



<https://doi.org/10.15517/4yc4y097>

## Resultados preliminares de la jardinería de coral con fragmentos del género *Pocillopora* como herramienta de restauración en la Bahía de la Paz, Baja California Sur, México

Victoria Belén Muñoz-Jiménez<sup>1</sup>;  <https://orcid.org/0009-0005-1459-1635>

Carlos Cáceres-Martínez<sup>1\*</sup>;  <https://orcid.org/0000-0002-5952-4808>

1. Efecto Arena A.C., Lic. Primo Verdad 2135, Colonia Centro, 23000, La Paz, Baja California Sur, México; victoria@efectoarena.org, carlos@efectoarena.org (\*Correspondencia).

Recibido 01-XI-2025. Corregido 05-III-2026. Aceptado 17-IV-2026.

### ABSTRACT

#### Preliminary results of coral gardening with fragments of the genus *Pocillopora* as a restoration tool in the Bay of La Paz, Baja California Sur, Mexico

**Introduction:** Coral reefs in the Mexican Pacific and the Gulf of California have undergone a marked decline in live coral cover as a result of the synergistic effects of anthropogenic stressors and climate change. In response, a range of restoration strategies has been developed, among which active restoration using coral fragments of opportunity has gained increasing relevance.

**Objective:** To evaluate a coral restoration approach that involves the *in situ* cultivation of coral fragments for six months, followed by their transplantation to a degraded reef site as established colonies.

**Methods:** Coral fragments of opportunity were collected and cultivated in table-type nurseries from September 2023 to March 2024. After the nursery phase, fragments were transplanted to the restoration site using PVC bases affixed to the rocky substrate with epoxy putty. Transplanted colonies were monitored *in situ* until March 2025 to assess growth and survival.

**Results:** During the nursery phase, cultivated fragments exhibited a mean net linear extension of 2.23 cm and 100 % survival. From the nursery stage through the post-transplantation period, growth rates were 0.0127 cm day<sup>-1</sup> ( $r^2 = 0.99$ ,  $p = 1.10 \times 10^{-19}$ ) in height, 0.0168 cm day<sup>-1</sup> ( $r^2 = 0.98$ ,  $p = 1.31 \times 10^{-18}$ ) in maximum diameter, and 0.0163 cm day<sup>-1</sup> ( $r^2 = 0.96$ ,  $p = 1.80 \times 10^{-14}$ ) in minimum diameter. Overall survival following transplantation was 82.5 %.

**Conclusions:** The growth and survival rates observed are consistent with previously reported values for *Pocillopora* in the Tropical Eastern Pacific. These findings support the robustness and reproducibility of the proposed methodology and highlight its potential to generate viable coral colonies for outplanting, thereby enhancing restoration success in degraded reef systems.

**Key words:** growth rate; survival rate; nursery; transplanting; active restoration; Pichilingue.

### RESUMEN

**Introducción:** Los arrecifes de coral en el Pacífico mexicano y el Golfo de California han experimentado una marcada disminución en la cobertura de coral vivo como resultado de los efectos sinérgicos de los estresores antropogénicos y el cambio climático. En respuesta, se ha desarrollado una gama de estrategias de restauración, entre las cuales la restauración activa utilizando fragmentos de coral de oportunidad ha adquirido creciente relevancia.



**Objetivo:** Evaluar un enfoque de restauración de coral que implica el cultivo *in situ* de fragmentos de coral durante seis meses, seguido de su trasplante a un sitio de arrecife degradado como colonias establecidas.

**Métodos:** Los fragmentos de coral de oportunidad se recolectaron y cultivaron en viveros tipo mesa de septiembre de 2023 a marzo de 2024. Después de la fase de vivero, los fragmentos se trasplantaron al sitio de restauración utilizando bases de PVC fijadas al sustrato rocoso con plastilina epóxica. Las colonias trasplantadas se monitorearon *in situ* hasta marzo de 2025 para evaluar el crecimiento y la supervivencia.

**Resultados:** Durante la fase de vivero, los fragmentos cultivados exhibieron una extensión lineal neta media de 2.23 cm y una supervivencia del 100 %. Desde la etapa de vivero hasta el período post-trasplante, las tasas de crecimiento fueron 0.0127 cm día<sup>-1</sup> ( $r^2 = 0.99$ ,  $p = 1.10 \times 10^{-19}$ ) en altura, 0.0168 cm día<sup>-1</sup> ( $r^2 = 0.98$ ,  $p = 1.31 \times 10^{-18}$ ) en diámetro máximo, y 0.0163 cm día<sup>-1</sup> ( $r^2 = 0.96$ ,  $p = 1.80 \times 10^{-14}$ ) en diámetro mínimo. La supervivencia global después del trasplante fue del 82.5 %.

**Conclusiones:** Las tasas de crecimiento y supervivencia observadas son consistentes con los valores reportados previamente para *Pocillopora* en el Pacífico Oriental Tropical. Estos hallazgos respaldan la solidez y reproducibilidad de la metodología propuesta y resaltan su potencial para generar colonias de coral viables para su trasplante, mejorando así el éxito de la restauración en sistemas de arrecifes degradados.

**Palabras clave:** tasa de crecimiento; tasa de supervivencia; vivero; trasplante; restauración activa; Pichilingue.

## INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los arrecifes de coral han enfrentado una crisis sin precedentes, la sinergia entre presiones antropogénicas como contaminación, sobrepesca, destrucción de hábitat y malas prácticas turísticas, sumado a los efectos derivados del cambio climático como la acidificación del océano, el incremento sostenido en la temperatura superficial del mar y los eventos de blanqueamiento masivo, han provocado una disminución acelerada de la cobertura de coral (Ateweberhan et al., 2013; Hoegh-Guldberg et al., 2007; Reimer et al., 2024). Se estima que a nivel mundial se ha perdido entre el 50 % y el 80 % de la cobertura coralina (Eddy et al., 2021; Hoegh-Guldberg, 2001). Esta pérdida compromete su resiliencia y plantea un escenario crítico para el futuro de las comunidades coralinas.

