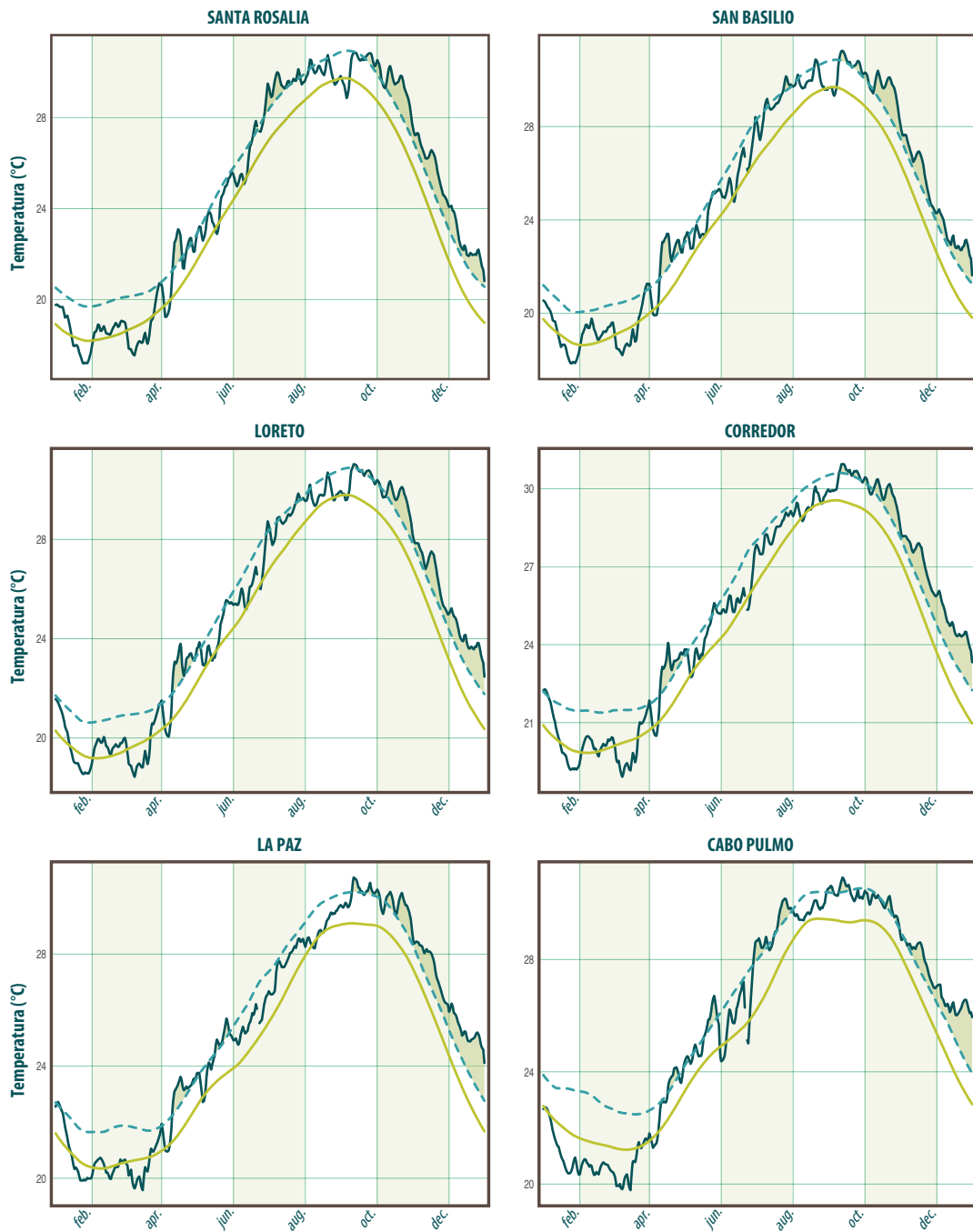


Figura 8. Olas de calor marinas en regiones monitoreadas en el 2025.





MANTOS DE SARGAZO Y SU DINÁMICA ESTACIONAL

El Golfo de California es un centro de diversidad y biomasa para el género *Sargassum*. Las primeras expediciones taxonómicas del siglo XX describieron numerosas especies y reportaron inicialmente 15 nuevos taxones, posteriormente consolidados en diez con base en criterios morfológicos (Andrade-Sorcía et al., 2014). Análisis moleculares confirman que las poblaciones de sargazo del GC son distintas y en gran medida endémicas. Al menos seis especies nativas (Dawson, 1966) constituyen la base de los bosques de sargazo en el GC: *S. herporhizum*, *S. horridum*, *S. johnstonii*, *S. lapazeanum*, *S. sinicola* y la recientemente descrita *S. ulixei*.

