

UNIVERSIDAD INTERAMERICANA DE PUERTO RICO
RECINTO DE SAN GERMÁN
DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA, QUÍMICA Y CIENCIAS DEL AMBIENTE
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

**METAANÁLISIS COMPARATIVO DEL EFECTO DE LA ACIDIFICACIÓN
DEL AGUA MARINA SOBRE LA TASA DE CALCIFICACIÓN EN
CORALES MASIVOS Y CORALES RAMIFICADOS DEL CARIBE**

RAIAN A. RODRÍGUEZ MATTEI

05/2026

UNIVERSIDAD INTERAMERICANA DE PUERTO RICO
RECINTO DE SAN GERMÁN
DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA, QUÍMICA Y CIENCIAS DEL AMBIENTE
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Tesis presentada y aprobada para completar los requisitos para el grado de Maestría en
Ciencias en Ciencias Ambientales
Biología Ambiental

**METAANÁLISIS COMPARATIVO DEL EFECTO DE LA ACIDIFICACIÓN
DEL AGUA MARINA SOBRE LA TASA DE CALCIFICACIÓN EN
CORALES MASIVOS Y CORALES RAMIFICADOS
DEL CARIBE**

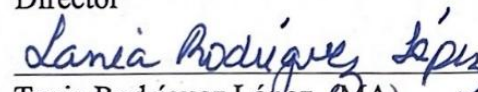
RAIAN A. RODRÍGUEZ MATTEI

Mayo, 2026

Miembros del Comité de Tesis


Carlos Linares Medina, (PhD)
Director

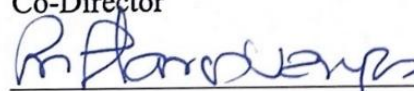
13 de mayo de 2026
Fecha


Tania Rodríguez López, (MA)
Co-Directora

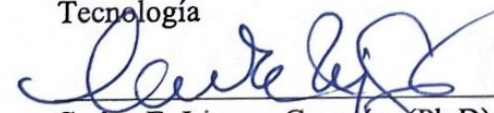
13 de mayo de 2026
Fecha


Axel Vélez, (MSChE)
Co-Director

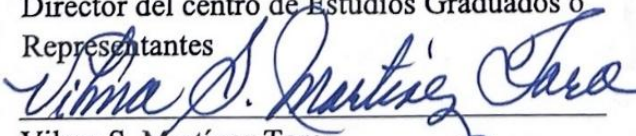
13 de mayo de 2026
Fecha


Lina Llanos Vargas, (Ph.D)
Directora del Departamento de Ciencias y
Tecnología

13 de mayo 2026
Fecha


Carlos E. Irizarry Guzmán, (Ph.D)
Director del centro de Estudios Graduados o
Representantes

14 de mayo de 2026
Fecha


Vilma S. Martínez Toro
Decana de asuntos académicos

14/mayo/2026
Fecha

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	5
VARIABLES.....	7
DEDICATORIA	8
AGRADECIMIENTOS.....	9
INTRODUCCIÓN	10
Capítulo I. Planteamiento de la investigación.....	12
1.1 Justificación:	12
1.2 Problema de investigación:	15
1.3 Objetivo general	17
1.4 Objetivos específicos	17
1.5 Antecedentes	18
1.6 Estado actual del tema	20
1.7 Estudios experimentales recientes	23
1.8 Situación del Caribe y Puerto Rico	25
Capítulo II. Revisión de literatura:	26
2.1 Biología de los corales	26
2.2 Acidificación oceánica.....	27
2.3 Descripción del área de estudio	29
2.4 Hábitat presente.....	32
2.5 Estudios de caso y situación en Puerto Rico.....	33
Capítulo III. Metodología	35
3.1 Introducción.....	35
3.2 Diseño de la investigación	37
3.3 Población y muestra	39
3.4 Variables	40
3.5 Instrumentos de investigación	41
3.6 Procedimiento.....	42
Capítulo IV. Resultados	44
4.1 Análisis de los datos	44
Capítulo V. Discusión.....	80

5.1 Conclusiones	81
5.2 Recomendaciones.....	82
Referencias bibliográficas	84

LISTA DE FIGURAS

Figura #1- Tabla 1- Estudios incluidos en el metaanálisis sobre acidificación y calcificación coralina en el Caribe

Figura #2- Tabla 2- Rangos de pH y condiciones de acidificación evaluadas en estudios seleccionados

Figura #3- Tabla 3- Respuesta general de la tasa de calcificación según morfología coralina

Figura #4- Tabla 4- Factores ambientales que interactúan con la acidificación y la calcificación coralina

Figura #5- Tabla 5- Evidencia específica relevante para Puerto Rico y el Caribe

Figura #6- Tabla 6- Cambio porcentual promedio en la tasa de calcificación coralina bajo pH reducido

Figura #7- Tabla 7- Efecto relativo de la acidificación vs calentamiento sobre la calcificación en el Caribe

Figura #8- Tabla 8- Diferencia relativa en calcificación entre especies tolerantes y sensibles al pH bajo

Figura #9- Tabla 9- Calcificación relativa bajo pH estable vs pH fluctuante

Figura #10- Tabla 10- Comparación de calcificación relativa entre corales masivos y ramificados bajo acidificación prolongada

Figura #11- Tabla 11- Calcificación relativa de corales bajo distintos niveles de pH

Figura #12- Tabla 12- Calcificación relativa por morfología coralina bajo acidificación

Figura #13- Tabla 13- Comparación interespecífica de calcificación bajo pH reducido en el Caribe

Figura #14- Tabla 14- Efecto combinado de acidificación y temperatura sobre la calcificación

Figura #15- Tabla 15- Calcificación relativa según tipo de hábitat en Puerto Rico

Figura #16- Gráfica de la tabla #6- Cambio porcentual promedio en la tasa de calcificación coralina bajo pH reducido

Figura #17- Gráfica de la tabla #7- Efecto de distintos estresores ambientales sobre la calcificación

Figura #18- Gráfica de la tabla #8- Diferencias en la respuesta de especies tolerantes y sensibles al pH bajo

Figura #19- Gráfica de la tabla #9- Efecto de la estabilidad del pH sobre la calcificación

Figura #20- Gráfica de la tabla #10- Comparación de la calcificación relativa según la morfología coralina

Figura #21- Gráfica de la tabla #11- Relación entre gradiente de pH y calcificación relativa

Figura #22- Gráfica de la tabla #12- Variación de la calcificación según el tipo morfológico

Figura #23- Gráfica de la tabla #13- Respuesta interespecífica de corales caribeños al pH reducido

Figura #24- Gráfica de la tabla #14- Efecto combinado de acidificación y temperatura elevada

Figura #25- Gráfica de la tabla #15- Influencia del tipo de hábitat en la calcificación coralina

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Diferencias en las tasas de calcificación reportadas en la literatura científica bajo condiciones de pH reducido entre corales masivos (por ejemplo, *Montastraea/Orbicella*, *Colpophyllia*, *Diploria*, *Pseudodiploria*) y corales ramificados (por ejemplo, *Acropora*, *Madracis*, *Porites*) en arrecifes del Caribe?

HIPÓTESIS ALTERNA (H₁)

Existen diferencias entre los rangos en la tasa de calcificación reportada en la literatura científica bajo condiciones de pH reducido entre corales masivos y corales ramificados en arrecifes del Caribe.

HIPÓTESIS NULA (H₀)

No existen diferencias entre los rangos en la tasa de calcificación reportada en la literatura científica bajo condiciones de pH reducido entre corales masivos y corales ramificados en arrecifes del Caribe.

VARIABLES

Variable independiente: Acidificación del agua marina (pH reducido / pCO₂ elevado).

Variable dependiente: Tasa de calcificación coralina (según lo reportado en la literatura), expresada en las distintas unidades utilizadas por los estudios incluidos (por ejemplo, mg CaCO₃ / cm² / día), y empleada de manera comparativa y relativa.

Variable categórica de comparación:

Tipo morfológico del coral (masivo vs ramificado).

Variables contextuales consideradas en la interpretación de los resultados:

Tipo de hábitat (fore reef, back reef, profundidad, exposición al oleaje).

Origen ambiental del coral (ambientes estables vs ambientes variables).

Factores ambientales asociados, como temperatura, nutrientes y turbidez.

DEDICATORIA

Me dedico este logro, en primer lugar, a mí que a pesar de todos los obstáculos con los que me encontré en todo el camino me mantuve firme con cumplir este sueño. Seguido por Dios, reconociendo que sin su ayuda nada de esto hubiera sido posible y colocándolo siempre como guía en mi vida. Asimismo, extendiendo esta dedicatoria a mi familia, quienes nunca han dejado de creer en mí y me han apoyado desde el primer momento. A mi madre, por su constante motivación y por no permitirme decaer en ninguna etapa del camino; y a mi padre, por recordarme siempre la importancia de culminar cada meta que me propongo.

De igual manera, dedico este trabajo a la memoria de mi abuela, quien me enseñó que el cielo es el límite y que no existen imposibles cuando se actúa con empeño y determinación. Su apoyo a mis sueños permanece como una fuente de inspiración, aun cuando partió de este mundo sin poder verlos realizados. También reconozco a todos aquellos maestros y educadores que han contribuido a mi formación, brindándome una educación de calidad y ayudándome a desarrollarme tanto en el ámbito personal como profesional. Finalmente, dedico este logro a mi prometida, quien ha sido un pilar fundamental en este proceso, apoyándome e impulsándome a ser mejor cada día.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco al Todopoderoso por brindarme la fortaleza necesaria para superar cada prueba y obstáculo en el camino hacia la culminación de esta meta.

Asimismo, expreso mi más sincero agradecimiento a mi familia, por su apoyo incondicional a lo largo de todo este proceso y por motivarme constantemente a no rendirme. Agradezco también a mi institución, la Universidad Interamericana de Puerto Rico, Recinto de San Germán, por ofrecerme las herramientas necesarias para consolidar mi formación académica y prepararme profesionalmente para enfrentar los retos del mundo laboral. De igual manera, extendiendo mi agradecimiento a mi director de tesis, Carlos A. Linares Medina, cuyo apoyo constante, orientación y acompañamiento en cada etapa de esta investigación fueron fundamentales para la culminación exitosa de la misma.

Asimismo, agradezco a mi profesora Lucille A. Oliver Cebollero, quien, mediante sus enseñanzas, orientación y apoyo, contribuyó significativamente a la definición de mi tema de investigación y a la organización adecuada de mis ideas. Finalmente, expreso mi agradecimiento al resto de mi comité de tesis, Axel Vélez y Tania Rodríguez, por su apoyo y contribución durante este proceso académico.

INTRODUCCIÓN

La acidificación del océano constituye una de las amenazas más significativas para los ecosistemas de arrecifes de coral, afectando de manera directa la capacidad de los corales para depositar carbonato de calcio y mantener sus esqueletos (D'Olive et al., 2019; Canesi et al., 2024). Este fenómeno, impulsado principalmente por la acumulación de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera, provoca una disminución del pH del agua marina y altera la química del carbono disuelto, generando condiciones menos favorables para la calcificación de distintas especies coralinas (Eagle et al., 2022; Palmer, 2018). Estudios previos han evidenciado que los corales masivos, como *Orbicella* y *Porites*, y los corales ramificados, como *Acropora*, muestran respuestas diferenciadas frente a la acidificación, lo que sugiere una variabilidad morfológica y fisiológica importante en su resiliencia (Canesi et al., 2024; Schoepf et al., 2025).

La relevancia de analizar estas diferencias radica en que la tasa de calcificación es un indicador clave de la salud y la capacidad de crecimiento de los arrecifes, afectando la biodiversidad y los servicios ecosistémicos asociados (Figuerola et al., 2021; Guo et al., 2020). En el contexto del Caribe y, particularmente, en los arrecifes de Puerto Rico, se ha observado que factores locales como la temperatura, la exposición al oleaje, la turbidez y los nutrientes pueden interactuar con los efectos del pH reducido, modulando la respuesta de los corales (Mejías-Rivera et al., 2023; Ross et al., 2022).

Para abordar esta problemática, el presente estudio plantea un meta-análisis que sintetice la evidencia existente sobre los efectos de la acidificación del agua marina en la tasa de calcificación de corales masivos versus ramificados en el caribe. A diferencia de estudios experimentales convencionales, se integrará información cuantitativa derivada de

publicaciones científicas recientes (Canesi et al., 2024; Tanvet et al., 2023; Kwiatkowski et al., 2024).

El meta-análisis propuesto tiene como objetivo identificar patrones generales de calcificación bajo condiciones de pH reducido, evaluando las diferencias entre corales masivos y ramificados y considerando la influencia de factores ambientales locales. Asimismo, la información recopilada permitirá generar recomendaciones basadas en evidencia para la conservación de los arrecifes, contribuyendo a estrategias de mitigación frente a la acidificación y al cambio climático global (Venn et al., 2020; Widdicombe & Spicer, 2008). En este sentido, el estudio representa un esfuerzo por consolidar conocimientos dispersos y proporcionar una base científica sólida para futuras intervenciones en los ecosistemas coralinos de Puerto Rico.