Ante este panorama, la restauración activa de corales se presenta como una herramienta complementaria de las estrategias de conservación tradicionales (Boström-Einarsson et al., 2020). Esta práctica busca intervenir en áreas impactadas mediante acciones que promueven la recuperación de la cobertura coralina y de la estructura del arrecife (Tortolero-Langarica et al., 2014). Una de las metodologías más empleadas, debido a su relativa simplicidad,

es la colecta y el trasplante de fragmentos. Esta técnica puede realizarse de forma directa, fijando los fragmentos al sustrato, o mediante un periodo previo de cultivo en viveros, donde los fragmentos se desarrollan en condiciones que favorecen su crecimiento y supervivencia (Omori, 2019; Tortolero-Langarica et al., 2025). Los fragmentos son obtenidos de colonias adultas y sanas, llamadas colonias donadoras, o bien, se utilizan fragmentos de coral desprendidos naturalmente por efectos del oleaje o bioerosión, los cuales se nombran fragmentos de oportunidad (Monty et al., 2006). Paralelamente a esta técnica, también se ha optado por el uso de reclutas obtenidos mediante reproducción sexual. Esto implica la recolección de gametos durante eventos de desove sincronizado, su fertilización en condiciones controladas y el cultivo de larvas hasta alcanzar estadios tempranos de asentamiento (Baums et al., 2022). Ambas estrategias presentan ventajas y desafíos; la propagación asexual mediante fragmentos es rápida y de bajo costo, lo que permite un aumento moderado de la cobertura en poco tiempo, aunque limita la diversidad genética (Rinkevich, 2014). La propagación sexual, aunque más compleja y con tasas de supervivencia iniciales menores, enriquece la diversidad genotípica (Rinkevich, 1995). En el Pacífico mexicano, la conectividad de las

poblaciones de coral del género *Pocillopora* es limitada y la proporción de reclutas sexuales es baja (0.28 reclutas/m<sup>2</sup>) (Santiago-Valentín, et al., 2020), además de que la reproducción sexual se prolonga varios meses sin sincronía de las poblaciones (Chávez-Romo & Reyes-Bonilla, 2007), por lo cual, la reproducción por fragmentación es viable para mantener su dominancia en la comunidad (Aranceta-Garza et al., 2012; Pinzón et al., 2012).

En el Pacífico mexicano y el Golfo de California, las comunidades de coral están representadas por parches pequeños, aislados y con baja diversidad de especies (Reyes-Bonilla, 2003). El principal constructor de arrecifes es el coral ramificado *Pocillopora* (Glynn et al., 2017). En la Bahía de La Paz, los arrecifes han sido objeto de múltiples estudios ante la latente amenaza de eventos de blanqueamiento y su exitosa recuperación, siendo el más reciente el evento de 2023–2024, donde el blanqueamiento superó el 60 % de colonias en la Isla Espíritu Santo y Cabo Pulmo, sin embargo, sólo se registró 30 % de mortalidad (H. Reyes, comunicación personal, 2024), cifra considerablemente menor a la documentada en otras áreas del Pacífico, donde la mortalidad fue del 50–93 % (López-Pérez et al., 2024).

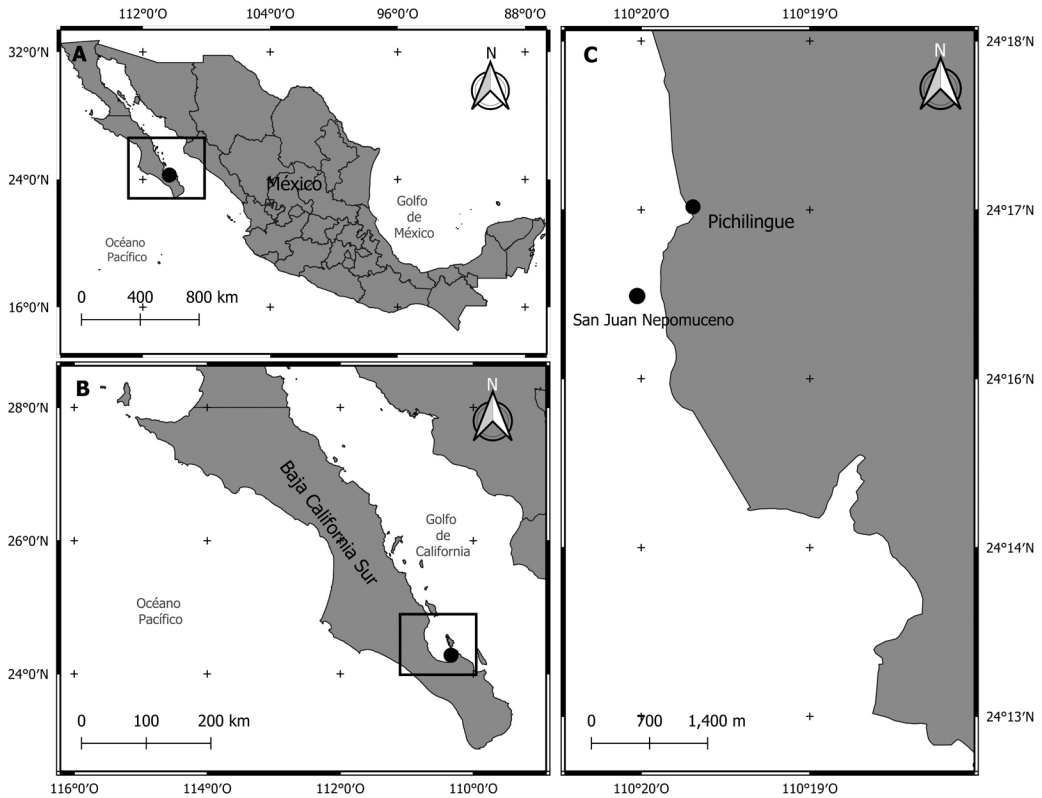
Desde 2021, la organización civil Efecto Arena ha implementado acciones de restauración activa en la Bahía de La Paz, enfocándose en el cultivo de fragmentos de oportunidad de *Pocillopora* en viveros *in situ* y su posterior trasplante en arrecifes. Este método de restauración ha sido poco explorado en la región, sin embargo, su enfoque representa una alternativa a las prácticas tradicionales, al aprovechar fragmentos naturalmente desprendidos y maximizar su viabilidad a través de un periodo de cultivo en viveros instalados temporalmente en un área donde las condiciones de temperatura, iluminación y protección favorecen su crecimiento para su posterior trasplante al arrecife, mediante técnicas adaptadas a las características locales. El presente estudio documenta los resultados de crecimiento y supervivencia mediante la técnica desarrollada, con el propósito de establecer una línea base que permita validar esta