Estas especies colonizan arrecifes rocosos y sustratos duros en todo el Golfo de California, particularmente en las regiones central y sur, donde el hábitat adecuado es extenso. En zonas submareales someras, se fijan a la roca y forman mantos densos con estructura de dosel que funcionan como bosques submarinos. Los estudios realizados en la década de 1990 documentaron extensos mantos a lo largo de la costa occidental del GC entre los 26–28°N, con registros adicionales hacia el sur hasta la Bahía de La Paz (~24°N) y hacia el norte alrededor de las islas de la región central del golfo (Pacheco-Ruíz et al., 1998). En contraste, la región deltaica del extremo norte del GC carece de una presencia importante de sargazo debido a los sustratos blandos y a condiciones ambientales extremas, entre ellas alta temperatura, salinidad y turbidez.

Las especies nativas de *Sargassum* presentan fluctuaciones estacionales marcadas en su crecimiento y biomasa. El crecimiento ocurre durante los meses más fríos, con un desarrollo máximo entre finales del invierno y la primavera, seguido por una reducción en el crecimiento, o senescencia parcial, durante los meses cálidos (Pacheco-Ruíz et al., 1998). Las frondas alcanzan su máxima longitud y peso en primavera, cuando la temperatura del agua es baja y los niveles de nutrientes altos; el crecimiento se reduce notablemente hacia finales del verano, a medida que el agua se calienta y se estratifica (Figura 9).

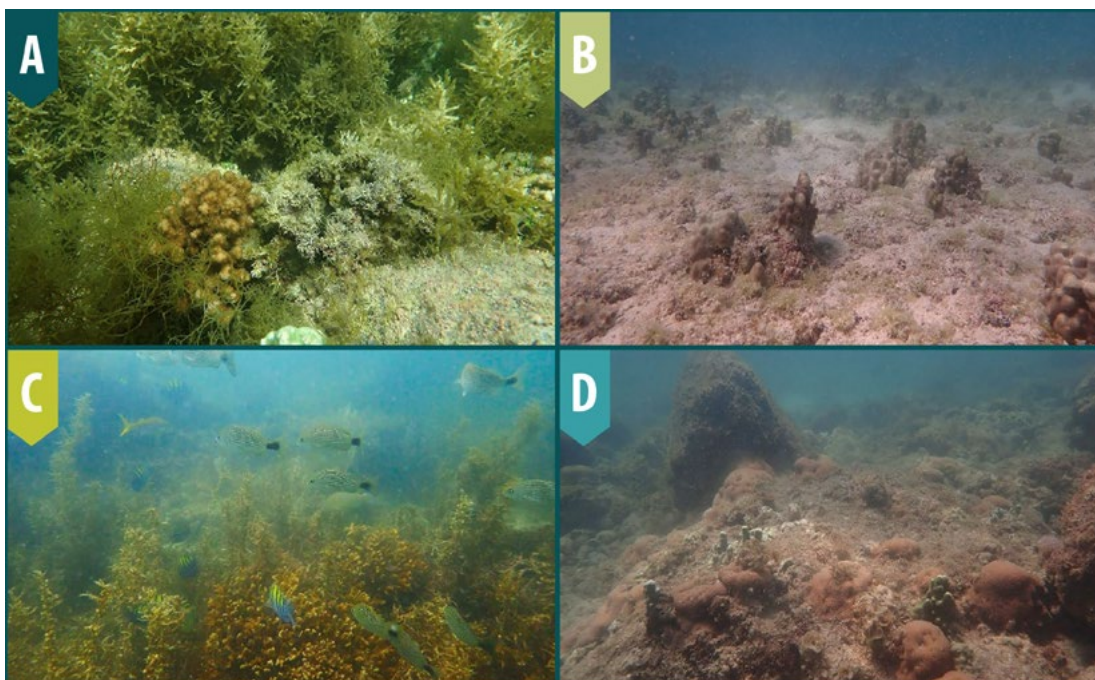


Figura 9. A,C) Los bosques de sargazo se forman en zonas rocosas durante los meses fríos; B, D) En arrecifes donde ha desaparecido el sargazo ahora dominan los corales pétreos y otras algas.



CAMBIOS DE LARGO PLAZO Y PÉRDIDA DE HÁBITAT

Las poblaciones de sargazo en el Golfo de California han experimentado cambios significativos en su distribución y abundancia durante las últimas tres décadas, impulsados por la variabilidad climática natural y las tendencias recientes de calentamiento (Casas-Valdez et al., 2016; Aburto-Oropeza et al., 2007). Los estudios realizados a mediados de la década de 1990 documentaron bosques extensos y continuos de sargazo a lo largo de la costa occidental (Pacheco-Ruíz et al., 1998). Para 2006, los muestreos revelaron mantos más pequeños y fragmentados. Aunque se cartografiaron 72 mantos distintos, ninguno igualó la extensión espacial observada una década antes, y el área total del bosque había disminuido aproximadamente 45% con respecto a 1995. En la Bahía de La Paz, la longitud promedio de las frondas de *S. sinicola* fue significativamente menor en 2006, lo que sugiere un mayor estrés ambiental o temporadas de crecimiento más cortas. Debido a que el sargazo del GC no se aprovecha comercialmente, estas disminuciones apuntan a causas ambientales más que extractivas.