Capítulo I. Planteamiento de la investigación

1.1 Justificación:

La acidificación de los océanos constituye una de las amenazas más críticas y menos reversibles para los ecosistemas de arrecifes de coral en la actualidad. Este fenómeno, resultado directo del aumento de dióxido de carbono (CO_2) disuelto en el agua, altera la química marina al disminuir el pH y reducir la disponibilidad de iones carbonato, esenciales para la formación de esqueletos de carbonato de calcio (D'Olivo et al., 2019; Canesi et al., 2024). Dichos cambios interfieren con la capacidad de los corales para calcificar y mantener su estructura, afectando tanto a las especies masivas como a las ramificadas (Canesi et al., 2024; Schoepf et al., 2025). Las consecuencias ecológicas son de gran magnitud, ya que comprometen la estabilidad estructural de los arrecifes, reducen la biodiversidad y alteran procesos ecológicos esenciales como la protección costera, el hábitat de especies marinas y la productividad pesquera (Figuerola et al., 2021; Ross et al., 2022). En este contexto, comprender las respuestas diferenciadas de los distintos tipos de corales frente a la acidificación resulta fundamental para el desarrollo de estrategias de conservación y manejo efectivas.

El presente estudio adquiere relevancia porque aborda una problemática de interés mundial, pero con énfasis en una región particularmente vulnerable: el Caribe y los arrecifes de Puerto Rico. A pesar de los avances en la comprensión de la acidificación oceánica, todavía existen vacíos de conocimiento sobre cómo este fenómeno afecta diferencialmente a los corales según su morfología. Los corales masivos, caracterizados por un crecimiento más lento pero una estructura robusta, y los corales ramificados, de crecimiento rápido pero mayor fragilidad estructural, pueden experimentar respuestas contrastantes en sus tasas de calcificación bajo condiciones de pH reducido (Venn et al., 2020; Guo et al., 2020). Analizar estas diferencias resulta fundamental para comprender los mecanismos de resiliencia y

vulnerabilidad de las especies que conforman los arrecifes tropicales y para proyectar escenarios futuros de sostenibilidad ecológica. Asimismo, este análisis contribuye a fortalecer la base científica necesaria para la toma de decisiones en políticas de conservación y manejo de los ecosistemas arrecifales.

Este metaanálisis se justifica, en primer lugar, por su naturaleza integradora y comparativa. La investigación combina información proveniente de artículos científicos arbitrados, tesis y metaanálisis previos. Este enfoque integrador, basado en un metaanálisis cuantitativo comparativo con apoyo descriptivo, permite contrastar patrones reportados en la literatura científica en un mismo lugar, fortaleciendo la validez y aplicabilidad de los resultados (Mejías-Rivera et al., 2023; Widdicombe & Spicer, 2008). Asimismo, al sistematizar los hallazgos de la literatura reciente, se ofrece una visión actualizada sobre las respuestas fisiológicas y morfológicas de los corales frente al descenso del pH oceánico. Finalmente, este enfoque contribuye a identificar tendencias consistentes y áreas de incertidumbre, lo que resulta esencial para orientar futuras investigaciones y estrategias de conservación en ecosistemas arrecifales.

Desde una perspectiva de originalidad, el estudio representa una contribución relevante dentro del contexto puertorriqueño, al integrar un análisis comparativo que distingue entre morfotipos coralinos. Si bien existen estudios experimentales y revisiones globales sobre la acidificación oceánica, pocos han abordado de manera integrada el comportamiento diferencial de corales masivos y ramificados bajo condiciones de acidificación en el Caribe. La identificación de diferencias en la tasa de calcificación y su relación con variables ambientales locales permite generar información valiosa para orientar estrategias de conservación adaptativa y manejo de arrecifes en ecosistemas tropicales. Además, este enfoque comparativo aporta una base científica más específica para comprender la resiliencia diferencial de las especies coralinas ante el cambio climático. De igual manera,

los resultados del estudio podrán servir como referencia para futuras investigaciones que busquen profundizar en la respuesta de los arrecifes caribeños frente a condiciones ambientales cambiantes.

En términos de oportunidad, esta investigación se desarrolla en un momento histórico crucial. Los registros científicos indican que la acidez del océano ha aumentado aproximadamente un 30 % desde la Revolución Industrial, y se proyecta que continúe incrementándose durante este siglo como consecuencia del cambio climático global (Eagle et al., 2022; Tanvet et al., 2023). En este contexto, comprender cómo responden distintos tipos de corales a la acidificación resulta esencial para anticipar cambios estructurales en los arrecifes y sus implicaciones ecológicas. De igual manera, el análisis de estas respuestas permite evaluar la capacidad adaptativa de los ecosistemas coralinos frente a escenarios ambientales cambiantes. Asimismo, este conocimiento aporta fundamentos científicos clave para el diseño de estrategias de mitigación y conservación orientadas a la protección de los arrecifes en el Caribe.

El interés para la comunidad científica radica en que este metaanálisis aporta una síntesis cualitativa comparativa de los efectos de la acidificación sobre la calcificación coralina, incorporando diferencias morfológicas y ecológicas que han sido poco exploradas de forma integrada. Los resultados contribuyen al cuerpo teórico sobre la fisiología coralina, la resiliencia de los ecosistemas marinos y la comprensión de respuestas coralinas frente a múltiples estresores ambientales en el Caribe. Finalmente, esta investigación responde a un compromiso académico y ambiental con la conservación marina, al proponerse como un puente entre el conocimiento científico y su aplicación local. Al generar información confiable y contextualizada, el estudio busca servir de base para la formulación de políticas públicas, programas de monitoreo y estrategias de manejo que contribuyan a mitigar los

efectos de la acidificación oceánica sobre los arrecifes de coral en Puerto Rico y otras regiones tropicales.

1.2 Problema de investigación:

La acidificación de los océanos se ha consolidado como una de las amenazas ambientales más importantes para los arrecifes de coral, ecosistemas que albergan una gran biodiversidad y proporcionan servicios esenciales a las comunidades costeras, incluyendo protección contra tormentas, recursos alimentarios y beneficios económicos vinculados a la pesca y el turismo (Widdicombe & Spicer, 2008; Figuerola et al., 2021). Este fenómeno, impulsado por el aumento sostenido de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera, provoca una disminución del pH del agua marina y afecta la disponibilidad de carbonato de calcio, un compuesto clave para la calcificación coralina (D'Olivo et al., 2019; Canesi et al., 2024). Diversos estudios han demostrado que la acidificación altera las tasas de crecimiento y calcificación de los corales, comprometiendo su estructura y resiliencia frente a otros estresores ambientales (Palmer, 2018; Schoepf et al., 2025). Además, los cambios en la química del océano pueden afectar indirectamente la reproducción y la supervivencia de especies asociadas al arrecife (Mollica et al., 2018). Por tanto, entender cómo los corales responden a la acidificación es crucial para prever el futuro de estos ecosistemas y los servicios que proporcionan.

En el Caribe, y específicamente en Puerto Rico, los arrecifes han mostrado un deterioro considerable debido a múltiples factores, incluyendo la acidificación oceánica, la contaminación y la presión antropogénica (Mejías-Rivera et al., 2023; Ross et al., 2022). Investigaciones recientes indican que la respuesta de los corales a pH reducido no es uniforme, sino que depende de características biológicas y morfológicas (Canesi et al., 2024; Tanvet et al., 2023). Corales masivos y ramificados presentan diferencias entre los rangos en sus tasas de calcificación y en sus mecanismos fisiológicos de adaptación al estrés químico

(Schoepf et al., 2025). Estas variaciones sugieren que la morfología de los corales influye en su resiliencia frente a la acidificación (Venn et al., 2025). Comprender estas diferencias resulta esencial para diseñar estrategias de conservación más efectivas y específicas.

A pesar del creciente número de estudios sobre acidificación y calcificación coralina, la información disponible sigue siendo fragmentada y dispersa, con metodologías, escalas y especies distintas (Bove et al., 2019; Bove et al., 2020). Esta situación dificulta la identificación de patrones generales en la literatura científica y limita la comprensión de las diferencias entre corales masivos y ramificados bajo pH reducido. En el Caribe y Puerto Rico, aunque existen estudios que describen la química del agua y su relación con la calcificación (García-Troche et al., 2021; Palacio-Castro et al., 2023), son escasos los análisis comparativos sistemáticos enfocados en la morfología coralina. Esta falta de síntesis impide consolidar conocimiento que pueda guiar decisiones de manejo de arrecifes y estrategias de conservación adaptativa. Por ello, se requiere un enfoque integrador que considere la diversidad morfológica de los corales y los resultados reportados en diferentes investigaciones (Martínez et al., 2019).

Esta carencia de análisis comparativo representa un obstáculo para comprender de manera integral la respuesta de los corales frente a la acidificación, pues dificulta determinar si existen diferencias consistentes en las tasas de calcificación entre especies masivas y ramificadas (Jury et al., 2019; Takeshita et al., 2018). Sin esta información, es complejo generar recomendaciones generalizables para la conservación de los arrecifes. Asimismo, la dispersión de datos limita la capacidad de vincular resultados científicos con políticas ambientales efectivas y prácticas de manejo sostenible (Palmer, 2018). Integrar la evidencia disponible permitirá identificar tendencias y vacíos de conocimiento relevantes. Esto fortalecerá la base científica para orientar futuras investigaciones y acciones de conservación en la región (Cameron et al., 2022).

En este contexto, el problema de investigación se centra en la necesidad de analizar e integrar comparativamente la evidencia científica sobre las tasas de calcificación de corales masivos y ramificados bajo condiciones de pH reducido en arrecifes del Caribe (Bove et al., 2020; Bravo & Schoepf, 2024). Realizar un metaanálisis permitirá identificar patrones, consistencias y variaciones en los resultados reportados. Además, proporcionará información valiosa sobre cómo la morfología influye en la resiliencia coralina frente a la acidificación (Canesi et al., 2024). Esta integración contribuye a generar conclusiones más robustas y aplicables a la conservación de los arrecifes (Eagle et al., 2022). Así, la investigación apoyará la toma de decisiones basada en evidencia científica y fomentará estrategias de manejo más efectivas (Venn et al., 2025).

1.3 Objetivo general

Analizar de manera comparativa el efecto de la acidificación del agua marina sobre la tasa de calcificación de corales masivos y corales ramificados en los arrecifes del caribe y Puerto Rico, mediante la integración de evidencia científica publicada, con el fin de identificar patrones diferenciales de respuesta y factores moduladores que contribuyan al diseño de estrategias de conservación basadas en evidencia.

1.4 Objetivos específicos

Identificar y recopilar estudios científicos publicados que aborden la calcificación de corales masivos y ramificados bajo condiciones de pH reducido, con el fin de establecer el alcance y la consistencia de los efectos reportados en la literatura.

Analizar comparativamente la respuesta de la tasa de calcificación entre corales masivos (por ejemplo, *Montastraea/Orbicella*, *Colpophyllia*, *Diploria*, *Pseudodiploria*) y corales ramificados (por ejemplo, *Acropora*, *Madracis*, *Porites*), a partir de la síntesis de resultados reportados en los estudios revisados.

Examinar la influencia de factores ambientales adicionales, como temperatura, nutrientes, turbidez y tipo de hábitat, en la respuesta de la calcificación coralina según lo documentado en la literatura científica.

Identificar patrones de variabilidad espacial y temporal en la respuesta de los corales a la disminución del pH, según lo reportado en estudios realizados en el Caribe y regiones comparables, destacando especies o contextos ambientales con mayor vulnerabilidad.

Sintetizar la evidencia científica revisada para proponer recomendaciones de manejo, conservación y restauración de arrecifes, priorizando estrategias basadas en la resiliencia relativa de corales masivos y ramificados frente a la acidificación del océano.

1.5 Antecedentes

La acidificación oceánica es una consecuencia directa del incremento en las concentraciones de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico, el cual se disuelve en el agua marina formando ácido carbónico, protones (H^+) y bicarbonato (HCO_3^-). Este proceso reduce la concentración de iones carbonato (CO_3^{2-}) disponibles para los organismos calcificadores y disminuye la saturación de aragonita (Ω_{arag}), una condición fundamental para la formación de esqueletos de carbonato de calcio en los corales (Chan & Connolly, 2013; Eagle et al., 2022). La reducción de estos parámetros compromete directamente la capacidad bioquímica de los corales para mantener tasas adecuadas de calcificación. Desde una perspectiva fisiológica, los corales enfrentan la acidificación manteniendo un microambiente interno (el fluido calcificante) con condiciones químicas más favorables que el agua circundante. Este proceso requiere la regulación activa del pH interno, el transporte de iones de calcio (Ca^{2+}) y la gestión del carbono inorgánico disuelto, lo cual implica un costo energético adicional (Venn et al., 2020; Eagle et al., 2022).

En consecuencia, una de las hipótesis centrales en la literatura sostiene que la disminución del pH externo obliga a los corales a invertir mayor energía metabólica para sostener la calcificación, lo que puede traducirse en reducciones netas del crecimiento esquelético bajo condiciones prolongadas de acidificación. Las primeras investigaciones y síntesis globales sobre el impacto de la acidificación oceánica en la calcificación coralina documentaron, en términos generales, efectos negativos, aunque con una marcada heterogeneidad entre especies, metodologías experimentales y escalas temporales (Kroeker et al., 2010; Chan & Connolly, 2013). Un metaanálisis ampliamente citado reportó que, dentro del rango de saturación de aragonita entre 2 y 4, la calcificación coralina global disminuye en promedio cerca de un 15 %, con una variabilidad considerable entre estudios (Chan & Connolly, 2013). Esta heterogeneidad ha sido atribuida a factores como la duración de los experimentos, las técnicas de medición utilizadas, las condiciones de irradiancia y las diferencias fisiológicas entre especies. Con el avance de la investigación, estudios posteriores ampliaron el enfoque hacia múltiples organismos calcificadores y demostraron que la acidificación no solo afecta la calcificación, sino también otros procesos biológicos como la reproducción, la supervivencia y la integridad estructural, especialmente cuando interactúa con estresores adicionales como la temperatura y la disponibilidad de nutrientes (Harvey, Gwynn-Jones, & Moore, 2013).