metodología y facilitar su replicación en otras localidades de la región.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Área de estudio:** La Bahía de La Paz se ubica en la costa sureste de la península de Baja California, y abarca una superficie aproximada de 2 000 km<sup>2</sup>. Dentro de esta área se localiza la Bahía de Pichilingue (24°16.751'N, 110° 20.038'W), seleccionada como sitio para la instalación de viveros de cultivo debido a sus condiciones ambientales favorables. Esta bahía presenta una adecuada circulación de agua y una protección natural frente al oleaje y viento, lo que genera un ambiente estable para el desarrollo de los fragmentos en los viveros de cultivo. Los viveros fueron instalados a 5 metros de profundidad, próximos a la línea de costa, alejados a un arrecife natural en buen estado. Asimismo, se ubica la costa de San Juan Nepomuceno (24°16.409' N, 110° 20.299' W), área destinada a la restauración donde se trasplantaron los corales provenientes de los viveros (Fig. 1). Este sitio fue seleccionado debido a que, durante décadas, estuvo sujeto a la extracción de corales con fines comerciales, además, presenta un sustrato adecuado para la fijación y crecimiento de los organismos trasplantados. Cabe destacar que el acceso al área únicamente es posible por embarcación y que no constituye un atractivo turístico ni para visitantes ni para prestadores de servicios, lo que reduce significativamente las presiones externas sobre el área y favorece la viabilidad del proceso de restauración. La Bahía de La Paz se caracteriza por una marcada estacionalidad, con temperaturas mínimas de 18–22 °C durante el invierno (enero a marzo) y máximas de 29–31 °C en verano (julio a octubre) (Aviña-Hernández, 2018). Las concentraciones de clorofila varían entre 0.26 y 2.41 mg/lit<sup>-1</sup> a lo largo del año, alcanzando máximos asociados a eventos de surgencia o mezcla invernal (Cervantes-Duarte et al., 2004).

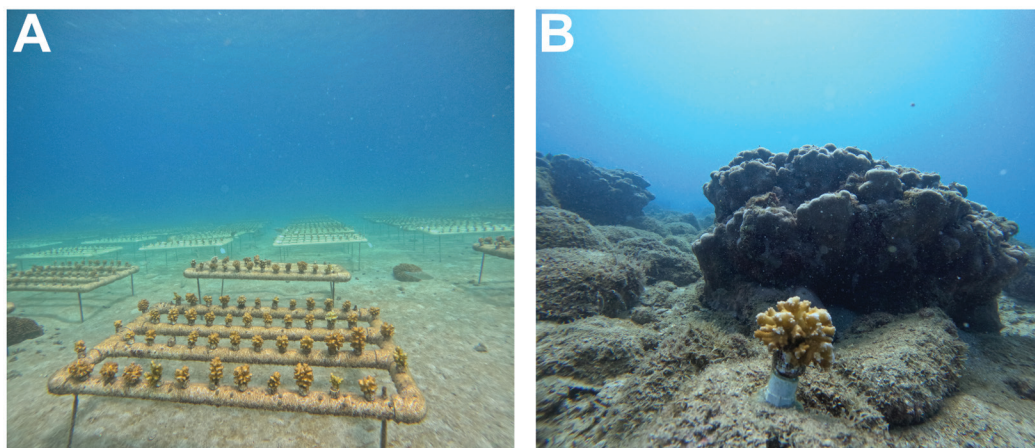
**Jardinería de coral:** La restauración de coral se llevó a cabo en dos fases. En la primera



**Fig. 1.** Área de estudio. A. Península de Baja California. B. Bahía de La Paz. C. Bahía de Pichilingue y sitio de restauración en San Juan Nepomuceno. / **Fig. 1.** Study area. A. Baja California Peninsula. B. La Paz Bay. C. Pichilingue Bay and restoration site at San Juan Nepomuceno.

se colectaron fragmentos de oportunidad del género *Pocillopora* en arrecifes sanos de la Bahía de La Paz, específicamente en Pichilingue, San Juan Nepomuceno y el Islote San Rafaelito, seleccionados por su resiliencia ante eventos de blanqueamiento, su cobertura de coral vivo (~30-60 %), y por su proximidad tanto a los viveros como al área de restauración. Posteriormente, estos fragmentos fueron cultivados durante 6 meses en viveros *in situ* tipo mesa, tiempo necesario para que crezcan, se ramifiquen y se desarrollen en nuevas colonias. Los viveros fueron construidos a partir de tubos de PVC hidráulico de 1 ½ pulgadas (in), formando un rectángulo de 1.2 m de largo por 70 cm de ancho, ensamblado mediante codos de 90°. En su interior se dispone una retícula de tubería de las mismas dimensiones, integrada por dos

“T” y dos tubos adicionales. Cada tubo tiene perforaciones cada 10 cm de ½ pulgada (in) de diámetro, en las que se inserta un adaptador macho del mismo diámetro. En cada vértice del vivero se coloca un tornillo de acero galvanizado de 50 cm de longitud que permite anclarlo al fondo arenoso. Esta condición facilita que, una vez desocupados, puedan ser desinstalados y trasladados a tierra para su limpieza y mantenimiento, evitando que se conviertan en estructuras permanentes en el mar. Cada vivero puede cultivar 50 fragmentos de coral (Robles-Payán et al., 2021). Los fragmentos tenían una altura inicial de  $5 \pm 1.5$  cm y fueron fijados al adaptador macho con plastilina epóxica, embebiendo una tercera parte del fragmento en la plastilina; consecuentemente, la altura del fragmento se redujo unos