En 2007, se describió un sistema impulsado por el clima que vinculaba la variabilidad del ENSO con el reclutamiento de la cabrilla sardinera (*Mycteroperca rosacea*) a través de sus efectos sobre el hábitat de reclutamiento y crianza proporcionado por el sargazo (Aburto-Oropeza et al., 2007). El modelo predijo que las transiciones de condiciones frías y productivas de La Niña hacia fases más cálidas de El Niño reducirían la biomasa del sargazo y, en consecuencia, el reclutamiento de juveniles de cabrilla. Utilizando datos de 1999 (condiciones de La Niña) y 2025 (condiciones neutrales de ENSO), junto con 26 años de datos de monitoreo, proporcionamos una evaluación directa de esta hipótesis. En la mayoría de los sitios evaluados, la biomasa de sargazo disminuyó entre 1999 y 2025 (Figura 10), con una biomasa media que pasó de 4.4 kg/m² a 3.1 kg/m². Tres sitios experimentaron una pérdida total (-100%), y el patrón regional dominante refleja una degradación del hábitat consistente con las tendencias de calentamiento en el largo plazo.

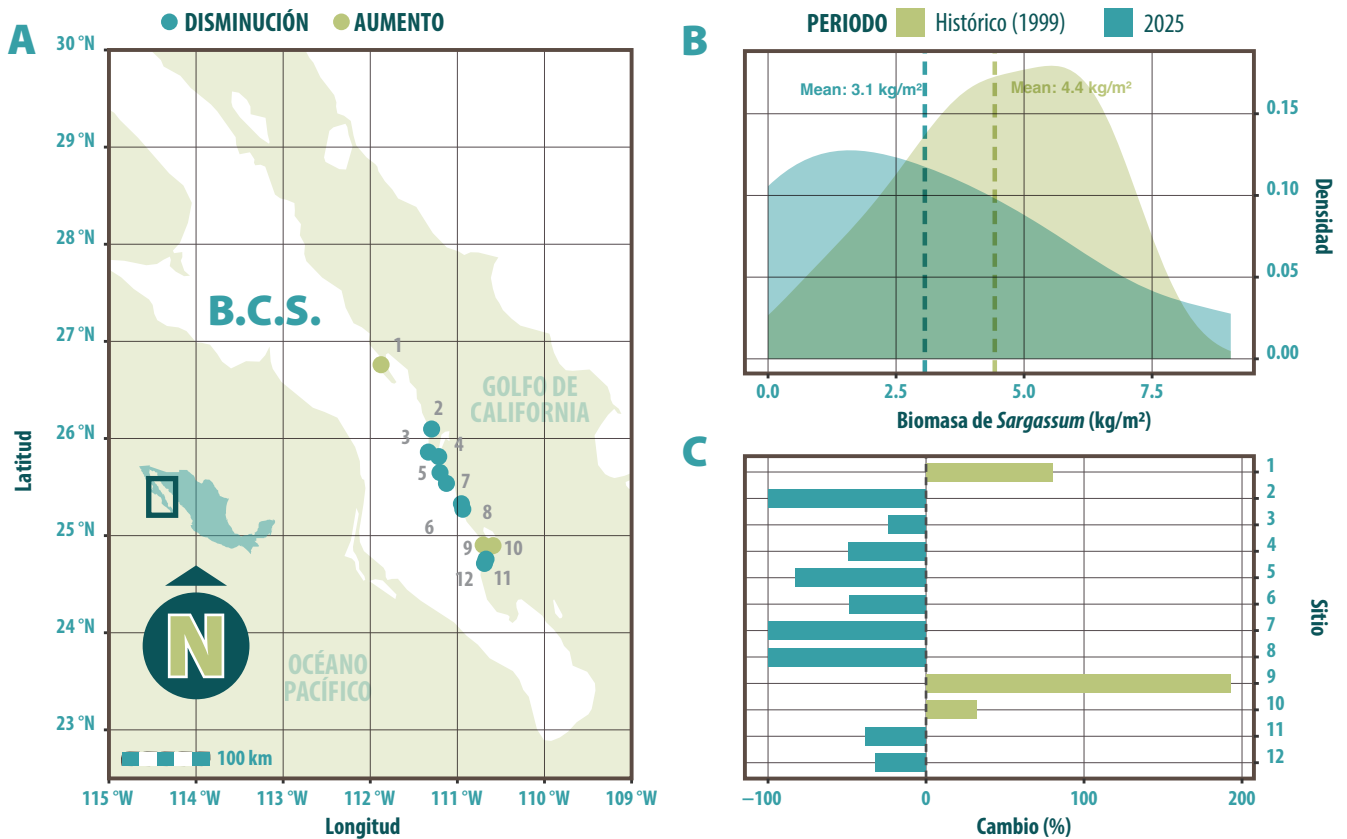


Figura 10. Área de estudio y cambios en biomasa de sargazo en el Golfo de California. (A) Sitios de estudio clasificados de acuerdo a la dirección del cambio. (B) Comparación en la distribución de la densidad de biomasa (1999 vs. 2025). (C) Cambio, expresado en porcentaje, por sitio.