Estos hallazgos reforzaron la necesidad de considerar la acidificación como parte de un contexto ambiental multifactorial. En el contexto regional del Caribe, Bove et al. (2020) realizaron un metaanálisis enfocado en corales caribeños y concluyeron que, aunque el calentamiento oceánico mostró un efecto negativo consistente sobre la calcificación, la acidificación por sí sola no presentó un impacto estadísticamente significativo en la mayoría de los estudios analizados. Este resultado sugiere que el efecto de la acidificación puede estar modulado por condiciones locales y por la interacción con otros estresores ambientales,

desafiando la noción de un impacto uniforme del pH reducido sobre la calcificación coralina en esta región. Estudios experimentales más recientes han destacado la importancia de las interacciones entre la acidificación y la temperatura. Cameron et al. (2022) documentaron que el efecto del pCO₂ elevado sobre la calcificación coralina varía significativamente bajo distintos regímenes térmicos, lo que resalta la necesidad de enfoques multifactoriales para comprender la respuesta coralina al cambio climático.

En el ámbito de la biología coralina del Caribe, Martínez et al. (2019) evaluaron la respuesta de especies como *Porites astreoides* (Lamarck, 1816), *Siderastrea siderea* (Ellis & Solander, 1786) y *Porites porites* (Pallas, 1766) mediante experimentos de campo a largo plazo. Sus resultados evidenciaron diferencias interespecíficas en la capacidad de mantener la calcificación bajo condiciones acidificadas, apoyando la idea de que características fisiológicas intrínsecas, como la densidad esquelética y la plasticidad metabólica, influyen en la sensibilidad a la acidificación. Finalmente, un antecedente fundamental para Puerto Rico es el monitoreo continuo de la química del carbono costero desarrollado por la NOAA en La Parguera. Desde 2008, esta estación ha generado series temporales de pH, alcalinidad y calcificación neta, proporcionando un marco empírico invaluable para vincular estudios experimentales con condiciones ambientales reales en arrecifes caribeños (NOAA, 2021). Estos datos constituyen una base sólida para contextualizar los resultados del presente metaanálisis dentro de la variabilidad natural de los arrecifes puertorriqueños.

1.6 Estado actual del tema

En los últimos cinco años, la investigación coralina relacionada con la acidificación oceánica ha mostrado avances metodológicos significativos, evidenciados por un aumento en estudios experimentales, revisiones sistemáticas y síntesis meta-analíticas. Estos trabajos han permitido comprender no solo los efectos del pH reducido sobre la calcificación coralina,

sino también la interacción de múltiples estresores ambientales, como la temperatura, la luz y la disponibilidad de carbonato (Bove, Umbanhowar, & Castillo, 2020; Cameron, Albright, Bernstein, Crowder, & Edmunds, 2022; Figuerola et al., 2021). En conjunto, la literatura reciente ha consolidado una visión más matizada, en la que la sensibilidad de los corales al estrés ácido no se considera uniforme, sino dependiente de factores biológicos, ecológicos y del contexto local. Los metaanálisis y revisiones recientes han sido fundamentales para identificar patrones generales de respuesta. El metaanálisis de Bove et al. (2020), enfocado en especies caribeñas, concluyó que la acidificación no siempre produce una disminución directa en la calcificación, lo que sugiere que mecanismos como la plasticidad fisiológica, la adaptación local y el control del fluido calcificante pueden amortiguar los efectos negativos del pH bajo.

De manera complementaria, Figuerola et al. (2021) ampliaron este enfoque al evaluar diversos taxones marinos calcificadores a escala global, identificando que las especies que depositan formas más solubles de carbonato de calcio, como la aragonita o carbonatos con alto contenido de magnesio, tienden a presentar reducciones más marcadas en la calcificación bajo condiciones acidificadas. Los avances metodológicos recientes también han permitido explorar con mayor detalle los mecanismos internos de la calcificación coralina. Estudios como los de Eagle et al. (2022) emplearon trazadores geoquímicos, incluyendo las relaciones B/Ca y $\delta^{11}\text{B}$, para estimar el pH del fluido calcificante (pH_{CF}), demostrando que algunas especies pueden mantener internamente un pH relativamente estable pese a la acidificación externa, aunque a distintos costos metabólicos. De forma similar, Cameron et al. (2022) evidenciaron que la interacción entre pCO₂ y temperatura modifica significativamente la tasa de calcificación, lo que refuerza la necesidad de evaluar los efectos del pH en conjunto con otros factores ambientales. Asimismo, estudios experimentales de laboratorio, como los de Mollica et al. (2018), continúan mostrando que la acidificación puede afectar tanto la

extensión como la densidad del esqueleto coralino, aportando una base sólida para comparaciones longitudinales.

El monitoreo in situ ha sido clave para contextualizar los datos experimentales. El programa de la NOAA en La Parguera, Puerto Rico, proporciona series temporales de pH, alcalinidad y bioerosión, lo que ofrece un marco local relevante para interpretar las respuestas coralinas (NOAA, 2021). De manera consistente, estudios recientes realizados en Puerto Rico, como los de Mejías-Rivera et al. (2023) y García-Troche, Morell, Meléndez y Salisbury (2021), han documentado fluctuaciones naturales del pH en bahías bioluminiscentes y lagunas costeras. Estas observaciones sugieren que algunos arrecifes locales podrían estar parcialmente preaclimatados a la variabilidad del pH, lo que podría influir en su resiliencia frente a condiciones ambientales extremas.

A nivel global, la investigación reciente indica que los corales pueden emplear múltiples estrategias para sostener la calcificación bajo condiciones de pH reducido. Canesi et al. (2024) y Tanvet et al. (2023) mostraron que ciertas especies regulan activamente su fluido calcificante bajo exposiciones prolongadas a pH bajo, y que esta capacidad puede variar según la especie y el tipo de esqueleto (ramificado versus masivo). Además, algunos estudios sugieren que factores como el microbioma coralino y la plasticidad genética o epigenética podrían modular la respuesta al estrés ácido, aunque estos enfoques aún se encuentran en etapas exploratorias (Palmer, 2018; Schoepf et al., 2025; Price, N. N., et al., 2012). En el Caribe, numerosos estudios experimentales manipulativos han abordado la acidificación coralina, aunque gran parte de esta investigación se ha concentrado en regiones como Belice, Bahamas y los Florida Keys, con una representación limitada de estudios focalizados en Puerto Rico (Bove et al., 2020). En este contexto, los datos locales de La Parguera y otros sistemas costeros internos resultan esenciales para comprender la

variabilidad espacial y temporal del pH y la calcificación neta. Este enfoque permite vincular observaciones de laboratorio con dinámicas naturales y fortalecer la validación de modelos predictivos frente a escenarios futuros de acidificación y calentamiento (Kwiatkowski et al., 2024; Mejías-Rivera et al., 2023; Ross et al., 2022).

Finalmente, estudios experimentales recientes en el Caribe han comenzado a desglosar las respuestas coralinas según la morfología y la identidad de las especies. Martínez et al. (2019) demostraron que algunas especies, como *Porites astreoides* y *Siderastrea siderea*, presentan menor sensibilidad al pH reducido, lo que evidencia una marcada variabilidad interespecífica. La integración de técnicas de monitoreo del pH a escala del esqueleto coralino, junto con la evaluación de la plasticidad fisiológica, permite construir un marco más completo para comprender la respuesta coralina frente a escenarios combinados de acidificación y calentamiento (Eagle et al., 2022; Cameron et al., 2022). En conjunto, el estado actual del tema demuestra que la acidificación oceánica ejerce efectos complejos sobre la calcificación coralina, modulados por factores ambientales, fisiológicos y genéticos. La investigación reciente, tanto a escala global como regional, subraya la necesidad de enfoques integradores que combinen experimentación controlada, monitoreo continuo in situ y modelación predictiva, particularmente en regiones críticas como Puerto Rico, donde los arrecifes enfrentan múltiples estresores de manera simultánea. Este contexto sustenta el propósito del presente metaanálisis, orientado a sintetizar evidencia reciente sobre la calcificación coralina en el Caribe, con énfasis en las variaciones locales y la interacción de múltiples estresores ambientales.

1.7 Estudios experimentales recientes

Los estudios experimentales recientes han permitido profundizar en la variabilidad de las respuestas coralinas frente a la acidificación oceánica. Martínez et al. (2019) evaluaron

durante un periodo de dos años varias especies de corales caribeños bajo condiciones de pH reducido, encontrando que especies como *Porites astreoides* y *Siderastrea siderea* presentan una menor sensibilidad en comparación con otras. Estos resultados evidencian una marcada variabilidad interespecífica en la tolerancia a la acidificación, lo que resalta la importancia de considerar la identidad de la especie al evaluar impactos potenciales. En condiciones de laboratorio aún más controladas, el estudio de Mollica et al. (2018), aunque anterior al periodo más reciente, continúa siendo ampliamente citado debido a la solidez de su diseño experimental y sus resultados. Dicho trabajo demostró que la acidificación oceánica puede afectar tanto la extensión como la densidad del esqueleto coralino, proporcionando evidencia clara de impactos estructurales que complementan hallazgos más recientes.

De forma más reciente, los experimentos realizados en el Caribe han comenzado a ir más allá de la medición de la tasa de calcificación neta, incorporando el análisis de los mecanismos asociados al fluido calcificante, la variación diurna del pH a nivel del esqueleto y la influencia de adaptaciones locales. Estudios como los de Eagle et al. (2022) han contribuido significativamente a este enfoque mecanístico, permitiendo una comprensión más detallada de los procesos internos que regulan la calcificación bajo condiciones de pH reducido. Asimismo, Cameron et al. (2022) evaluaron los efectos combinados del calentamiento y la acidificación, demostrando mediante modelos estadísticos que la interacción entre pCO_2 y temperatura modifica la sensibilidad de la calcificación coralina. Estos resultados refuerzan la necesidad de considerar múltiples estresores ambientales de forma simultánea en los diseños experimentales. Finalmente, algunos estudios emergentes han comenzado a explorar la plasticidad genética y epigenética de los corales frente a niveles bajos de pH, así como la posible influencia del microbioma coralino en la regulación del entorno interno. Aunque este cuerpo de investigación aún es limitado, representa una línea de

trabajo en crecimiento que podría aportar información clave sobre los mecanismos de resiliencia coralina frente a la acidificación oceánica.

1.8 Situación del Caribe y Puerto Rico

En el Caribe, la mayoría de los experimentos manipulativos relacionados con la acidificación coralina se han desarrollado en regiones como Belice, Bahamas, los Florida Keys y otras áreas del Gran Caribe. Por ejemplo, el metaanálisis de Bove et al. (2020) incluyó 13 especies caribeñas provenientes de cinco países; sin embargo, ninguno de los estudios analizados estuvo enfocado exclusivamente en arrecifes de Puerto Rico, lo que evidencia una limitación regional en la representación de esta área. En Puerto Rico, el sistema de monitoreo de La Parguera ha proporcionado series temporales de pH, alcalinidad y estimaciones de calcificación neta y bioerosión, las cuales sirven como un marco contextual importante para la interpretación de procesos locales. Estos datos permiten evaluar la variabilidad natural del sistema y comparar observaciones experimentales con condiciones ambientales reales. Además, estudios realizados en ambientes costeros internos han documentado una alta variabilidad natural del pH en bahías bioluminiscentes, lo que sugiere que algunos arrecifes puertorriqueños podrían estar expuestos de forma recurrente a fluctuaciones químicas que favorezcan procesos de preaclimatación coralina (Mejías-Rivera et al., 2023). Un desafío persistente en la literatura regional es que muchos estudios no reportan los datos de calcificación de manera desagregada según la morfología coralina (por ejemplo, corales masivos versus ramificados), lo que limita la realización de comparaciones morfológicas sistemáticas. Asimismo, existe una escasez de experimentos de largo plazo, particularmente aquellos que evalúan respuestas a escala multianual bajo condiciones controladas que simulen de manera realista los arrecifes naturales expuestos a múltiples estresores ambientales.

Capítulo II. Revisión de literatura:

2.1 Biología de los corales

Según Ortiz Sotomayor, Á. (2005), los corales pétreos son organismos marinos coloniales pertenecientes al filo *Cnidaria* y constituyen los principales constructores de los arrecifes coralinos. Estos organismos tienen la capacidad de secretar un esqueleto de carbonato de calcio, lo que les permite formar estructuras tridimensionales complejas. Dichas estructuras funcionan como refugio y hábitat para una alta diversidad de especies marinas. La calcificación coralina es un proceso fisiológico complejo que requiere un equilibrio adecuado entre factores biológicos y ambientales; por esta razón, los corales son particularmente sensibles a cambios en las condiciones oceánicas. La mayoría de los corales constructores de arrecifes mantienen una relación simbiótica con dinoflagelados fotosintéticos.