**Fig. 2.** Jardinería de coral en la Bahía de Pichilingue. **A.** Vivero con 50 fragmentos de coral. **B.** Coral trasplantado de ~6 cm de altura empleando los adaptadores de PVC. / **Fig. 2.** Coral gardening in Pichilingue Bay. **A.** Coral nursery with 50 fragments. **B.** Outplanting coral ~ 6 cm in height using PVC adapters.

centímetros (Fig. 2). Durante el periodo de cultivo no fue necesaria la limpieza o mantenimiento de los viveros. La segunda fase comprendió el trasplante de los fragmentos en los viveros hacia una parcela de aproximadamente 49 m<sup>2</sup> en San Juan Nepomuceno. Para ello, se fijaron adaptadores hembra de ½ pulgada (in) utilizando plastilina epóxica sobre el sustrato rocoso. La colocación de las bases se realizó de la siguiente manera: se identificaron cavidades o grietas naturales en las rocas, que se limpiaron con cepillos de cerdas duras para eliminar sedimentos, algas y organismos incrustantes que pudieran interferir con la adherencia. Posteriormente, se aplicó una pequeña porción de plastilina epóxica en la grieta y, con ayuda de un martillo, se embebió el adaptador hembra en el sustrato, los cuales se encuentran distribuidos de manera aleatoria, de acuerdo con la disponibilidad del sustrato, a una distancia mínima de 60 cm uno del otro. La plastilina epóxica inició su proceso de solidificación a los 15 minutos, sin embargo, para garantizar que estuviera completamente endurecida, el trasplante se realizó después de 24 horas (Fig. 2). Todas las acciones de colecta, manipulación y restauración se realizaron bajo el

respaldo de los Permisos de Pesca de Fomento PPF/DGOPA-052/21 y PPF/DGOPA-052/25.

**Monitoreo y análisis de datos:** Para evaluar el desarrollo de los fragmentos en los viveros de cultivo, se realizaron monitoreos mensuales de crecimiento y supervivencia tanto en el periodo de cultivo en los viveros (de septiembre 2023 a marzo 2024) como en la parcela de restauración (de marzo 2024 a marzo 2025). El crecimiento se registró con las medidas de altura, diámetro mayor y diámetro menor con ayuda de un vernier graduado en  $n = 30$  fragmentos de los viveros y  $n = 40$  colonias de la parcela de restauración, esta diferencia se consideró para mantener un tamaño de muestra representativo frente a la posible mortalidad natural en campo. Con los datos obtenidos, se calculó el promedio de cada variable ( $\pm$  error estándar). A partir de la medición de las tres dimensiones, se calculó el volumen ( $V = l_1 \cdot l_2 \cdot l_3$ ; Robles-Payán et al., 2021). Las tasas de crecimiento y supervivencia se obtuvieron mediante regresiones lineales simples para las variables y se aplicó una regresión exponencial positiva para los datos de volumen, empleando el software RStudio (Posit Team, 2025).

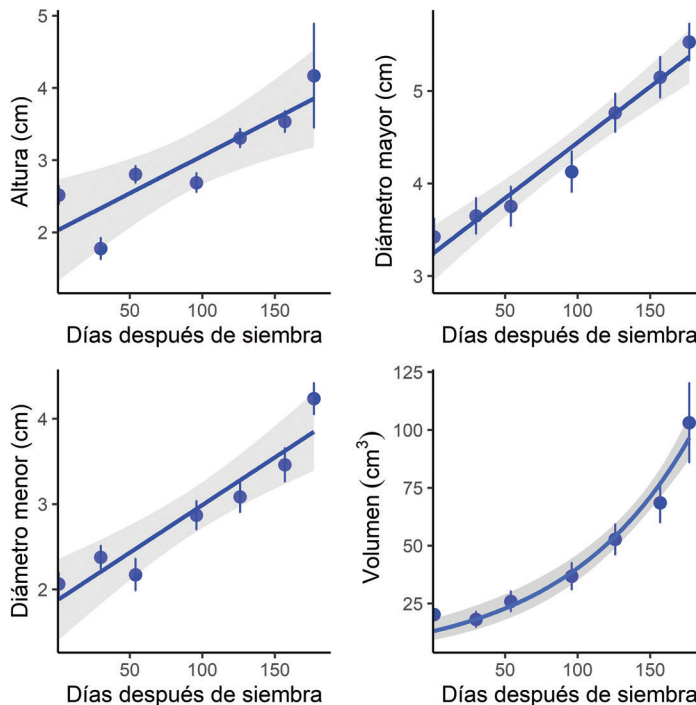
## RESULTADOS

Después de 184 días de cultivo de los fragmentos de coral en el vivero, se registró un crecimiento significativo en las variables morfológicas. La altura de los fragmentos incrementó de  $1.34 \pm 0.06$  cm a  $3.57 \pm 0.16$  cm, equivalente a un incremento neto de 2.23 cm (Fig. 3). El diámetro mayor mostró un aumento de  $2.05 \pm 0.10$  cm a  $4.48 \pm 0.18$  cm (incremento neto de 2.43 cm) (Fig. 3), mientras que el diámetro menor creció de  $1.49 \pm 0.08$  cm a  $2.47 \pm 0.10$  cm (incremento neto de 0.98 cm) (Fig. 3). El volumen de los fragmentos aumentó de  $4.34 \pm 0.50$  cm<sup>3</sup> a  $43.12 \pm 4.53$  cm<sup>3</sup> (Fig. 3), lo que representa un incremento neto de 38.78 cm<sup>3</sup>, equivalente a un crecimiento volumétrico de aproximadamente 894 % respecto al volumen inicial.