CAMBIOS EN LOS PATRONES DE RECLUTAMIENTO DE LA CABRILLA SARDINERA

La biomasa de la cabrilla sardinera en sitios con sargazo disminuyó de 1.3 ton/ha (línea base) a 0.28 ton/ha en el periodo observado; esto representa una reducción de 79% (Figura 1B). La especie estuvo presente en 100% de los transectos en 1999, pero solo en 42% en 2025. El modelo original predijo una disminución de 77% con base en la transición del MEI por lo que la disminución observada (79%) está dentro de los márgenes de incertidumbre del modelo (IC 95%: -88% a -60%), con una diferencia de apenas 1.1 puntos porcentuales respecto a la predicción central. El modelo clima-reclutamiento explica 98% de la disminución observada, indicando que, en estos sitios de hábitat de sargazo, la señal climática es lo suficientemente fuerte como para sobreponerse a otros posibles factores. La ausencia de cabrillas adultas señala una falta de envejecimiento poblacional, además de una falla en el reclutamiento (Figura 11D), lo que sugiere presiones en ambos extremos de la estructura poblacional.

Los cambios en la estructura de tallas de la población proporcionan evidencia independiente de falla en el reclutamiento. En la línea base, los reclutas (peces <25 cm) representaban 43% de la población; en el periodo observado, esta proporción cayó a 16%, mientras que los subadultos (25–40 cm) aumentaron de 24% a 48%. Este cambio de una población dominada por reclutas a una dominada por subadultos es consistente con el mecanismo planteado por el modelo: la reducción del hábitat de sargazo limita el asentamiento exitoso de juveniles de cabrilla pinta, lo que con el tiempo reduce la incorporación de peces jóvenes a la población.

Estos hallazgos proporcionan una validación empírica, a lo largo de 26 años, de un modelo clima-hábitat-reclutamiento. La estrecha coincidencia entre las disminuciones predichas y observadas respalda el vínculo mecanístico entre ENSO, el hábitat de sargazo y la dinámica poblacional de la cabrilla sardinera. En términos de conservación, estos resultados sugieren que proteger el hábitat de crianza (el sargazo) es tan crítico como manejar la presión pesquera sobre las poblaciones de cabrilla sardinera. La pérdida de hábitat impulsada por el clima puede generar disminuciones poblacionales de magnitud comparable a las causadas por la sobrepesca.