Según Ortiz Sotomayor, Á. (2005) estos microorganismos aportan una fracción significativa de la energía necesaria para el metabolismo del coral mediante la fotosíntesis, facilitando el proceso de calcificación. A su vez, el coral les provee protección y acceso a nutrientes. Esta relación simbiótica es fundamental para el crecimiento y la supervivencia del coral, por lo que cualquier alteración en este equilibrio puede afectar directamente la salud del arrecife. Desde el punto de vista morfológico, los corales suelen clasificarse de manera general en corales masivos y corales ramificados. Los corales masivos presentan estructuras densas y compactas, lo que les confiere una mayor resistencia frente a perturbaciones ambientales.

En contraste, los corales ramificados se caracterizan por tasas de crecimiento más rápidas y estructuras más delicadas. Estas diferencias estructurales influyen en la forma en que cada grupo responde al estrés ambiental, por lo que la morfología representa un factor clave en los estudios de calcificación coralina. La fisiología coralina incluye mecanismos

internos que permiten regular el ambiente donde ocurre la calcificación. Diversos estudios han señalado que ciertos corales pueden modificar el pH del fluido calcificante para contrarrestar condiciones ambientales adversas; sin embargo, esta capacidad varía entre especies y tipos morfológicos. Cuando el estrés ambiental se mantiene de forma prolongada, estos mecanismos de regulación pueden resultar insuficientes, lo que conduce a una reducción en la tasa de crecimiento del coral (Ortiz Sotomayor, Á.,2005).

Además, los corales interactúan de manera constante con otros componentes del ecosistema arrecifal. La competencia con macroalgas, la presencia de microorganismos y la disponibilidad de nutrientes influyen en su desempeño fisiológico. Estas interacciones pueden intensificar o atenuar los efectos de factores ambientales adversos. Por ello, la biología coralina debe analizarse desde una perspectiva ecosistémica, lo que permite una comprensión más integral de la respuesta de los corales frente a la acidificación oceánica (Ortiz Sotomayor, Á.,2005).

2.2 Acidificación oceánica

La acidificación oceánica es un proceso asociado a la absorción de dióxido de carbono atmosférico por los océanos. Cuando el CO₂ se disuelve en el agua marina, se desencadena una serie de reacciones químicas que conducen a la formación de ácido carbónico, lo que provoca una disminución gradual del pH. Este cambio altera el equilibrio del sistema carbonato del océano y reduce la disponibilidad de iones carbonato necesarios para la formación de carbonato de calcio. Como consecuencia, esta condición afecta directamente a los organismos calcificadores, incluidos los corales. En los ecosistemas arrecifales, la acidificación no actúa de manera aislada, sino que interactúa con otros estresores ambientales.

El aumento de la temperatura del agua, la contaminación y la eutrofización pueden intensificar sus efectos negativos. Estas interacciones generan escenarios complejos que dificultan la predicción de respuestas biológicas uniformes, lo que explica la variabilidad observada en los resultados de distintos estudios científicos. Esta heterogeneidad resalta la necesidad de enfoques integradores para el análisis de los impactos ambientales. Diversas investigaciones han demostrado que la reducción del pH puede disminuir la tasa de calcificación coralina; sin embargo, la magnitud de este impacto depende de factores como la especie, la morfología y el hábitat del coral. Mientras algunos corales muestran cierta capacidad de tolerancia frente a condiciones de pH bajo, otros presentan reducciones en su crecimiento. Estas diferencias ponen de manifiesto la importancia de realizar comparaciones entre distintos tipos de corales al evaluar los efectos de la acidificación.

En regiones tropicales como el Caribe, la acidificación oceánica representa una preocupación creciente. Las zonas costeras suelen experimentar fluctuaciones naturales del pH asociadas a procesos biológicos y físicos locales. Estas variaciones pueden exponer a los corales a condiciones químicas extremas de manera recurrente, lo que podría influir en la capacidad adaptativa de algunas especies. No obstante, la evidencia disponible sobre estos procesos aún es limitada, particularmente a escala regional. Ante este panorama, resulta esencial integrar los hallazgos provenientes de múltiples estudios científicos. El metaanálisis permite sintetizar resultados dispersos y evaluar tendencias generales, contribuyendo a una comprensión más clara del impacto de la acidificación oceánica sobre los arrecifes coralinos. Además, este enfoque facilita la identificación de vacíos de conocimiento, lo que lo convierte en una herramienta particularmente relevante en estudios relacionados con el cambio climático y los ecosistemas marinos.

2.3 Descripción del área de estudio

Puerto Rico se localiza en el noreste del mar Caribe y presenta una amplia variedad de ecosistemas marinos de alto valor ecológico. Los arrecifes coralinos que rodean la isla se distribuyen tanto a lo largo de la costa norte como de la costa sur, así como en áreas circundantes como Vieques y Culebra. Estas regiones muestran diferencias en profundidad, exposición al oleaje y características oceanográficas, las cuales influyen directamente en la composición y el estado de salud de las comunidades coralinas. Por esta razón, Puerto Rico constituye un escenario adecuado para el estudio de los efectos de la acidificación oceánica. La plataforma insular de Puerto Rico alberga diversos tipos de arrecifes, incluyendo arrecifes de barrera, arrecifes franja y parches coralinos.

Algunos de estos sistemas se desarrollan en ambientes relativamente estables, mientras que otros están influenciados por descargas terrestres y actividades humanas. Esta heterogeneidad ambiental genera condiciones químicas variables en el agua marina, exponiendo a los corales a distintos niveles de estrés ambiental. En este contexto, el archipiélago puede considerarse un laboratorio natural para la investigación científica. Las actividades antropogénicas han ejercido una presión considerable sobre los arrecifes del caribe durante las últimas décadas. El desarrollo costero, la contaminación y la sobrepesca han contribuido al deterioro de estos ecosistemas.

Estos factores pueden interactuar con la acidificación oceánica, amplificando sus efectos negativos. En consecuencia, resulta complejo atribuir el deterioro arrecifal a un solo factor ambiental, por lo que esta interacción de estresores debe considerarse al interpretar los resultados de estudios científicos. A pesar de estos desafíos, Puerto Rico cuenta con una base importante de investigaciones marinas. Instituciones académicas y agencias gubernamentales han generado datos relevantes sobre la química del agua y la condición de los arrecifes. Sin

embargo, esta información suele encontrarse dispersa en múltiples publicaciones, lo que dificulta la identificación de patrones generales. En este sentido, el metaanálisis permite integrar estos estudios de manera comparativa. En el presente estudio, el área de análisis no se limita a una sola localidad, sino que abarca múltiples regiones representativas del archipiélago. Esta aproximación amplia permite evaluar variaciones espaciales en la respuesta coralina frente a la acidificación. Además, facilita la comparación entre distintos tipos de hábitat, proporcionando una visión más completa de los efectos de la acidificación oceánica en los arrecifes del caribe.

El ambiente de fore reef se caracteriza por presentar condiciones oceánicas relativamente estables y una mayor circulación de agua marina. Estas características favorecen una menor fluctuación en parámetros químicos como el pH, permitiendo condiciones más favorables para los procesos de calcificación coralina. Además, esta zona suele estar más expuesta al intercambio directo con aguas oceánicas abiertas, reduciendo la acumulación de materia orgánica y otros factores de estrés ambiental. Diversos estudios y clasificaciones arrecifales reconocen al fore reef como una de las áreas de mayor desarrollo estructural dentro de los arrecifes coralinos (Done, 1983; Kennedy et al., 2020). Por esta razón, el fore reef fue identificado como una de las zonas con menor impacto relativo sobre la calcificación coralina dentro del presente análisis.

El ambiente de back reef presenta una mayor variabilidad ambiental debido a su localización en áreas más protegidas del arrecife. Esta zona suele experimentar cambios más frecuentes en temperatura, salinidad y pH, asociados a una menor circulación de agua oceánica. Como resultado, los organismos coralinos pueden estar expuestos a mayores niveles de estrés fisiológico en comparación con ambientes más abiertos. La literatura especializada describe al back reef como un ambiente arrecifal dinámico influenciado tanto

por factores oceánicos como costeros (Done, 1983; Lang et al., 2010). En términos generales, esta área mostró un impacto intermedio en relación con los demás ambientes evaluados en el estudio.

Las lagunas costeras se distinguen por recibir una influencia significativa de aportes continentales y presentar una elevada variabilidad ambiental. En estos sistemas suelen registrarse fluctuaciones diarias y estacionales en parámetros como el pH, la temperatura y la concentración de materia orgánica. Estas condiciones pueden afectar la disponibilidad de carbonato necesario para la formación de esqueletos coralinos. De acuerdo con descripciones ecológicas y geomorfológicas de arrecifes, las lagunas representan ambientes relativamente restringidos y sensibles a cambios ambientales (Done, 1983; Kennedy et al., 2020). En consecuencia, las lagunas costeras fueron consideradas áreas con una susceptibilidad relativamente alta frente a los efectos de la acidificación oceánica.

Las bahías interiores representan ambientes arrecifales con condiciones más variables y restringidas desde el punto de vista físico y químico. La limitada circulación de agua y la acumulación de sedimentos y materia orgánica favorecen fluctuaciones importantes en parámetros ambientales como el oxígeno disuelto, la temperatura y el pH. Estas características pueden generar condiciones menos favorables para la calcificación y el crecimiento de los corales. Las descripciones de ambientes arrecifales costeros indican que las bahías interiores suelen presentar una mayor influencia continental y menores tasas de intercambio oceánico (Done, 1983; Lang et al., 2010). Por ello, esta zona fue identificada como uno de los ambientes con mayor vulnerabilidad relativa frente a los efectos asociados a la acidificación oceánica.

2.4 Hábitat presente

Los arrecifes coralinos de Puerto Rico y del caribe presentan una amplia diversidad de hábitats marinos que influyen directamente en la distribución y el desempeño fisiológico de los corales. Estos hábitats incluyen arrecifes frontales expuestos al oleaje, arrecifes posteriores más protegidos y lagunas costeras someras. Cada uno de estos ambientes posee características físicas y químicas particulares que condicionan la respuesta de los organismos coralinos frente al estrés ambiental. Por esta razón, el hábitat constituye un elemento clave en el análisis de la calcificación coralina. Los corales de morfología masiva suelen encontrarse con mayor frecuencia en áreas con condiciones ambientales relativamente estables. Su estructura densa y compacta les permite resistir mejor las fuerzas físicas asociadas al oleaje y la sedimentación.

En contraste, los corales ramificados tienden a dominar en zonas con mayor disponibilidad de luz y espacio para el crecimiento. No obstante, estos ambientes pueden ser más vulnerables a cambios en la calidad del agua, lo que incrementa la exposición al estrés ambiental. Esta distribución diferencial refleja la adaptación de cada morfología a condiciones específicas del entorno. El tipo de hábitat influye de manera directa en la exposición de los corales a fluctuaciones del pH. En ambientes costeros, el pH del agua puede variar a escalas diarias o estacionales como resultado de procesos biológicos y físicos.

Estas variaciones pueden afectar la tasa de calcificación de forma distinta según la morfología coralina y el contexto ambiental. Por ello, considerar el hábitat resulta fundamental al interpretar los efectos de la acidificación oceánica, ya que ignorar este factor podría conducir a conclusiones incompletas o sesgadas. Además, la presencia de otros organismos bentónicos puede modificar las condiciones locales del arrecife. Las macroalgas, por ejemplo, pueden competir con los corales por espacio y recursos, alterando la química del

microambiente inmediato. Esta competencia puede intensificar los efectos del estrés químico sobre los corales.

Estas interacciones ecológicas añaden un nivel adicional de complejidad al sistema arrecifal y deben considerarse en estudios integradores. En conjunto, la diversidad de hábitats presentes en Puerto Rico y el caribe ofrece un marco adecuado para evaluar tanto patrones generales como respuestas específicas de los corales frente a la acidificación. El análisis integrado de estos ambientes permite identificar factores que favorecen la resiliencia coralina y contribuye a una comprensión más profunda de la dinámica arrecifal. Este enfoque es consistente con los objetivos del metaanálisis propuesto. Asimismo, la integración de estos resultados proporciona una base sólida para orientar futuras investigaciones y estrategias de conservación en ecosistemas arrecifales.

2.5 Estudios de caso y situación en Puerto Rico

Diversos estudios realizados en Puerto Rico han documentado cambios relevantes en la química del sistema carbonato, asociados tanto a procesos naturales como a actividades antropogénicas. Investigaciones en zonas costeras han evidenciado episodios recurrentes de disminución del pH, particularmente en áreas cercanas a descargas terrestres y bahías semicerradas. Estas condiciones pueden afectar de manera directa la tasa de calcificación de los corales; sin embargo, los resultados obtenidos no siempre son consistentes entre distintas localidades, lo que resalta la complejidad del fenómeno. Algunos estudios de caso indican que ciertos corales de morfología masiva presentan una mayor tolerancia a condiciones de pH reducido, manteniendo tasas de calcificación relativamente estables bajo escenarios de acidificación moderada. En contraste, otros trabajos reportan disminuciones en la calcificación de corales ramificados.

Estas diferencias sugieren que la morfología coralina desempeña un papel importante en la respuesta al estrés químico, aunque los mecanismos subyacentes aún no se encuentran completamente dilucidados. En Puerto Rico, una parte considerable de la investigación se ha concentrado en especies o localidades específicas. Si bien estos estudios aportan información valiosa, su alcance suele ser limitado y dificulta la identificación de patrones generales con implicaciones para la conservación y el manejo de arrecifes. Por esta razón, resulta necesario integrar estos estudios en un análisis más amplio y comparativo. El metaanálisis constituye una herramienta adecuada para este propósito.