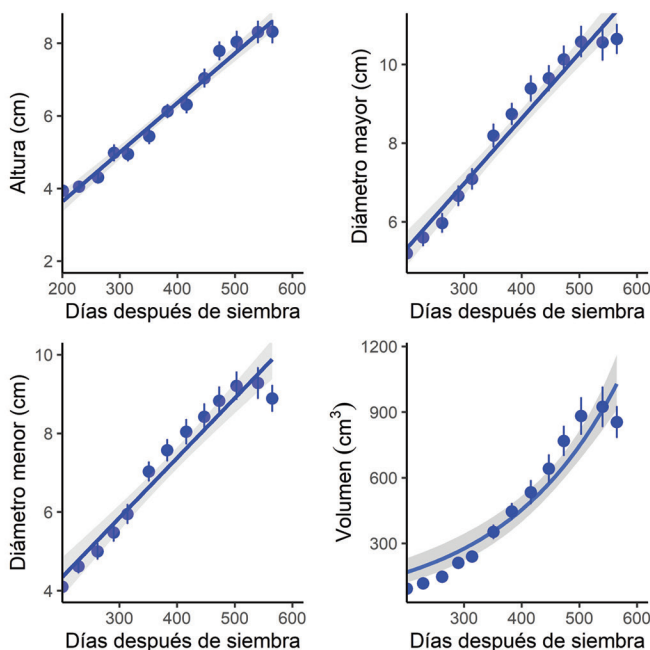
Los datos obtenidos después de 565 días de monitoreo en la parcela de restauración

mostraron crecimiento; la altura de los fragmentos incrementó de  $3.94 \pm 0.13$  cm a  $8.31 \pm 0.32$  cm (Fig. 4), representando un incremento neto de 4.37 cm. El diámetro mayor aumentó de  $5.20 \pm 0.21$  cm a  $10.64 \pm 0.37$  cm (incremento neto de 5.44 cm), mientras que el diámetro menor creció de  $4.10 \pm 0.16$  cm a  $8.89 \pm 0.33$  cm (incremento neto de 4.79 cm) (Fig. 4). El volumen aumentó de  $93.21 \pm 9.12$  cm<sup>3</sup> a  $854.33 \pm 71.93$  cm<sup>3</sup> (Fig. 4), lo que representa un incremento neto de 761.11 cm<sup>3</sup>, equivalente a un crecimiento volumétrico de aproximadamente 817 % respecto al volumen inicial de trasplante.

Las tasas de crecimiento se calcularon a partir de los datos del vivero de cultivo y de la parcela de restauración (565 días). La altura presentó un valor de 0.0127 cm/día ( $r^2 = 0.99$ ,  $p = 1.10e-19$ ), el diámetro mayor 0.0168 cm/día ( $r^2 = 0.98$ ,  $p = 1.31165e-18$ ) y el diámetro menor 0.0163 cm/día ( $r^2 = 0.96$ ,  $p = 1.79886e-14$ ). El volumen se describió con la ecuación



**Fig. 3.** Tasa de crecimiento apical y radial, así como el incremento en el volumen de los fragmentos de coral en el vivero de cultivo; la sombra representa el error de la dispersión y las barras el error estándar de cada muestra ( $n = 30$ ). / **Fig. 3.** Apical and radial growth rate, as well as the increase in the volume of coral fragments in the culture nursery; the shade represents the dispersion error and the bars the standard error of each sample ( $n = 30$ ).



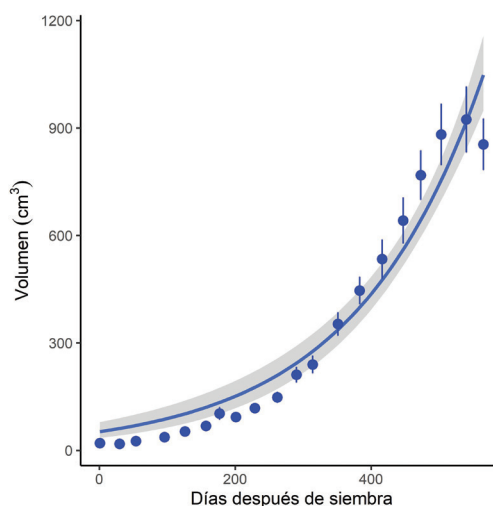
**Fig. 4.** Tasa de crecimiento apical y radial, así como el incremento en el volumen de los fragmentos de coral transplantados en San Juan Nepomuceno. El área sombreada representa el error de la dispersión, y las barras, el error estándar de cada muestra (n = 40). / **Fig. 4.** Apical and radial growth rate, as well as the increase in volume of transplanted coral fragments in San Juan Nepomuceno. The shaded area represents the dispersion error, and the bars, the standard error of each sample (n = 40).

exponencial positiva  $y = 8.7753e0.0095x$  ( $r^2 = 0.88$ ,  $p = 2.92963e^{-10}$ ), que permite calcular la tasa de crecimiento para cada día (x) ya que esta varía a lo largo de la vida del coral, se observó que el crecimiento de esta variable fue constante en el vivero de cultivo y posterior al trasplante (Fig. 5).

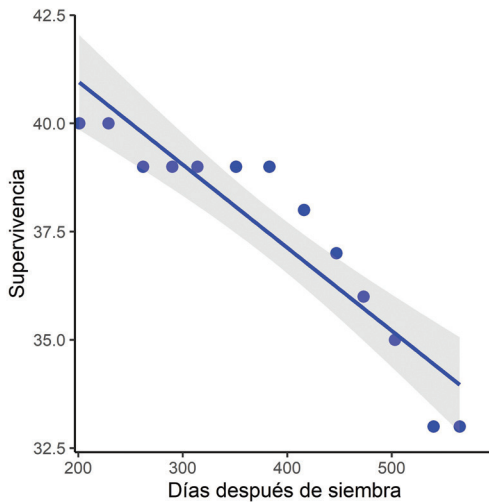
La supervivencia de los fragmentos de coral al término del periodo de cultivo en el vivero fue de 100 % (184 días) y en la parcela de restauración fue de 82.5 % (364 días) (Fig. 6), de los cuales la mortalidad de 3 corales fue por blanqueamiento total (7.5 %), 3 corales se rompieron desde la base (7.5 %) y un adaptador hembra que no se adhirió correctamente al sustrato rocoso (2.5 %). La tasa de mortalidad obtenida fue de 0.048 org/día ( $r^2 = 0.86$ ,  $p = 4.688e^{-06}$ ).

## DISCUSIÓN

Las metodologías empleadas en programas de restauración coralina en el Pacífico Oriental



**Fig. 5.** Cambio en el volumen de los fragmentos de coral a lo largo de los 565 días de crecimiento; la sombra representa el error de dispersión y las barras el error estándar de cada muestra. / **Fig. 5.** Change in the volume of coral fragments over the 565 days of growth; the shade represents the scattering error and the bars the standard error of each sample.