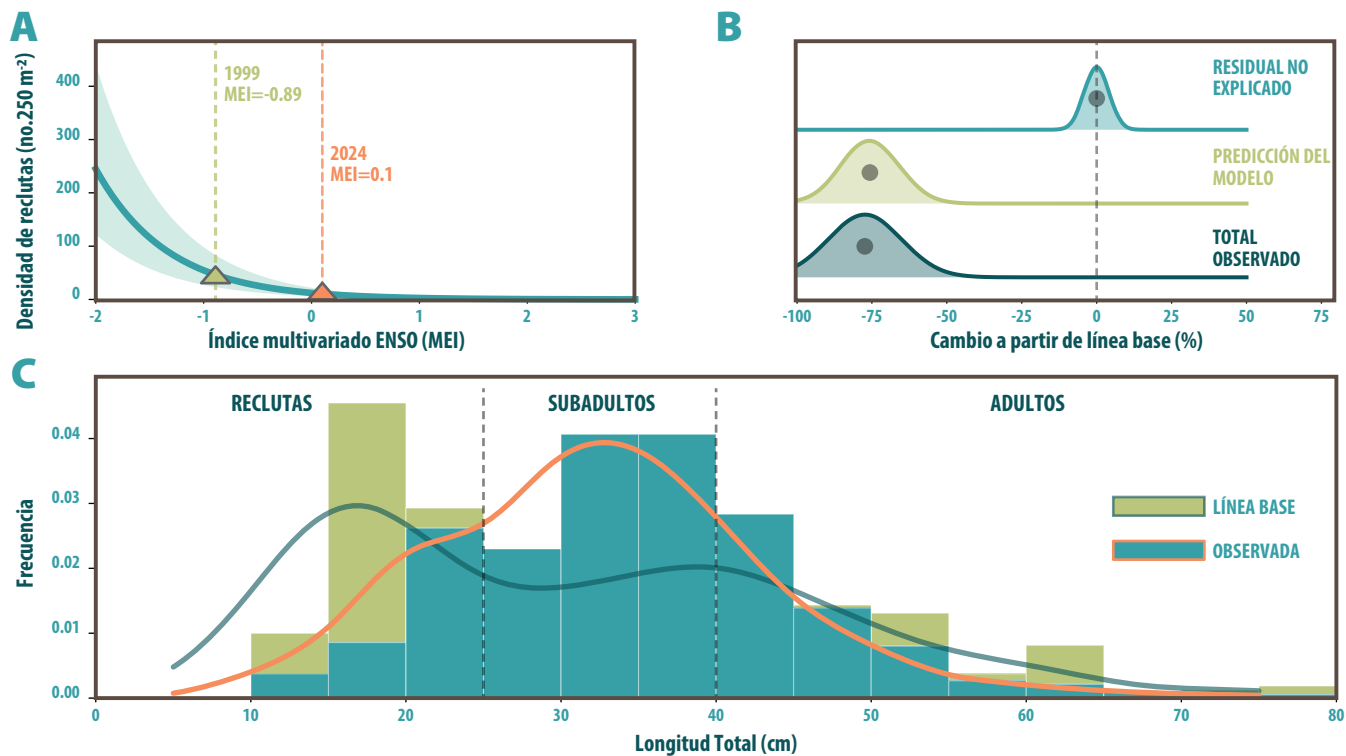


Figura 11. Validación del modelo y estructura poblacional. (A) Modelo de reclutamiento mostrando la densidad predicha de cabrilla sardinera en función de las condiciones del ENSO; los marcadores indican las posiciones de 1999 y 2025. (B) Descomposición bayesiana mostrando que el clima explica 98% de la disminución, con el residuo no explicado centrado en cero. (C) Distribuciones de frecuencia de tallas mostrando el cambio de una población dominada por reclutas (línea base) a una población dominada por subadultos (periodo observado).





HALLAZGOS PRINCIPALES

Uno de los patrones más claros detectados por el análisis impulsado por inteligencia artificial es la relación entre el calentamiento del océano y la diversidad de peces. En todo el conjunto de datos, temperaturas superficiales del mar más altas se asociaron de manera consistente con una menor riqueza de especies de peces. En promedio, los arrecifes perdieron aproximadamente 1.2 especies de peces por cada aumento de 1 °C en la temperatura superficial del mar. Esta relación fue estadísticamente sólida y se observó en todas las regiones. A medida que continúan las tendencias de calentamiento, es probable que las comunidades de peces arrecifales experimenten disminuciones progresivas en su diversidad. Debido a que la diversidad sostiene procesos ecológicos como la herbivoría, la depredación y el ciclado de nutrientes, el calentamiento continuo podría tener efectos en cascada sobre el funcionamiento del ecosistema.

Un segundo resultado importante cuestiona la “hipótesis del seguro”, que propone que los ecosistemas con mayor riqueza de especies son más resistentes a las perturbaciones ambientales porque la redundancia funcional permite que unas especies compensen la pérdida de otras. Nuestro análisis no respaldó esta predicción. Durante la ola de calor marina de 2014–2016, los arrecifes con mayor riqueza inicial de especies experimentaron pérdidas proporcionalmente mayores que aquellos con menor riqueza. Este patrón ocurrió tanto en sitios protegidos (Cabo Pulmo) como no protegidos, lo que sugiere que el estatus de manejo por sí solo no explica la vulnerabilidad observada.

Varios mecanismos pueden explicar este patrón. Los arrecifes con alta riqueza de especies pueden incluir una proporción mayor de especies que viven cerca de sus límites superiores de tolerancia térmica. Los sistemas con alta diversidad también tienden a contener muchas especies raras con tamaños poblacionales pequeños, lo que incrementa la probabilidad de extinción local durante eventos de estrés. Además, los arrecifes con alta riqueza pueden ya estar operando cerca de su capacidad de carga ecológica, lo que limita su capacidad para absorber perturbaciones adicionales. Estos hallazgos indican que la biodiversidad por sí sola no garantiza resiliencia frente al cambio climático acelerado.

Si los arrecifes biodiversos son más vulnerables al estrés climático, las estrategias de conservación deben ajustarse. Los planes de manejo no deberían asumir que las áreas con alta diversidad son intrínsecamente más resilientes; por el contrario, estos sitios pueden requerir un monitoreo más intenso y medidas de protección dirigidas. Este estudio subraya el valor del monitoreo ecológico de largo plazo, ya que la relación entre biodiversidad y vulnerabilidad solo pudo detectarse porque el conjunto de datos abarca múltiples décadas e incluye eventos climáticos extremos.



PASOS SIGUIENTES: HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA AVANZAR EL CONOCIMIENTO Y LA COMPRENSIÓN

Un componente central de nuestra investigación es la implementación de un sistema basado en inteligencia artificial llamado AutoDiscovery. Esta nueva herramienta está diseñada para generar, formalizar y evaluar hipótesis científicas utilizando grandes conjuntos de datos ecológicos. A diferencia de los estudios ecológicos tradicionales, que ponen a prueba un número limitado de hipótesis, AutoDiscovery traduce de manera sistemática la teoría ecológica en predicciones formales, genera múltiples hipótesis en competencia, ajusta modelos estadísticos para cada predicción y compara el desempeño de los modelos entre alternativas.

En un ejercicio analítico para evaluar la variabilidad climática y la efectividad de la protección de arrecifes, Favoretto y Aburto-Oropeza analizaron simultáneamente cerca de 100 predicciones ecológicas. Este enfoque innovador reduce el sesgo de selección, permite una comparación estructurada entre explicaciones en competencia y aumenta la probabilidad de detectar tanto patrones esperados como inesperados. Al poner a prueba muchas hipótesis dentro del mismo conjunto de datos, AutoDiscovery proporciona una evaluación integral y transparente de la teoría ecológica.