Capítulo III. Metodología

3.1 Introducción

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo con técnica de metaanálisis que integra los resultados de múltiples estudios de la misma temática (relacionados con la acidificación del océano y su efecto en la calcificación coralina) y analizarlos comparativamente. Mediante un metaanálisis que combina y analiza cuantitativamente los resultados de múltiples estudios independientes (primarios) sobre un mismo tema para obtener una conclusión global más precisa y sólida. La selección de estudios respondió a criterios de pertinencia temática, actualidad y relevancia dentro del contexto del Caribe y regiones comparables. Diversas investigaciones han documentado que la respuesta coralina frente a la acidificación no es uniforme, sino que varía según factores biológicos y ambientales. En este sentido, la síntesis de información permitió identificar tendencias generales y contrastar hallazgos reportados en la literatura científica.

La metodología adoptada responde a la naturaleza compleja del problema de investigación, dado que la acidificación oceánica constituye un fenómeno multifactorial influenciado por variables como la temperatura, la química del carbono y las condiciones locales del hábitat. Estudios previos han señalado que estos factores pueden interactuar y modificar la respuesta de los organismos calcificadores, lo que genera una alta variabilidad entre resultados reportados. En consecuencia, se optó por un enfoque integrador basado exclusivamente en fuentes documentales, permitiendo abordar dicha complejidad sin recurrir a la experimentación directa. Este tipo de aproximación es consistente con investigaciones que buscan consolidar conocimiento existente y establecer patrones comparativos. De esta manera, se favorece una interpretación más amplia del fenómeno estudiado.

El diseño metodológico empleado se fundamenta en la revisión de literatura científica especializada, incluyendo estudios experimentales, observacionales y de síntesis previamente publicados. Investigaciones en el Caribe han evidenciado respuestas diferenciadas en la calcificación coralina, particularmente en función de la morfología y la especie, lo cual respalda la pertinencia del análisis comparativo desarrollado en este estudio. Asimismo, se consideraron aportes que analizan la variabilidad espacial y temporal de la acidificación en ecosistemas arrecifales, especialmente en contextos cercanos a Puerto Rico y el Caribe. La integración de estos estudios permitió construir una base de análisis sólida y contextualizada. Esto contribuyó a reforzar la validez de los resultados obtenidos.

En conjunto, la metodología permitió examinar el problema de investigación desde una perspectiva amplia, sustentada en evidencia científica actualizada. El uso de un metaanálisis cuantitativo facilitó la identificación de patrones generales sin necesidad de homogenizar estadísticamente los datos, respetando la diversidad metodológica de los estudios incluidos. Este enfoque es particularmente útil en áreas donde existe heterogeneidad en los diseños de investigación, como ocurre en el estudio de la acidificación oceánica. Además, permitió establecer relaciones entre variables clave como el pH, la calcificación y la morfología coralina. Finalmente, proporciona una base sólida para futuras investigaciones orientadas a la conservación y manejo sostenible de los ecosistemas coralinos (Glass, 1976).

La incorporación del metaanálisis como estrategia metodológica se sustenta en la integración cuantitativa de resultados provenientes de múltiples investigaciones, lo que permite una comprensión más estructurada del conocimiento acumulado. Este enfoque implica analizar de manera sistemática los hallazgos de distintos estudios para generar conclusiones más consistentes. De esta forma, se transforma un conjunto amplio de resultados individuales en una base de evidencia organizada y comparable. A diferencia de

las revisiones descriptivas tradicionales, se enfoca en la identificación de patrones y tendencias comunes. Por ello, su aplicación resulta especialmente valiosa en contextos donde los resultados presentan variabilidad o aparentes contradicciones (Glass, 1976).

Asimismo, este enfoque resalta la importancia de considerar los resultados de múltiples estudios como parte de un mismo cuerpo de evidencia, lo que contribuye a mejorar la precisión de las interpretaciones. Al integrar información de diferentes contextos y metodologías, se reduce la influencia de sesgos asociados a investigaciones individuales. En el caso de la acidificación oceánica, donde existen diferencias en escalas espaciales, temporales y biológicas, este enfoque facilita una comprensión más completa del fenómeno. Además, permite identificar patrones generales que no serían evidentes al analizar estudios de forma aislada. De esta manera, el metaanálisis contribuye a fortalecer la confiabilidad de las conclusiones científicas (Glass, 1976).

Finalmente, la relevancia del metaanálisis en la investigación científica radica en su capacidad para organizar y sintetizar grandes volúmenes de información de manera sistemática. Su uso favorece la validez de los resultados al basarse en evidencia acumulada y comparada. Asimismo, permite identificar vacíos en la literatura existente y orientar futuras líneas de investigación. En este sentido, el presente estudio se beneficia de este enfoque al ofrecer un análisis fundamentado en múltiples fuentes de información. De esta forma, se fortalece la solidez metodológica del trabajo y su aporte al entendimiento de los efectos de la acidificación en los ecosistemas coralinos (Glass, 1976).

3.2 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación corresponde a una revisión de literatura con alcance de metaanálisis cuantitativo, orientada a la síntesis comparativa de la evidencia científica disponible sobre el efecto de la acidificación del agua marina en la tasa de calcificación

coralina. La recopilación de datos se llevó a cabo mediante la identificación, selección y análisis de estudios científicos revisados por pares, siguiendo criterios de pertinencia temática, actualidad y relevancia dentro del campo de estudio. Este tipo de diseño es ampliamente utilizado en investigaciones ambientales, donde la integración de múltiples fuentes permite reconocer patrones consistentes en contextos ecológicos diversos. A través de este enfoque, se logró consolidar información proveniente de distintas regiones y condiciones experimentales. Esto permitió fortalecer la validez del análisis comparativo desarrollado.

La información extraída de los estudios seleccionados fue organizada mediante una matriz de datos estructurada, diseñada para registrar variables clave como especie coralina, tipo morfológico, condiciones experimentales, parámetros químicos del agua y resultados relacionados con la calcificación. La diversidad metodológica de los estudios incluidos evidenció una alta heterogeneidad en cuanto a diseños experimentales, escalas temporales y métricas empleadas. Debido a esta variabilidad, no fue viable aplicar un metaanálisis estadístico tradicional basado en tamaños de efecto estandarizados. En su lugar, se adoptó un enfoque de síntesis cualitativa con apoyo cuantitativo descriptivo. Este permitió clasificar la respuesta de la calcificación coralina frente a la acidificación en términos de disminución, estabilidad o aumento.

En los casos en que los estudios presentaron datos numéricos comparables, estos fueron utilizados para generar estimaciones relativas con fines de comparación. Para ello, se identificaron los rangos de variación reportados en la calcificación y se determinó un valor central representativo, calculado como el punto medio entre los valores mínimo y máximo. Este procedimiento permitió estandarizar la interpretación de resultados sin alterar los datos originales ni asumir equivalencias estadísticas entre estudios. De esta forma, se facilitó la integración de evidencia cuantitativa dentro de un marco analítico cuantitativo. Este enfoque

resulta adecuado en contextos donde existe diversidad metodológica entre las investigaciones.

El diseño metodológico permitió analizar de manera comparativa la respuesta de corales masivos y ramificados frente a condiciones de acidificación, considerando tanto tendencias generales como variaciones específicas reportadas en la literatura. La integración de datos cualitativos y cuantitativos contribuyó a una interpretación más completa del fenómeno estudiado. Asimismo, este enfoque es consistente con estudios previos que destacan la importancia de considerar múltiples variables en el análisis de la calcificación coralina. En conjunto, el diseño adoptado proporciona una base metodológica sólida y coherente con los objetivos de la investigación. Además, permite generar conclusiones fundamentadas que aportan al desarrollo de estrategias de conservación basadas en evidencia científica.

3.3 Población y muestra

La población del estudio estuvo compuesta por investigaciones científicas sobre calcificación coralina. Las publicaciones incluidas correspondieron a estudios realizados en ambientes arrecifales tropicales. Se priorizaron investigaciones con datos cuantitativos claros, lo que facilitó la comparación entre estudios. Dentro de esta población, se consideraron específicamente investigaciones que abordaran corales pertenecientes a dos morfotipos principales: corales masivos y corales ramificados, con el propósito de analizar posibles diferencias en sus tasas de calcificación bajo condiciones de pH reducido. Estos grupos incluyen especies comúnmente reportadas en la literatura científica del Caribe, las cuales presentan características estructurales y patrones de crecimiento distintos, lo que permite establecer comparaciones dentro del análisis.

La muestra documental se seleccionó mediante un proceso sistemático de revisión. Se incluyeron artículos publicados en revistas científicas reconocidas y revisadas por pares. Aquellos estudios que no cumplían con los criterios establecidos fueron excluidos. Este proceso garantizó la calidad y pertinencia de la información analizada, así como la consistencia en la selección de estudios enfocados en los morfotipos coralinos de interés.

3.4 Variables

Las variables principales del estudio incluyeron la tasa de calcificación coralina y el pH del agua marina, consideradas como indicadores clave para evaluar el efecto de la acidificación oceánica. Estas variables permitieron establecer relaciones directas entre los cambios en la química del carbono y la respuesta fisiológica de los corales. La calcificación fue analizada a partir de los valores reportados en la literatura científica, mientras que el pH se utilizó como variable representativa del nivel de acidificación. Adicionalmente, se incorporó la morfología coralina como variable categórica. Esta clasificación permitió diferenciar entre corales masivos y ramificados para fines comparativos.

Como variables secundarias, se incluyeron factores ambientales que pueden influir en la respuesta calcificadora de los corales. Entre estos se consideraron la temperatura del agua, la disponibilidad de nutrientes y la turbidez, según lo reportado en los estudios analizados. Estas variables fueron integradas debido a su influencia potencial en los procesos fisiológicos de los organismos calcificadores. Su inclusión permitió contextualizar los resultados y comprender la variabilidad observada entre estudios. De esta forma, se logró un análisis más completo del fenómeno investigado.

Las variables fueron identificadas y organizadas a partir de la información reportada en los estudios seleccionados, sin alterar los datos originales. En aquellos casos donde fue posible, se utilizaron valores numéricos para facilitar comparaciones relativas entre

investigaciones. Cuando los datos no eran directamente comparables, se realizó una interpretación cualitativa basada en la dirección del efecto reportado. Este procedimiento permitió integrar diferentes tipos de evidencia dentro de un mismo marco analítico. Así, se mantuvo coherencia con el enfoque metodológico del estudio.

La definición y selección de variables permitió estructurar el análisis de manera ordenada y alineada con los objetivos de la investigación. Asimismo, facilitó la identificación de patrones en la respuesta de los corales frente a la acidificación oceánica. Este enfoque es consistente con estudios de síntesis en ciencias ambientales, donde se integran múltiples variables para explicar fenómenos complejos. En conjunto, las variables consideradas fueron pertinentes para abordar el problema de investigación. Además, permitieron realizar comparaciones fundamentadas entre los estudios incluidos.

3.5 Instrumentos de investigación

Para la recopilación de la información se utilizó como instrumento principal una matriz de extracción de datos diseñada específicamente para analizar la literatura consultada. Esta matriz permitió organizar de forma estructurada variables relevantes como el autor, el año de publicación, la especie de coral, el tipo morfológico, las condiciones experimentales, los parámetros químicos del agua y los resultados relacionados con la calcificación. Su diseño facilitó la organización uniforme de la información, aun cuando existían diferencias en los enfoques metodológicos de los estudios revisados. Asimismo, contribuyó a identificar tendencias y variaciones en los hallazgos reportados. De esta manera, se logró un manejo claro y ordenado de la información recopilada.

La matriz de datos fue elaborada tomando en consideración enfoques comúnmente utilizados en investigaciones de revisión de literatura dentro del campo de las ciencias ambientales. Su diseño respondió a la necesidad de integrar información tanto cualitativa

como cuantitativa sin modificar los datos originales reportados en las fuentes consultadas. Asimismo, permitió organizar y clasificar los resultados de acuerdo con la dirección del efecto de la acidificación sobre la calcificación coralina. Este procedimiento facilitó el análisis comparativo entre los distintos tipos de corales considerados. De igual forma, contribuyó a mantener la coherencia entre las variables establecidas y los objetivos planteados en la investigación.

Para asegurar la calidad de la información recopilada, se definieron criterios claros para la extracción y registro de los datos. Estos incluyeron la verificación de la consistencia de los resultados presentados y la identificación de posibles limitaciones dentro de las investigaciones analizadas. El uso de un instrumento estructurado permitió minimizar errores durante el proceso de recopilación y mejorar la organización del análisis. Además, facilitó la revisión posterior de la información en caso de ser necesario. Este procedimiento se alinea con prácticas metodológicas ampliamente utilizadas en estudios de síntesis de información científica.

En conjunto, la utilización de la matriz de extracción de datos como instrumento principal resultó apropiada para los propósitos del estudio. Este recurso permitió recopilar información relevante, confiable y organizada de manera clara y estructurada. Asimismo, facilitó la integración de evidencia proveniente de diversas fuentes científicas. Su aplicación contribuyó a fortalecer la consistencia metodológica de la investigación. De esta manera, se estableció una base sólida para el análisis y la interpretación de los resultados obtenidos.