**Fig. 6.** Supervivencia de los corales en la parcela de restauración en San Juan Nepomuceno, la sombra representa el error de la dispersión y las barras el error estándar de cada muestra. / **Fig. 6.** Survival of corals in the restoration plot at San Juan Nepomuceno, the shaded area represents the dispersion error, and the bars indicate the standard error for each sample.

Tropical y Pacífico mexicano incluyen: cultivo *ex situ* en sistemas de recirculación y variables controladas, viveros *in situ* anclados al fondo o suspendidos en la columna de agua, microfragmentación con trasplante directo y jardinería coralina con fragmentos de oportunidad (Boström-Einarsson et al., 2020; Tortolero-Langarica et al., 2025). Cada metodología presenta ventajas y limitaciones específicas que se adaptan a las características físicas del arrecife a intervenir e influyen en las tasas de crecimiento y supervivencia.

La metodología propuesta en este trabajo para la propagación de los corales del género *Pocillopora* en la Bahía de La Paz consta de dos etapas diferenciadas: la colecta de fragmentos de oportunidad para su cultivo en viveros tipo mesa y el trasplante de las colonias al sitio en restauración utilizando adaptadores de PVC. Hasta el momento, no hemos evaluado el uso de otro tipo de vivero; sin embargo, consideramos que el diseño empleado es adecuado para el área donde se localizan los viveros en la Bahía de Pichilingue, dado que se trata de

una bahía relativamente somera. Los viveros a media agua suelen instalarse en zonas con mayor profundidad a la que presenta esta bahía. Por otro lado, debido al crecimiento ramificado de los corales del género *Pocillopora*, un vivero de fondo resulta más apropiado para soportar el peso de su densa estructura de carbonato de calcio. El material seleccionado para la construcción de los viveros fue el PVC, por tratarse de un material duradero e inerte, y el diseño de los viveros hace que su instalación no sea invasiva. La implementación de una fase de cultivo previa a su trasplante permite cultivar fragmentos pequeños en condiciones controladas, lo que reduce la mortalidad inicial y aumenta las tasas de crecimiento (Rinkevich, 2025). Por otro lado, el uso de adaptadores de PVC en el trasplante de corales ofrece un soporte firme, capaz de fijarse a diferentes tipos de sustratos rocosos, como cavidades o grietas naturales. Además, facilita la reposición del coral trasplantado en caso de que este muera por causas ambientales, lo que garantiza la continuidad del proceso de restauración.

Los resultados de crecimiento y supervivencia reportados en este trabajo se encuentran en el rango reportado por otros autores en el Pacífico mexicano utilizando fragmentos de oportunidad con trasplante directo (Martínez-Castillo et al., 2023, Rodríguez-Troncoso et al., 2023), microfragmentación (Tortolero-Langarica et al. 2020) o viveros de PVC con algunas variantes (García-Medrano et al. 2023), aproximadamente 4 cm anuales en la variable de altura y 58–96 % de supervivencia (Tabla 1). En este trabajo la supervivencia fue del 82.5 % y las pérdidas sólo fueron del 7 % por mortalidad real, el resto fueron corales que se rompieron o su base de siembra se despegó. Al tratarse de un método que emplea resina epóxica como adhesivo para fijar los fragmentos y los adaptadores de PVC, es fundamental asegurar que la mezcla se realice correctamente y que la aplicación se lleve a cabo sobre una superficie limpia y rugosa, lo cual garantiza una adherencia adecuada.

El volumen reportado en este estudio se estimó mediante la multiplicación de las variantes morfométricas de altura, diámetro

**Tabla 1**

Tasas de crecimiento anuales reportadas en trabajos de restauración del género *Pocillopora* en el Pacífico mexicano. /  
**Table 1.** Annual growth rates reported in restoration studies of the genus *Pocillopora* in the Mexican Pacific.

Técnica de restauración	Sitio (Pacífico mexicano)	Crecimiento	Supervivencia %	Autor
Vivero tipo mesa	Bahía de Pichilingue	4.45 cm/año	100	Este estudio
Trasplante en adaptadores de PVC	Bahía de Pichilingue	4.95 cm/año	82.5	Este estudio
Vivero tipo mesa con malla	Huatulco	4.35 cm/año	96.4	García-Medrano et al. (2023)
Trasplante directo de fragmentos de oportunidad	Punta de Mita	4.25 ± 0.15 cm/año	38–76	Martínez-Castillo et al. (2023)
Vivero tipo mesa	Bahía de Pichilingue	4.63 ± 0.24 cm/año	95	Robles-Payán et al. (2021)
Trasplante directo de fragmentos de oportunidad	Islas Marietas y Cuastecomates	2.0 – 8.0 cm/año	61.6 – 68	Rodríguez-Troncoso et al. (2023)
Microfragmentación	Islas Marias	4.16 ± 1.02 cm/año	58	Tortolero-Langarica et al. (2020)

mayor y diámetro menor, lo que resultó en un incremento volumétrico del 894 % respecto al volumen inicial de los fragmentos en vivero y del 817 % en los corales trasplantados en la parcela de restauración. Consideramos que este elevado incremento se relaciona tanto con las condiciones óptimas de iluminación, temperatura y protección presentes en los viveros y en la parcela de restauración, como con la influencia positiva del método de trasplante en el desarrollo de los corales. Sin embargo, consideramos que esta aproximación tiende a sobreestimar el volumen real, dado que asume una geometría regular, mientras que en la práctica los corales presentan ramificaciones y espacios vacíos que no son capturados por este modelo simplificado.

El sitio seleccionado para la instalación de los viveros se debió a la protección que ofrece la costa en la localidad, a la cercanía de un arrecife sano y a la homogeneidad de la profundidad para su instalación. El sitio en restauración San Juan Nepomuceno fue explotado durante décadas para la extracción de corales, que se vendían a los turistas que visitaban la localidad, hasta hace ocho años, cuando se realizaron modificaciones en el malecón de la ciudad de La Paz y se prohibió el comercio de corales.