Los detalles de este ejercicio científico pueden consultarse aquí.

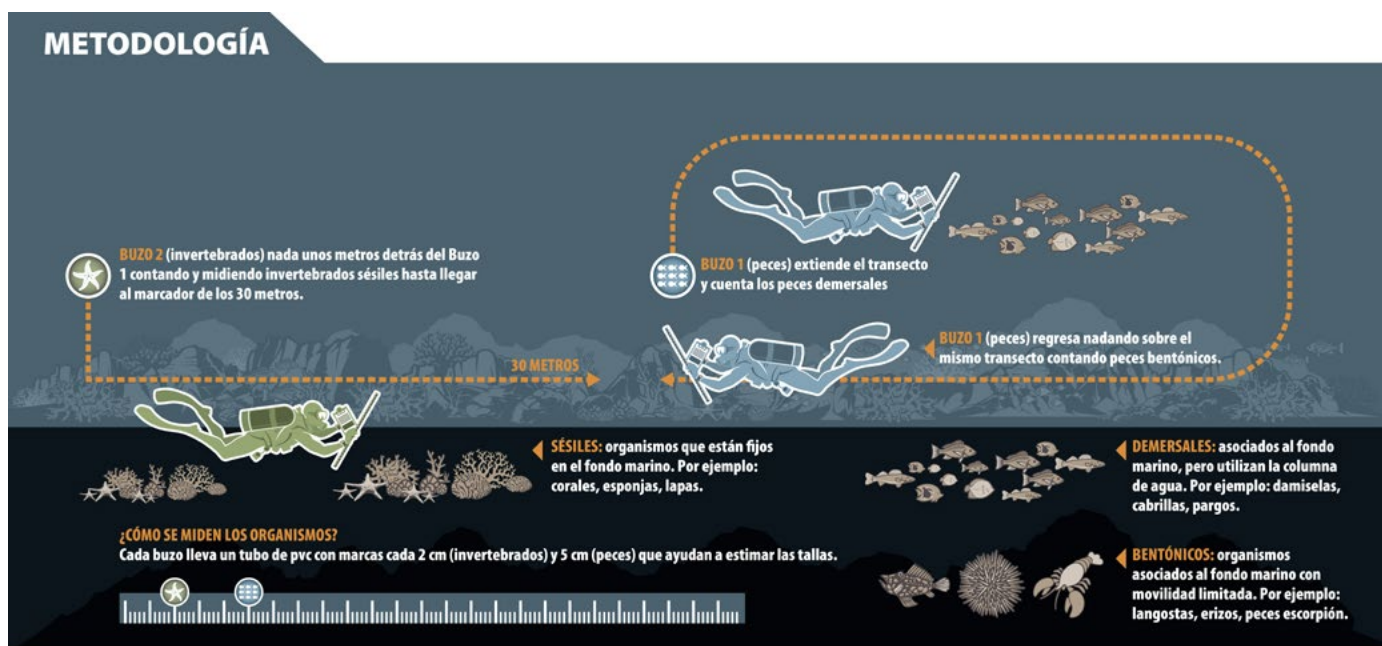
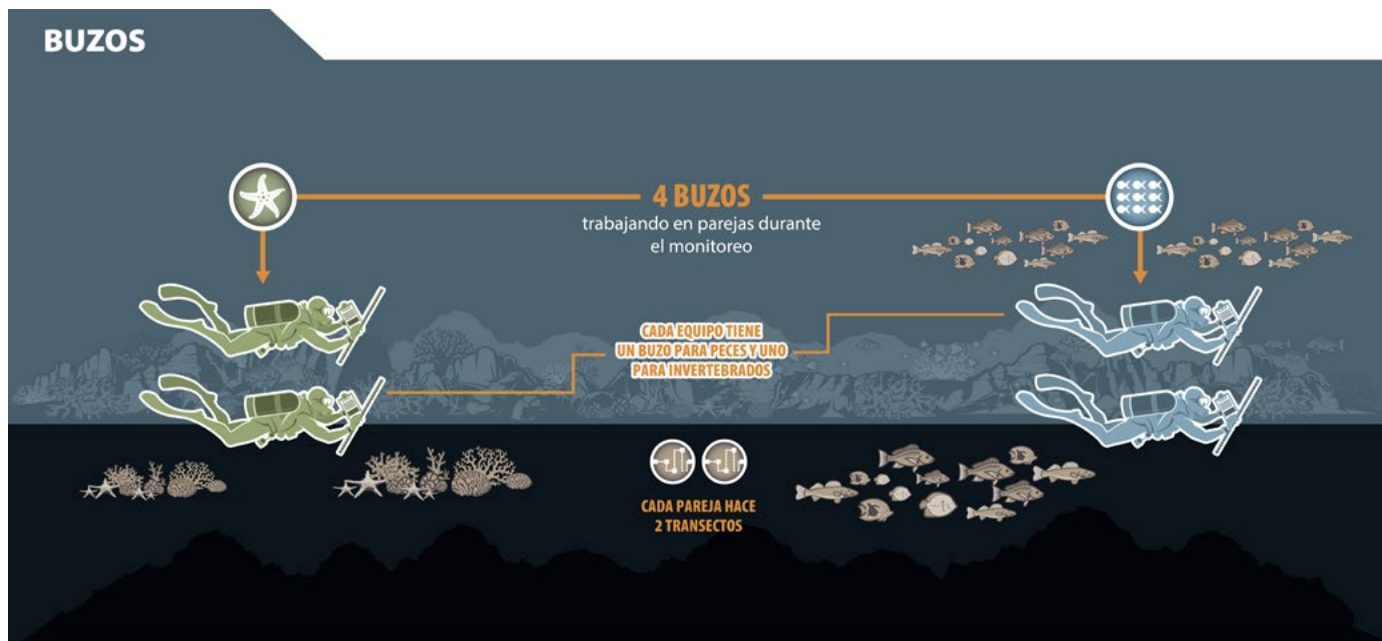