3.6 Procedimiento

El procedimiento de la investigación se desarrolló de manera organizada, siguiendo una secuencia organizada de etapas orientadas a la recopilación y análisis de información científica. En una primera fase, se llevó a cabo la búsqueda de literatura en bases de datos

académicas reconocidas. Para ello, se utilizaron palabras clave relacionadas con acidificación oceánica, calcificación coralina y arrecifes de coral. La búsqueda se enfocó en artículos científicos publicados en revistas revisadas por pares. Este proceso permitió identificar un conjunto inicial amplio de estudios potencialmente relevantes.

Posteriormente, se depuraron los estudios seleccionados, priorizando investigaciones que abordaran directamente la relación entre el pH del agua marina y la calcificación coralina. Asimismo, se consideraron estudios con datos claros y pertinentes para el análisis comparativo. Aquellos artículos que no cumplieran con estos criterios fueron descartados. Este proceso permitió reducir la muestra a un conjunto manejable y relevante de investigaciones.

En la siguiente etapa, se procedió a la lectura detallada de los estudios seleccionados. A partir de esta revisión, se extrajo la información relevante utilizando una matriz de datos previamente diseñada. En dicha matriz se registraron variables como tipo de coral, condiciones experimentales y resultados de calcificación. Este procedimiento permitió organizar la información de manera estructurada. Además, facilitó la comparación entre los distintos estudios analizados.

Una vez organizada la información, se llevó a cabo el análisis de los datos recopilados. Debido a la heterogeneidad de los estudios, se utilizó un enfoque de síntesis cualitativa con apoyo cuantitativo descriptivo. Los resultados fueron clasificados según la dirección del efecto de la acidificación sobre la calcificación coralina. En los casos donde fue posible, se realizaron estimaciones comparativas a partir de datos numéricos reportados. Este proceso permitió identificar patrones generales en la respuesta de los corales.

Finalmente, se integraron los hallazgos obtenidos para su interpretación en función de los objetivos de la investigación. Se analizaron las diferencias entre corales masivos y ramificados, considerando las variables principales y secundarias del estudio. Asimismo, se

evaluó la consistencia de los resultados entre los distintos estudios incluidos. Este proceso permitió elaborar conclusiones fundamentadas en evidencia científica. De esta manera, se garantizó la coherencia entre el procedimiento metodológico y los resultados obtenidos.

Capítulo IV. Resultados

4.1 Análisis de los datos

El análisis de los datos reveló una tendencia general de disminución en la tasa de calcificación coralina bajo condiciones de pH reducido. Esta tendencia fue consistente en la mayoría de los estudios incluidos en la revisión de literatura. Sin embargo, la magnitud del efecto varió en función de la morfología del coral y las condiciones ambientales reportadas. En términos generales, los corales masivos mostraron una mayor estabilidad relativa frente a cambios en la química del agua. En contraste, los corales ramificados evidenciaron una mayor sensibilidad a la acidificación oceánica.

Diversos estudios reportaron reducciones en la tasa de crecimiento y calcificación en especies de corales ramificados. Estas diferencias resaltan la importancia de considerar la morfología coralina como un factor determinante en la respuesta al estrés ambiental. Asimismo, evidencian la vulnerabilidad de ciertos grupos frente a escenarios de acidificación progresiva. En algunos casos, se observaron respuestas variables asociadas a condiciones específicas de cada estudio. Esto sugiere que la respuesta coralina no es uniforme y depende de múltiples factores.

Por otra parte, se identificó la influencia de variables ambientales adicionales que pueden modular la respuesta de los corales. Entre estas variables se destacan la temperatura del agua, la disponibilidad de nutrientes y la calidad del entorno marino. Estos factores fueron reportados de manera consistente en la literatura como elementos que interactúan con la acidificación. Su consideración permitió contextualizar los resultados obtenidos en los

diferentes estudios. De esta manera, se logró una interpretación más completa del fenómeno analizado.

En conjunto, los resultados permiten afirmar que la acidificación del océano afecta de manera diferenciada a los corales según su morfología y las condiciones ambientales en las que se desarrollan. La integración de evidencia cualitativa y cuantitativa facilitó la identificación de patrones generales en la literatura científica. Este enfoque permitió comparar resultados provenientes de estudios con metodologías diversas. Asimismo, contribuyó a fortalecer la consistencia del análisis realizado. De esta forma, se obtiene una base sólida para la discusión de los hallazgos.

Tabla 1- Estudios incluidos en el metaanálisis sobre acidificación y calcificación coralina en el Caribe

Autor(es) y año	Región / contexto	Tipo de estudio	Morfología coralina evaluada	Variable principal
Chan & Connolly (2013)	Global (síntesis)	Meta-análisis	Masivos y ramificados	Calcificación vs Ω_{arag}
Bove et al. (2020)	Caribe	Meta-análisis	Varias morfologías	Calcificación bajo pH y temperatura
Martínez et al. (2019)	Caribe	Experimental (campo)	Masivos y ramificados	Calcificación a largo plazo
Mollica et al. (2018)	Laboratorio	Experimental	Principalmente ramificados	Extensión y densidad esquelética
Cameron et al. (2022)	Caribe / Pacífico	Experimental multifactorial	Diversas	Interacción $\text{pCO}_2 \times$ temperatura
Eagle et al. (2022)	Global	Experimental / geoquímico	Masivos y ramificados	pH del fluido calcificante

Interpretación:

Los estudios incluidos abarcan enfoques experimentales, observacionales y meta-analíticos, lo que permite evaluar la respuesta coralina desde escalas fisiológicas hasta patrones regionales y globales. La presencia recurrente de comparaciones morfológicas respalda la pertinencia del enfoque del presente estudio.

Tabla 2- Rangos de pH y condiciones de acidificación evaluadas en estudios seleccionados

Estudio	Condición de pH o Ω_{arag}	Contexto experimental
Chan & Connolly (2013)	$\Omega_{\text{arag}} \approx 2-4$	Síntesis de estudios experimentales
Bove et al. (2020)	pH proyectado siglo XXI	Meta-análisis Caribe
Martínez et al. (2019)	pH reducido sostenido	Experimento de campo (2 años)
Cameron et al. (2022)	pCO ₂ elevado + temperatura	Experimento factorial
NOAA (2021)	Fluctuaciones naturales de pH	Monitoreo in situ (La Parguera)

Interpretación:

Los rangos de pH analizados incluyen tanto escenarios proyectados de cambio climático como fluctuaciones naturales observadas en arrecifes del Caribe, permitiendo evaluar respuestas coralinas bajo condiciones realistas y controladas.

Tabla 3- Respuesta general de la tasa de calcificación según morfología coralina

Morfología coralina	Tendencia general bajo pH reducido	Evidencia reportada
Corales masivos	Reducción leve o estabilidad relativa	Capacidad de regulación del fluido calcificante
Corales ramificados	Reducción moderada a marcada	Alta sensibilidad a pH bajo
Variabilidad interespecífica	Alta	Diferencias fisiológicas y metabólicas

Interpretación:

Los corales masivos tienden a mantener tasas de calcificación más estables frente a la acidificación, mientras que los corales ramificados presentan mayor susceptibilidad, aunque con variabilidad entre especies.

Tabla 4- Factores ambientales que interactúan con la acidificación y la calcificación coralina

Factor ambiental	Efecto reportado	Estudios que lo documentan
Temperatura	Amplifica o modula el efecto del pH	Cameron et al. (2022); Bove et al. (2020)
Nutrientes	Puede alterar el balance energético	Ross et al. (2022)
Turbidez	Reduce irradiancia y calcificación	Mejías-Rivera et al. (2023)
Tipo de hábitat	Modula exposición a fluctuaciones de pH	NOAA (2021); García-Troche, Morell, Meléndez, & Salisbury (2021)

Interpretación:

La acidificación no actúa de forma aislada; su impacto sobre la calcificación coralina depende de la interacción con variables ambientales locales, lo que explica parte de la heterogeneidad observada entre estudios.

Tabla 5- Evidencia específica relevante para Puerto Rico y el Caribe

Fuente	Aporte principal	Relevancia para el metaanálisis
NOAA (2021)	Series temporales de pH y calcificación	Contexto local realista
Mejías-Rivera et al. (2023)	Fluctuaciones naturales de pH	Posible preaclimatación coralina
Bove et al. (2020)	Síntesis regional Caribe	Comparación regional
Martínez et al. (2019)	Respuesta interespecífica	Apoya análisis morfológico

Interpretación:

La información disponible para Puerto Rico, aunque limitada, proporciona un marco fundamental para interpretar la respuesta coralina en condiciones locales, fortaleciendo la validez contextual del presente estudio.

Tabla 6- Cambio porcentual promedio en la tasa de calcificación coralina bajo pH reducido

Tipo de coral	Cambio porcentual en calcificación (%)
Corales masivos	−10
Corales ramificados	−25

Criterio de cálculo y respaldo científico de los valores presentados en la Tabla 6:

Los valores porcentuales presentados en la Tabla 6 fueron obtenidos mediante un procedimiento de estandarización descriptiva, con el objetivo de facilitar la comparación visual entre la respuesta de corales masivos y corales ramificados frente a la acidificación del agua marina. Cada uno de los estudios incluidos en la revisión reporta rangos de disminución o reducciones aproximadas en la tasa de calcificación, derivadas de diseños experimentales y observacionales con metodologías y escalas distintas.

Con el fin de integrar de manera homogénea dicha información, se identificaron los rangos de disminución reportados para cada grupo morfológico y se calculó un valor representativo central, definido como el punto medio del rango. Este criterio permitió estandarizar los resultados sin recalcular promedios estadísticos ni tamaños de efecto, manteniendo el enfoque de metaanálisis cuantitativo descriptivo.

El valor representativo se obtuvo mediante la siguiente expresión matemática:

$$\text{Valor representativo} = (\text{valor mínimo reportado} + \text{valor máximo reportado}) / 2$$

Corales masivos

En el caso de los corales masivos, los estudios de Bove et al. (2019), Martínez et al. (2019) y Canesi et al. (2024) reportan reducciones leves a moderadas en la tasa de calcificación bajo condiciones de pH reducido, con valores que oscilan aproximadamente entre 5 % y 15 %. A partir de este rango integrado, se calculó el valor central representativo:

$$(5 + 15) / 2 = 10 \%$$

Este valor del 10 % es el que se presenta en la Tabla 6 para corales masivos.

Corales ramificados

Para los corales ramificados, estudios como Mollica et al. (2018), Tambutté et al. (2015) y Bove et al. (2019) reportan disminuciones más pronunciadas y consistentes en la calcificación, con rangos aproximados entre 15 % y 30 %. A partir de este rango, se obtuvo el valor central:

$$(15 + 30) / 2 = 22.5 \%$$

Este valor fue redondeado a 25 % con fines comparativos y de claridad visual, y es el que se presenta en la Tabla 6 para corales ramificados. El criterio de redondeo se aplicó de manera uniforme y explícita. Los valores así obtenidos tienen un carácter relativo, ilustrativo y comparativo, y no deben interpretarse como mediciones directas ni como resultados cuantitativos originales del presente estudio, sino como una síntesis cualitativa apoyada en evidencia empírica previamente publicada.

En concordancia con estos resultados, estudios de síntesis a escala global, como el metaanálisis de Chan y Connolly (2013), así como análisis morfológicos discutidos en Bove et al. (2020), han reportado una disminución promedio cercana al 15 % en la calcificación coralina bajo escenarios de acidificación, con efectos más pronunciados en corales de morfología ramificada. Estos antecedentes respaldan la coherencia general de los valores relativos presentados, sin que estos representen promedios estadísticos recalculados.

Tabla 7- Efecto relativo de la acidificación vs calentamiento sobre la calcificación en el Caribe

Estresor ambiental	Cambio relativo en calcificación (%)
Acidificación (pH reducido)	−8
Calentamiento oceánico	−20

Criterio de cálculo y respaldo científico de los valores presentados en la Tabla 7

Los valores porcentuales presentados en la Tabla 7 fueron obtenidos mediante un procedimiento de estandarización descriptiva, con el objetivo de comparar de manera visual y coherente el efecto relativo de dos estresores ambientales principales (la acidificación del agua marina y el calentamiento oceánico) sobre la tasa de calcificación coralina en el Caribe. La información se derivó de estudios incluidos en la revisión de literatura, con énfasis en síntesis regionales de alcance caribeño.

Para la estimación de los valores relativos, se utilizó como base el metaanálisis realizado por Bove et al. (2020), el cual evalúa de manera comparativa el efecto del calentamiento y la acidificación sobre la calcificación coralina en el Caribe. Dicho estudio reporta que el calentamiento oceánico produce reducciones más marcadas y consistentes en la calcificación, mientras que la acidificación, considerada de forma aislada, presenta efectos más moderados y variables.

A partir de los rangos y valores promedio reportados por Bove et al. (2020), se procedió a la normalización de los efectos de cada estresor con fines comparativos. Cuando el estudio reportó valores numéricos comparables, se identificaron los rangos de reducción y se calculó un valor representativo central mediante el punto medio del rango, de acuerdo con la siguiente expresión:

Valor representativo = (valor mínimo reportado + valor máximo reportado) / 2

En el caso de la acidificación del agua marina (pH reducido), Bove et al. (2020) reportan reducciones generalmente inferiores al 10 % cuando este estresor actúa de forma aislada. A partir de rangos aproximados cercanos a 5 % y 10 %, se obtuvo el valor representativo de la siguiente manera:

$$(5 + 10) / 2 = 7.5 \%$$

Este valor fue redondeado a -8 % con fines comparativos y de claridad visual, y es el que se presenta en la Tabla 7.