Los trabajos de restauración en curso se encuentran bajo un monitoreo sistemático, con el propósito de generar una base de datos que permita documentar el crecimiento, la supervivencia y la contribución en volumen de los corales en los sitios intervenidos. Estos tres indicadores constituyen un primer acercamiento para evaluar la metodología, diseñada para ser factible, reproducible y orientada a la producción de nuevas colonias que puedan utilizarse en la siembra de áreas de restauración, maximizando así el éxito en los esfuerzos de recuperación y permanencia de estos ecosistemas.

Esta metodología ha permitido que las acciones de restauración en la Bahía de La Paz alcancen resultados significativos, logrando la recuperación de cerca de 12 mil corales. La fase de viveros ha sido clave para escalar los esfuerzos de restauración, generando una capacidad constante de repoblamiento coralino y asegurando la disponibilidad de colonias para su trasplante posterior. Por otro lado, el uso de adaptadores de PVC fijos con plastilina epóxica ha ofrecido una solución eficaz frente a las características físicas del sustrato rocoso en San Juan Nepomuceno, a diferencia de otras técnicas, como atar los fragmentos con cincho



al sustrato, que no pueden aplicarse en estos arrecifes, este enfoque se adapta mejor a las condiciones locales.

**Declaración de ética:** Los autores declaran que todos están de acuerdo con esta publicación y que han hecho aportes que justifican su autoría; que no hay conflicto de interés de ningún tipo; y que han cumplido con todos los requisitos y procedimientos éticos y legales pertinentes. Todas las fuentes de financiamiento se detallan plena y claramente en la sección de agradecimientos. El respectivo documento legal firmado se encuentra en los archivos de la revista.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la valiosa colaboración de todo el equipo de Efecto Arena A.C., en particular el trabajo de Leopoldo López Contreras, Azucena Villegas Parada, Diego Alexis Monteagudo Hernández, Barush Daniel Salas Espinoza, Miriam Rebeca Cortes González, Yesica Aracely Cota Loera, Oziel Alejandro Tovar Corpus, Fernanda Sánchez Guevara y Valeria Huerta Hernández. A Baja Ferries S.A. de C.V y Paul M. Angel Family Foundation por el financiamiento para poder realizar este proyecto de restauración.

## REFERENCIAS

- Aranceta-Garza, F., Balart, E. F., Reyes-Bonilla, H., & Cruz-Hernández, P. (2012). Effect of tropical storms on sexual and asexual reproduction in coral *Pocillopora verrucosa* subpopulations in the Gulf of California. *Coral Reefs*, 31(4), 1157–1167. <https://doi.org/10.1007/s00338-012-0941-9>
- Ateweberhan, M., Feary, D. A., Keshavmurthy, S., Chen, A., Schleyer, M. H., & Sheppard, C. R. (2013). Climate change impacts on coral reefs: synergies with local effects, possibilities for acclimation, and management implications. *Marine Pollution Bulletin*, 74(2), 526–539. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.06.011>
- Aviña-Hernández, R. J. (2018). *Estimación de parámetros ambientales a partir de imágenes Landsat 8 y mediciones in situ, en Bahía de La Paz, BCS* (Tesis de maestría). Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., México. <https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1001/1381>
- Baums, I. B., Chamberland, V. F., Locatelli, N. S., & Conn, T. (2022). Maximizing genetic diversity in coral restoration projects. En M. J. H. Van Oppen, & M. Aranda-Lastra (Eds), *Coral Reef Conservation and Restoration in the Omics Age* (Coral Reefs of the World, Vol 15, pp. 35–53). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-07055-6\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-07055-6_3)
- Boström-Einarsson, L., Babcock, R. C., Bayraktarov, E., Ceccarelli, D., Cook, N., Ferse, S. C. A., Hancock, B., Harrison, P., Hein, M., Shaver, E., Smith, A., Suggett, D. J., Stewart-Sinclair, P., Vardi, T., & McLeod, I. M. (2020). Coral restoration-A systematic review of current methods, successes, failures and future directions. *PLoS One*, 15, e0226631. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226631>
- Cervantes-Duarte, R., Valdez-Holguín, J. E., & Reyes-Salinas, A. (2004). Comparación de reflectancia in situ 443/555 y 490/555 con clorofila a y materia suspendida total en bahía de La Paz, BCS, México. *Hidrobiológica*, 14, 11–17.
- Chávez-Romo, H. E., & Reyes-Bonilla, H. (2007). Reproducción sexual del coral *Pocillopora damicornis* al sur del Golfo de California, México. *Ciencias Marinas*, 33(4), 495–501.
- Eddy, T. D., Lam, V. W. Y., Reygondeau, G., Cisneros-Montemayor, A. M., Greer, K., Palomares, M. L. D., Bruno, J. F., Ota, Y., & Cheung, W. W. L. (2021). Global decline in capacity of coral reefs to provide ecosystem services. *One Earth*, 4(9), 1278–1285. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.08.016>
- García-Medrano, D., López-Pérez, A., Guendulain-García, S., Valencia-Méndez, O., Granja-Fernández, R., González-Mendoza, T., & Torres-Hernández P. (2023). Gardening *Pocillopora* spp. fragments and their potential for rebuilding reef systems in the southern Mexican Pacific. *Restoration Ecology*, 31(8), e14006. <https://doi.org/10.1111/rec.14006>
- Glynn, P. W., Alvarado, J. J., Banks, S., Cortés, J., Feingold, J. S., Jiménez, C., Maragos, J. E., Martínez, P., Maté, J. L., Moanga, D. A., Navarrete, S., Reyes-Bonilla, H., Riegl, B., Rivera, F., Vargas-Ángel, B., Wieters, E. A., & Zapata, F. A. (2017). Eastern Pacific coral reef provinces, coral community structure and composition: An overview. En P. W. Glynn, D. P. Manzello, & I. C. Enochs (Eds.), *Coral reefs of the Eastern Tropical Pacific: Persistence and loss in a dynamic environment* (pp. 107–176). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-7499-4\\_5](https://doi.org/10.1007/978-94-017-7499-4_5)
- Hoegh-Guldberg, O. (2001). Sizing the impact: Coral reef ecosystems as early casualties of climate change. En G. R. Walther, C. A. Burga, & P. J. Edwards (Eds.), *"Fingerprints" of climate change. Adapted behaviour and shifting species ranges*. (pp. 203–228). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8692-4\\_13](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8692-4_13)

- Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P. J., Hooten, A. J., Steneck, R. S., Greenfield, P., Gomez, E., Harvell, D., Sale, P. F., Edwards, A. J., Caldeira, K., Knowlton, N., Eakin, C. M., Iglesias-Prieto, R., Muthiga, N., Bradbury, R. H., Dubi, A., & Hatzioiols, M. E. (2007). Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science*, 318(5857), 1737–1742. <https://doi.org/10.1126/science.1152509>
- López-Pérez, A., Granja-Fernández, R., Ramírez-Chavez, E., Valencia-Méndez, O., Rodríguez-Zaragoza, F. A., González-Mendoza, T., & Martínez-Castro, A. (2024). Widespread coral bleaching and mass mortality of reef-building corals in southern Mexican Pacific reefs due to 2023 El Niño warming. *Oceans*, 5(2), 234–248. <https://doi.org/10.3390/oceans5020012>
- Martínez-Castillo, V., Rodríguez-Troncoso, A. P., Tortolero-Langarica, J. J. A., & Cupul-Magaña, A. L. (2023). Active restoration efforts in the Central Mexican Pacific as a strategy for coral reef recovery. *Revista de Biología Tropical*, 71(S1), e54795. <https://doi.org/10.15517/rev.biol.trop.v71iS1.54795>
- Monty, J. A., Gillian, D. S., Banks, K., Stout, D. K., & Dodge, D. E. (2006). Coral of opportunity survivorship and the use of coral nurseries in coral reef restoration. *Marine & Environmental Sciences Faculty Proceedings, Presentations, Speeches, Lectures*, 31, 1665–1673. [https://nsuworks.nova.edu/occ\\_facpresentations/31](https://nsuworks.nova.edu/occ_facpresentations/31)
- Omori, M. (2019). Coral restoration research and technical developments: what we have learned so far. *Marine Biology Research*, 15(7), 377–409. <https://doi.org/10.1080/17451000.2019.1662050>
- Pinzón, J. H., Reyes-Bonilla, H., Baums, I. B., & LaJeunesse, T. C. (2012). Contrasting clonal structure among *Pocillopora* (Scleractinia) communities at two environmentally distinct sites in the Gulf of California. *Coral Reefs*, 31(3), 765–777. <https://doi.org/10.1007/s00338-012-0887-y>
- Posit Team. (2025). *RStudio: Integrated Development Environment for R. Posit Software*. [Computer software] <http://www.posit.com/>.
- Reimer, J. D., Peixoto, R. S., Davies, S. W., Traylor-Knowles, N., Short, M. L., Cabral-Tena, R. A., Burt, J. A., Pessoa, I., Banaszak, A. T., Winters, R. S., Moore, T., Schoepf, V., Kaullysing, D., Calderon-Aguilera, L. E., Wörheide, G., Harding, S., Munbodhe, V., Mayfield, A., Ainsworth, T., ... Voolstra C. R. (2024). The fourth global coral bleaching event: where do we go from here? *Coral Reefs*, 43(4), 1121–1125. <https://doi.org/10.1007/s00338-024-02504-w>
- Reyes-Bonilla, H. (2003). Coral reefs of the Pacific coast of México. En J. Cortés (Ed.), *Latin American Coral Reefs* (pp. 331–349). Elsevier Science. <https://doi.org/10.1016/B978-0-44451388-5/50015-1>
- Rinkevich, B. (1995). Restoration strategies for coral reefs damaged by recreational activities: the use of sexual and asexual recruits. *Restoration Ecology*, 3(4), 241–251. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.1995.tb00091.x>
- Rinkevich, B. (2014). Rebuilding coral reefs: does active reef restoration lead to sustainable reefs?. *Environmental Sustainability*, 7, 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.11.018>
- Rinkevich, B. (2025). Forethoughtful coral nurseries: alleviating climate change impediments on the reefs of tomorrow. *Discover Oceans*, 2, 21. <https://doi.org/10.1007/s44289-025-00062-9>
- Robles-Payán, A., Héctor Reyes-Bonilla, H., & Cáceres-Martínez, C. (2021). Crecimiento y supervivencia de corales durante la fase inicial de cultivo en La Paz, Baja California Sur, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 92, e923594. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2021.92.3594>
- Rodríguez-Troncoso, A. P., Tortolero-Langarica, J. J. A., Medellín-López, P. C., Canizales-Flores, H. M., Godínez-Domínguez, E., & Cupul-Magaña, A. L. (2023). Evaluación de los indicadores demográficos de *Pocillopora* (Scleractinia: Pocilloporidae) en sitios insulares vs. costeros: implicaciones para un programa de restauración regional. *Revista de Biología Tropical*, 71(S1), e54790. <https://doi.org/10.15517/rev.biol.trop.v71iS1.54790>
- Santiago-Valentín, J. D., Rodríguez-Troncoso, A. P., Bautista-Guerrero, E., López-Pérez, A., & Cupul-Magaña, A. L. (2020). Settlement ecology of scleractinian corals of the Northeastern Tropical Pacific. *Coral Reefs*, 39(1), 133–146. <https://doi.org/10.1007/s00338-019-01872-y>
- Tortolero-Langarica, J. J. A., Cupul-Magaña, A. L., & Rodríguez-Troncoso, A. P. (2014). Restoration of a degraded coral reef using a natural remediation process: A case study from a Central Mexican Pacific National Park. *Ocean & Coastal Management*, 96, 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.04.020>
- Tortolero-Langarica, J. J. A., Rodríguez-Troncoso, A. P., Cupul-Magaña, A. L., & Rinkevich, B. (2020). Micro-Fragmentation as an effective and applied tool to restore remote reefs in the Eastern Tropical Pacific. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(18), 6574. <https://doi.org/10.3390/ijerph17186574>
- Tortolero-Langarica, J. J. A., Rodríguez-Troncoso, A. P., & Nava, H. (2025). Advances in coral reef restoration in the Mexican Pacific: active interventions and scaling approaches. *Restoration Ecology*, e70176. <https://doi.org/10.1111/rec.70176>