MÉTODOS

Censos de peces e invertebrados

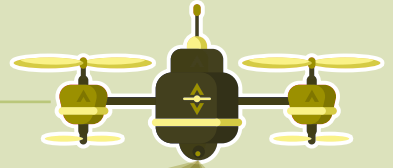
Los monitoreos en arrecifes rocosos siguieron una metodología estandarizada de censos visuales. En cada sitio, buzos realizaron transectos de banda mediante censos visuales, con seis réplicas de transectos de 50 x 5 m por localidad. Los buzos recorrieron cada transecto a velocidad constante (~15 min por transecto), contando todos los peces y estimando la longitud total al centímetro más cercano para juveniles (<10 cm) y a los 5 cm más cercanos para subadultos y adultos (>10 cm). Se registraron todos los peces dentro de 2.5 m a cada lado de la línea central (área de transecto de 250 m²). Los censos se realizaron de manera consistente a profundidades de 5 y 20 m. Esta metodología se ha aplicado de forma continua desde 1998, lo que permite comparaciones temporales directas (Aburto-Oropeza et al., 2007).



ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA DE SARGAZO

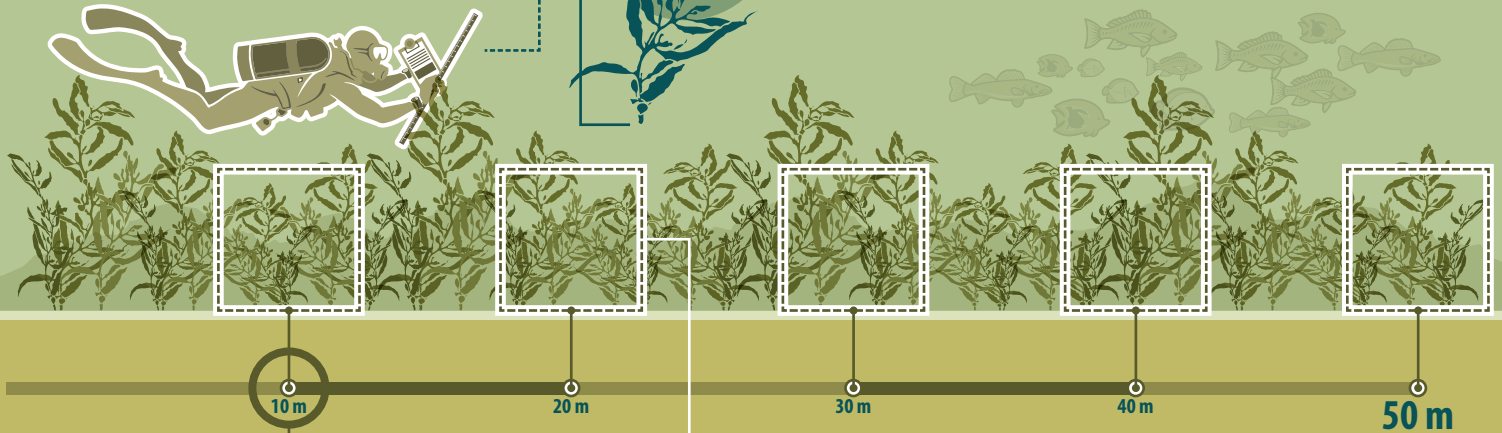


Los bosques de sargazo monitoreados durante el 2024-2025 fueron estudiados años atrás por el equipo científico. Imágenes aéreas fueron obtenidas utilizando drones para estimar cobertura de los bosques.



Un transecto de 50 m paralelo a la costa fue colocado en el centro de cada bosque de sargazo.

Se midió la densidad y longitud máxima de frondas para estimar la biomasa.

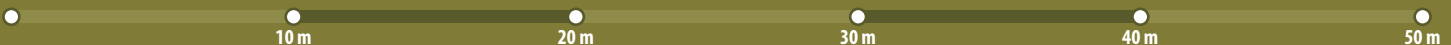


Puntos de muestreo fueron colocados cada 10 m a lo largo del transecto.

En cada sitio monitoreado se colocó un cuadrante de 50x50 cm y colectaron todas las frondas de sargazo. Esto se replicó tres veces por sitio para obtener un total de 15 cuadrantes.