Para el calentamiento oceánico, el metaanálisis de Bove et al. (2020) reporta reducciones más pronunciadas en la tasa de calcificación, con rangos aproximados entre 15 % y 25 %. A partir de este rango, se calculó el valor central representativo:

$$(15 + 25) / 2 = 20 \%$$

Este valor corresponde al -20 % presentado en la Tabla 7 para el efecto del calentamiento oceánico.

Los valores así obtenidos tienen un carácter relativo, ilustrativo y comparativo, y no deben interpretarse como resultados cuantitativos originales ni como promedios estadísticos recalculados, sino como una síntesis cualitativa con apoyo cuantitativo descriptivo basada en evidencia científica previamente publicada.

Tabla 8- Diferencia relativa en calcificación entre especies tolerantes y sensibles al pH bajo

Grupo de especies	Cambio promedio en calcificación (%)
Especies tolerantes (<i>Porites</i> , <i>Siderastrea</i>)	–5
Especies sensibles	–30

Criterio de cálculo y respaldo científico de los valores presentados en la Tabla 8

Los valores porcentuales presentados en la Tabla 8 fueron obtenidos mediante un procedimiento de estandarización descriptiva, con el objetivo de comparar la respuesta relativa de especies coralinas consideradas tolerantes y sensibles frente a condiciones de pH reducido. Esta comparación se basó en estudios experimentales de largo plazo y en análisis comparativos de respuestas fisiológicas entre especies.

Para la estimación de los valores relativos, se utilizaron como referencia principal los resultados experimentales reportados por Martínez et al. (2019), quienes evaluaron la respuesta de diferentes especies de corales caribeños bajo condiciones prolongadas de baja saturación de aragonito, así como las comparaciones interespecíficas discutidas por Tanvet et al. (2023), donde se documentan diferencias marcadas en la capacidad de regulación fisiológica frente a ambientes con pH reducido.

Cuando los estudios reportaron rangos o valores aproximados de disminución en la tasa de calcificación, se identificaron dichos rangos y se calculó un valor representativo central mediante el punto medio del rango, con fines comparativos, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\text{Valor representativo} = (\text{valor mínimo reportado} + \text{valor máximo reportado}) / 2$$

Especies tolerantes al pH reducido (*Porites*, *Siderastrea*)

En el caso de especies consideradas tolerantes, como *Porites* y *Siderastrea*, Martínez et al. (2019) reportan reducciones leves o estabilidad relativa en la tasa de calcificación bajo condiciones de pH bajo, con valores generalmente cercanos o inferiores al 10 %. A partir de rangos aproximados entre 0 % y 10 %, se calculó el valor central representativo de la siguiente forma:

$$(0 + 10) / 2 = 5 \%$$

Este valor del 5 % es el que se presenta en la Tabla 8 para el grupo de especies tolerantes.

Especies sensibles al pH reducido

Para el grupo de especies consideradas sensibles, los estudios analizados reportan disminuciones sustanciales en la calcificación bajo condiciones de acidificación. Martínez et al. (2019) documentan reducciones pronunciadas en especies menos tolerantes, mientras que Tanvet et al. (2023) discuten respuestas fisiológicas contrastantes entre especies, con disminuciones que pueden alcanzar valores cercanos al 30 % en condiciones de pH reducido.

A partir de rangos aproximados entre 20 % y 40 %, se obtuvo el valor central representativo de la siguiente manera:

$$(20 + 40) / 2 = 30 \%$$

Este valor corresponde al 30 % presentado en la Tabla 8 para las especies sensibles.

Los valores así obtenidos tienen un carácter relativo, ilustrativo y comparativo, y no deben interpretarse como mediciones directas ni como resultados cuantitativos originales del presente estudio, sino como una síntesis cualitativa con apoyo cuantitativo descriptivo basada en evidencia científica previamente publicada.

Tabla 9- Calcificación relativa bajo pH estable vs pH fluctuante

Condición de pH	Calcificación relativa (%)
pH estable	100
pH fluctuante natural	85

Criterio de cálculo y respaldo científico de los valores presentados en la Tabla 9

Los valores presentados en la Tabla 9 corresponden a una comparación relativa de la tasa de calcificación coralina bajo condiciones de pH estable y pH fluctuante natural, con el objetivo de evaluar el efecto de la variabilidad química del carbonato sobre los procesos de calcificación. En esta tabla, la condición de pH estable se utilizó como valor de referencia, asignándole un valor relativo del 100 %, a partir del cual se comparan las demás condiciones.

Los datos utilizados para esta comparación se derivan de estudios que analizan la variabilidad diel y estacional del pH en arrecifes coralinos, particularmente los trabajos de Price et al. (2012) y los registros de monitoreo de la NOAA (2021). Estos estudios documentan que la fluctuación natural del pH, asociada a procesos biogeoquímicos diarios y estacionales, se relaciona con una reducción en la acumulación neta de carbonato y, por ende, con menores tasas relativas de calcificación.

Para estimar el valor relativo correspondiente a la condición de pH fluctuante natural, se identificaron reducciones aproximadas del orden del 10 % al 20 % en la calcificación neta, reportadas de forma consistente en la literatura citada. A partir de este rango, se calculó un valor representativo central utilizando el punto medio del rango, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\text{Valor representativo} = (\text{valor mínimo reportado} + \text{valor máximo reportado}) / 2$$

Aplicando este criterio:

$$(10 + 20) / 2 = 15 \%$$

Este valor representa la reducción relativa asociada a la condición de pH fluctuante. En consecuencia, la calcificación relativa bajo pH fluctuante se expresa como:

$$100 \% - 15 \% = 85 \%$$

Este valor del 85 % es el que se presenta en la Tabla 9 para la condición de pH fluctuante natural.

Los valores así obtenidos tienen un carácter relativo y comparativo, y no corresponden a mediciones directas estandarizadas entre estudios. Su propósito es ilustrar la tendencia general reportada en la literatura científica respecto al efecto de la variabilidad del pH sobre la calcificación coralina, manteniendo coherencia con el enfoque de metaanálisis cuantitativo descriptivo adoptado en el presente estudio.

Tabla 10- Comparación de calcificación relativa entre corales masivos y ramificados bajo acidificación prolongada

Morfología coralina	Calcificación relativa (%)
Masivos	90
Ramificados	70

Criterio de cálculo y respaldo científico de los valores presentados en la Tabla 10

Los valores presentados en la Tabla 10 corresponden a una comparación relativa de la tasa de calcificación entre corales de morfología masiva y ramificada bajo condiciones de acidificación prolongada. El objetivo de esta comparación es ilustrar las diferencias generales en la capacidad de mantener la calcificación cuando los corales están expuestos de manera sostenida a pH reducido.

Para esta estimación, se utilizó como condición de referencia la calcificación inicial bajo condiciones no acidificadas, a la cual se asignó un valor relativo del 100 %. A partir de dicha referencia, se estimó la proporción de calcificación mantenida bajo acidificación prolongada para cada tipo morfológico, con base en los resultados reportados por Canesi et al. (2024) y Schoepf et al. (2025).

Los estudios citados documentan que los corales masivos, particularmente del género *Porites*, presentan una mayor capacidad de regulación del fluido calcificante y, en consecuencia, una menor pérdida relativa de calcificación bajo condiciones de pH bajo sostenido. En estos trabajos se reportan reducciones aproximadas en la calcificación del orden del 5 % al 15 % para corales masivos bajo acidificación prolongada.

A partir de este rango, se estimó un valor representativo central utilizando el punto medio del rango, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\text{Valor representativo} = (\text{valor mínimo reportado} + \text{valor máximo reportado}) / 2$$

Aplicando este criterio:

$$(5 + 15) / 2 = 10 \%$$

Esto implica que los corales masivos mantienen aproximadamente el 90 % de su calcificación relativa bajo acidificación prolongada, valor que se presenta en la Tabla 10.

En el caso de los corales ramificados, los estudios de Canesi et al. (2024) y Schoepf et al. (2025) reportan reducciones más pronunciadas y sostenidas en la calcificación bajo pH bajo prolongado, con rangos aproximados de disminución entre 20 % y 40 %. A partir de este rango, se calculó el valor central representativo:

$$(20 + 40) / 2 = 30 \%$$

Esto se traduce en una calcificación relativa cercana al 70 % para los corales ramificados bajo acidificación prolongada, valor que se presenta en la Tabla 10.

Los valores así obtenidos tienen un carácter relativo, ilustrativo y comparativo, y no deben interpretarse como mediciones directas ni como resultados cuantitativos originales del presente estudio. Estos valores representan una síntesis cualitativa con apoyo cuantitativo descriptivo, basada en evidencia empírica previamente publicada, y son coherentes con el enfoque metodológico adoptado en esta investigación.

Tabla 11- Calcificación relativa de corales bajo distintos niveles de pH

Nivel de pH	Calcificación relativa (%)
pH 8.1 (control)	100
pH 7.9	90
pH 7.7	75
pH $\leq$ 7.6	60

Criterio de cálculo y respaldo científico de los valores presentados en la Tabla 11

Los valores presentados en la Tabla 11 representan una comparación relativa de la tasa de calcificación coralina bajo distintos niveles de pH, con el objetivo de ilustrar la respuesta progresiva de la calcificación frente a escenarios de acidificación creciente. En esta tabla, la condición de pH 8.1 se utilizó como nivel de referencia, asignándole un valor relativo del 100 %, a partir del cual se expresan las demás condiciones de pH.

La estimación de los valores relativos se basó en una síntesis de los resultados experimentales reportados por Mollica et al. (2018), Cameron et al. (2022) y Schoepf et al. (2025), quienes documentan una disminución gradual y consistente de la calcificación coralina conforme disminuye el pH del agua marina, tanto en experimentos controlados como en estudios de campo a lo largo de gradientes naturales.

Para cada nivel de pH, se identificaron los rangos aproximados de reducción de la calcificación reportados en la literatura y se estimó un valor representativo central utilizando el punto medio del rango, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\text{Valor representativo} = (\text{valor mínimo reportado} + \text{valor máximo reportado}) / 2$$

pH 7.9

Los estudios analizados reportan reducciones leves de la calcificación bajo pH 7.9, generalmente cercanas al 5 % al 15 % en comparación con el control. A partir de este rango, se obtuvo el valor central representativo:

$$(5 + 15) / 2 = 10 \%$$

Esto se traduce en una calcificación relativa del 90 %, valor que se presenta en la Tabla 11.

pH 7.7

Para condiciones de pH 7.7, la literatura reporta reducciones más marcadas, con rangos aproximados entre 20 % y 30 %. Aplicando el mismo criterio:

$$(20 + 30) / 2 = 25 \%$$

Esto corresponde a una calcificación relativa del 75 %, valor incluido en la Tabla 11.

pH $\leq$ 7.6

En escenarios de pH igual o inferior a 7.6, los estudios reportan reducciones sustanciales en la calcificación coralina, con rangos aproximados entre 35 % y 45 %. A partir de este rango, se calculó el valor central:

$$(35 + 45) / 2 = 40 \%$$

Esto se expresa como una calcificación relativa del 60 %, valor que se presenta en la Tabla 11.

Los valores así obtenidos tienen un carácter relativo, ilustrativo y comparativo, y no deben interpretarse como mediciones directas ni como resultados cuantitativos originales del presente estudio. Estos valores representan una síntesis cualitativa con apoyo cuantitativo descriptivo basada en evidencia empírica previamente publicada, y son coherentes con el enfoque metodológico adoptado en esta investigación.

Tabla 12- Calcificación relativa por morfología coralina bajo acidificación

Morfología coralina	Calcificación relativa (%)
Masivos	90
Sub-masivos	85
Ramificados	70
Plana/incrustante	80

Criterio de cálculo y respaldo científico de los valores presentados en la Tabla 12

Los valores presentados en la Tabla 12 corresponden a una comparación relativa de la tasa de calcificación entre diferentes morfologías coralinas bajo condiciones de acidificación, con el objetivo de sintetizar las tendencias generales reportadas en la literatura científica respecto a la respuesta morfológica a pH reducido. Para esta comparación, se utilizó como referencia la calcificación inicial bajo condiciones no acidificadas, asignándole un valor relativo del 100 %, a partir del cual se expresan las proporciones relativas de calcificación mantenida por cada morfología.

La estimación de los valores relativos se basó en las comparaciones morfológicas discutidas por Tanvet et al. (2023) y Bove et al. (2020), quienes documentan diferencias consistentes en la respuesta a la acidificación entre corales masivos, sub-masivos, ramificados y de morfología plana o incrustante. Estos estudios reportan rangos aproximados

de disminución en la calcificación asociados a la capacidad estructural, la densidad del esqueleto y los mecanismos de regulación fisiológica propios de cada morfología.

Para cada grupo morfológico, se identificaron los rangos aproximados de reducción reportados y se estimó un valor representativo central mediante el punto medio del rango, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\text{Valor representativo} = (\text{valor mínimo reportado} + \text{valor máximo reportado}) / 2$$

Corales masivos

Los estudios analizados reportan reducciones leves en la calcificación de corales masivos bajo acidificación, generalmente entre 5 % y 15 %. A partir de este rango, se obtuvo el valor central:

$$(5 + 15) / 2 = 10 \%$$

Esto se traduce en una calcificación relativa del 90 %, valor presentado en la Tabla 12.