En sitios donde se registró la ausencia de sargazo, los transectos se colocaron para registrar cualquier fronda; aquellas presentes se colectaron.



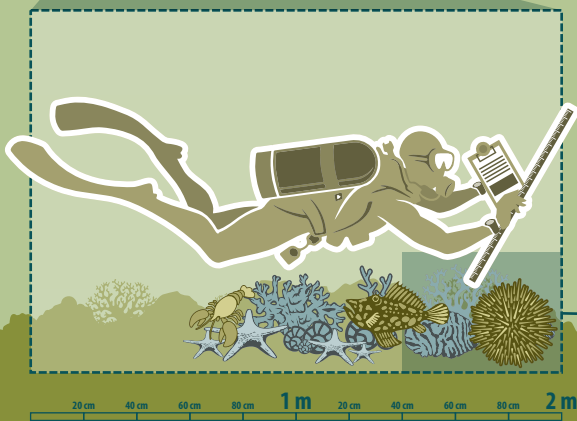
COMPOSICIÓN DE COMUNIDAD BENTÓNICA



La composición de la comunidad bentónica fue evaluada utilizando el método de Punto Contacto Uniforme (PCU).

A lo largo de transectos de 50 m, cada 20 cm los buzos registraron el tipo de sustrato o los organismos presentes. Se obtuvo un total de 250 puntos de observación para cada transecto.

Los transectos se colocaron en dos profundidades distintas: **20 y 5 metros**



La frecuencia relativa de cada categoría bentónica se calculó como la proporción de puntos ocupados por categoría. Esto proporcionó una medida estandarizada del porcentaje de cobertura de invertebrados sésiles (corales, abanicos de mar, esponjas, etc.) y macroalgas.



AGRADECIMIENTOS

La campaña de monitoreo ecológico de arrecifes rocosos 2025 contó con el apoyo de Alumbra Innovations Foundation, Builders Vision Philanthropy, la Mary G. Jameson Foundation y Paul M. Angell Family Foundation.

Extendemos nuestro agradecimiento a la tripulación del M/V Storm, cuyo profesionalismo y dedicación fueron fundamentales para el éxito de la expedición. Asimismo, reconocemos y agradecemos sinceramente a todas las personas y aliados que han apoyado y participado en este programa a lo largo de sus 27 años.

El trabajo de campo y la logística del crucero fueron coordinados por el Centro para la Biodiversidad Marina y la Conservación. El análisis de datos estuvo a cargo de Fabio Favoretto (University of Plymouth), Eduardo León Solórzano (CBMC) y Octavio Aburto-Oropeza (Scripps Institution of Oceanography). El Programa Marino del Golfo de California coordina al equipo binacional de científicos que contribuye a la investigación generada de manera colaborativa.





LITERATURA CITADA

- Aburto-Oropeza, O., Erisman, B., Galland, G.R., Mascareñas-Osorio, I., Sala, E., Ezcurra, E., 2011. Large Recovery of Fish Biomass in a No-Take Marine Reserve. *PLoS ONE* 6, e23601. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023601>
- Aburto-Oropeza, O., Sala, E., Paredes, G., Mendoza, A., & Ballesteros, E. (2007). Predictability of reef fish recruitment in a highly variable nursery habitat. *Ecology*, 88(9), 2220-2228.
- Andrade-Sorcía, G., Riosmena-Rodríguez, R., Muniz-Salazar, R., López-Vivas, J. M., Boo, G. H., Lee, K. M., & Boo, S. M. (2014). Morphological reassessment and molecular assessment of *Sargassum* (Fucales: Phaeophyceae) species from the Gulf of California, Mexico. *Phytotaxa*, 183(4), 201-223.
- Casas-Valdez, M., Sánchez-Rodríguez, I., Serviere-Zaragoza, E., & Aguila-Ramírez, R. N. (2016). Temporal changes in the biomass and distribution of *Sargassum* beds along the southeastern coast of the Baja California Peninsula. *Ciencias Marinas*, 42(2), 99-109. <https://doi.org/10.7773/cm.v42i2.2592>
- Dawson, E. Y. (1966). New records of marine algae from the Gulf of California. *Journal of the Arizona Academy of Science*, 4(2), 55-66. <https://doi.org/10.2307/40022371>
- Favoretto, F., Sanchez, C., & Aburto-Oropeza, O. (2022). Warming and marine heatwaves tropicalize rocky reefs communities in the Gulf of California. *Progress in Oceanography*, 206, 102838.
- Wernberg, T., et al. (2013). An extreme climatic event alters marine ecosystem structure in a global biodiversity hotspot. *Nature Climate Change*, 3(1), 78-82.
- Pacheco-Ruíz, I., Zertuche-González, J. A., Chee-Barragán, A., & Blanco-Betancourt, R. (1998). Distribution and quantification of *Sargassum* beds along the west coast of the Gulf of California, Mexico. *Botanica Marina*, 41(1-6), 203-208. <https://doi.org/10.1515/botm.1998.41.1-6.203>