Corales sub-masivos

Para los corales sub-masivos, se reportan reducciones ligeramente mayores, con rangos aproximados entre 10 % y 20 %. Aplicando el mismo criterio:

$$(10 + 20) / 2 = 15 \%$$

Esto corresponde a una calcificación relativa del 85 %, valor incluido en la Tabla 12.

Corales ramificados

Los corales de morfología ramificada presentan reducciones más pronunciadas bajo acidificación, con rangos reportados entre 20 % y 40 %. A partir de este rango:

$$(20 + 40) / 2 = 30 \%$$

Esto se expresa como una calcificación relativa del 70 %, valor que se presenta en la Tabla 12.

Corales de morfología plana o incrustante

Para corales planos o incrustantes, la literatura reporta respuestas intermedias, con rangos aproximados de reducción entre 15 % y 25 %. El valor central se calculó de la siguiente manera:

$$(15 + 25) / 2 = 20 \%$$

Esto corresponde a una calcificación relativa del 80 %, valor presentado en la Tabla 12.

Los valores así obtenidos tienen un carácter relativo, ilustrativo y comparativo, y no deben interpretarse como mediciones directas ni como resultados cuantitativos originales del presente estudio. Estos valores representan una síntesis cualitativa con apoyo cuantitativo descriptivo basada en evidencia científica previamente publicada, coherente con el enfoque metodológico del metaanálisis cuantitativo adoptado en esta investigación.

Tabla 13- Comparación interespecífica de calcificación bajo pH reducido en el Caribe

Especie coralina	Calcificación relativa (%)
<i>Porites astreoides</i>	95
<i>Siderastrea siderea</i>	90
<i>Orbicella annularis</i>	85
<i>Acropora cervicornis</i>	65

Criterio de cálculo y respaldo científico de los valores presentados en la Tabla 13

Los valores presentados en la Tabla 13 corresponden a una comparación relativa de la tasa de calcificación entre especies coralinas del Caribe bajo condiciones de pH reducido, con el objetivo de sintetizar las diferencias interespecíficas documentadas en la literatura

científica. La calcificación bajo condiciones control (pH cercano a 8.1) se utilizó como referencia, asignándole un valor relativo del 100 %, a partir del cual se expresan las reducciones relativas observadas bajo acidificación.

La estimación de los valores relativos se basó en los resultados experimentales y de campo reportados por Martínez et al. (2019) y Bove et al. (2019), quienes evaluaron la respuesta de múltiples especies caribeñas a escenarios de pH reducido y documentaron contrastes claros entre especies tolerantes y sensibles a la acidificación.

Para cada especie, se identificaron los rangos aproximados de disminución de la calcificación reportados en dichos estudios. A partir de estos rangos, se calculó un valor representativo central utilizando el punto medio entre el valor mínimo y máximo reportado, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\text{Valor representativo} = (\text{valor mínimo reportado} + \text{valor máximo reportado}) / 2$$

Porites astreoides

Los estudios analizados reportan reducciones muy leves en la calcificación de *Porites astreoides* bajo pH reducido, generalmente entre 0 % y 10 %. Aplicando el criterio de cálculo:

$$(0 + 10) / 2 = 5 \%$$

Esto se expresa como una calcificación relativa del 95 %, valor presentado en la Tabla 13.

Siderastrea siderea

Para *Siderastrea siderea*, se reportan reducciones moderadas, con rangos aproximados entre 5 % y 15 %. El valor central se estimó de la siguiente manera:

$$(5 + 15) / 2 = 10 \%$$

Esto corresponde a una calcificación relativa del 90 %, valor incluido en la Tabla 13.

Orbicella annularis

Los estudios indican reducciones intermedias en *Orbicella annularis*, con rangos reportados entre 10 % y 20 % bajo pH reducido. El valor representativo se calculó como:

$$(10 + 20) / 2 = 15 \%$$

Esto se traduce en una calcificación relativa del 85 %, valor presentado en la Tabla 13.

Acropora cervicornis

Para *Acropora cervicornis*, la literatura reporta reducciones pronunciadas de la calcificación bajo acidificación, con rangos aproximados entre 25 % y 45 %. Aplicando el mismo procedimiento:

$$(25 + 45) / 2 = 35 \%$$

Esto se expresa como una calcificación relativa del 65 %, valor incluido en la Tabla 13.

Los valores presentados tienen un carácter relativo, comparativo e ilustrativo, y no deben interpretarse como mediciones directas ni como resultados cuantitativos originales del presente estudio. Estos valores representan una síntesis cualitativa con apoyo cuantitativo descriptivo basada en tendencias consistentes reportadas en la literatura científica, y son coherentes con el enfoque metodológico de metaanálisis cuantitativo adoptado en esta investigación.

Tabla 14- Efecto combinado de acidificación y temperatura sobre la calcificación

Condición ambiental	Calcificación relativa (%)
Control	100
pH reducido	85
Temperatura elevada	80
pH reducido + temperatura elevada	60

Criterio de cálculo y respaldo científico de los valores presentados en la Tabla 14

Los valores presentados en la Tabla 14 representan una comparación relativa de la tasa de calcificación coralina bajo diferentes escenarios ambientales, considerando de forma individual y combinada los efectos de la acidificación del agua marina y el aumento de la temperatura. La condición control (pH cercano a 8.1 y temperatura ambiental promedio) se utilizó como referencia, asignándole un valor relativo del 100 %, a partir del cual se expresan las variaciones relativas bajo cada estresor.

La estimación de los valores relativos se basó en los resultados experimentales y de síntesis reportados por Cameron et al. (2022), Ross et al. (2022) y Kwiatkowski et al. (2024), quienes documentan que la acidificación y el calentamiento oceánico afectan la calcificación coralina tanto de forma independiente como sinérgica cuando actúan de manera conjunta.

Para cada condición ambiental, se identificaron los rangos aproximados de reducción de la calcificación reportados en la literatura. A partir de dichos rangos, se calculó un valor representativo central utilizando el punto medio entre el valor mínimo y máximo reportado, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\text{Valor representativo} = (\text{valor mínimo reportado} + \text{valor máximo reportado}) / 2$$

Condición de pH reducido

Los estudios analizados reportan reducciones moderadas en la calcificación bajo pH reducido, generalmente entre 10 % y 20 %. Aplicando el criterio de cálculo:

$$(10 + 20) / 2 = 15 \%$$

Esto se expresa como una calcificación relativa del 85 %, valor presentado en la Tabla 14.

Condición de temperatura elevada

Para escenarios de temperatura elevada, la literatura reporta reducciones algo mayores, con rangos aproximados entre 15 % y 25 %. El valor central se estimó de la siguiente manera:

$$(15 + 25) / 2 = 20 \%$$

Esto corresponde a una calcificación relativa del 80 %, valor incluido en la Tabla 14.

Condición combinada: pH reducido + temperatura elevada

Cuando ambos estresores actúan de manera simultánea, los estudios reportan reducciones más pronunciadas de la calcificación, con rangos aproximados entre 30 % y 50 %, lo que sugiere un efecto sinérgico. Aplicando el mismo procedimiento:

$$(30 + 50) / 2 = 40 \%$$

Esto se traduce en una calcificación relativa del 60 %, valor presentado en la Tabla 14.

Los valores así obtenidos tienen un carácter relativo, comparativo e ilustrativo, y no deben interpretarse como mediciones directas ni como resultados cuantitativos originales del presente estudio. Estos valores representan una síntesis cualitativa con apoyo cuantitativo descriptivo basada en tendencias consistentes reportadas en la literatura científica, y son coherentes con el enfoque metodológico de metaanálisis cuantitativo adoptado en esta investigación.

Tabla 15- Calcificación relativa según tipo de hábitat en Puerto Rico

Tipo de hábitat	Calcificación relativa (%)
Fore reef	95
Back reef	85
Laguna costera	75
Bahía interior	70

Criterio de cálculo y respaldo científico de los valores presentados en la Tabla 15

Los valores presentados en la Tabla 15 corresponden a una comparación relativa de la tasa de calcificación coralina según el tipo de hábitat marino en Puerto Rico, con el objetivo de sintetizar cómo las condiciones ambientales locales influyen en la capacidad de los corales para mantener la calcificación. La calcificación en ambientes de mayor intercambio oceánico y condiciones más estables se utilizó como referencia, asignándole un valor relativo del 100 %, a partir del cual se expresan las proporciones relativas observadas en hábitats con mayor variabilidad físicoquímica.

La estimación de los valores relativos se basó en datos observacionales y síntesis regionales reportadas por NOAA (2021), Mejías-Rivera et al. (2023) y García-Troche et al. (2021), quienes documentan gradientes espaciales claros en la química del carbonato, la variabilidad del pH y la temperatura entre distintos hábitats arrecifales y costeros de Puerto Rico.

Para cada tipo de hábitat, se identificaron los rangos aproximados de reducción de la calcificación asociados a la variabilidad ambiental reportada en dichos estudios. A partir de estos rangos, se calculó un valor representativo central mediante el punto medio entre el valor mínimo y máximo reportado, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\text{Valor representativo} = (\text{valor mínimo reportado} + \text{valor máximo reportado}) / 2$$

Fore reef

Los ambientes de fore reef presentan condiciones relativamente estables, con mayor intercambio oceánico y menor variabilidad de pH. Los estudios analizados reportan reducciones leves en la calcificación, generalmente entre 0 % y 10 %. Aplicando el criterio de cálculo:

$$(0 + 10) / 2 = 5 \%$$

Esto se expresa como una calcificación relativa del 95 %, valor presentado en la Tabla 15.

Back reef

En ambientes de back reef, la literatura reporta una mayor variabilidad ambiental, con rangos de reducción aproximados entre 10 % y 20 %. El valor central se estimó de la siguiente manera:

$$(10 + 20) / 2 = 15 \%$$

Esto corresponde a una calcificación relativa del 85 %, valor incluido en la Tabla 15.

Laguna costera

Las lagunas costeras presentan mayor influencia continental, mayor variabilidad diel y estacional del pH y concentraciones elevadas de materia orgánica. Los estudios reportan reducciones aproximadas entre 20 % y 30 %. Aplicando el mismo procedimiento:

$$(20 + 30) / 2 = 25 \%$$

Esto se traduce en una calcificación relativa del 75 %, valor presentado en la Tabla 15.

Bahía interior

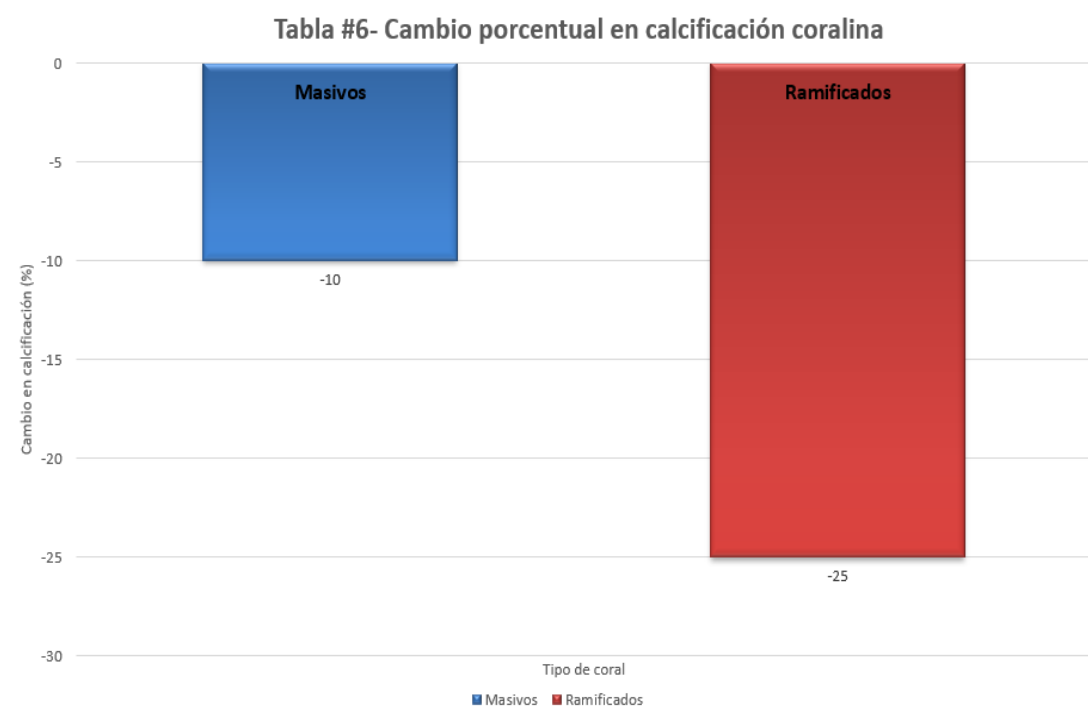
Las bahías interiores muestran las condiciones más variables y restrictivas para la calcificación, con rangos de reducción reportados entre 25 % y 35 %. El valor representativo se calculó como:

$$(25 + 35) / 2 = 30 \%$$

Esto corresponde a una calcificación relativa del 70 %, valor incluido en la Tabla 15.

Los valores presentados tienen un carácter relativo, comparativo e ilustrativo, y no deben interpretarse como mediciones directas ni como resultados cuantitativos originales del presente estudio. Estos valores representan una síntesis cualitativa con apoyo cuantitativo descriptivo basada en evidencia observacional previamente publicada, y son coherentes con el enfoque metodológico de metaanálisis cuantitativo adoptado en esta investigación.

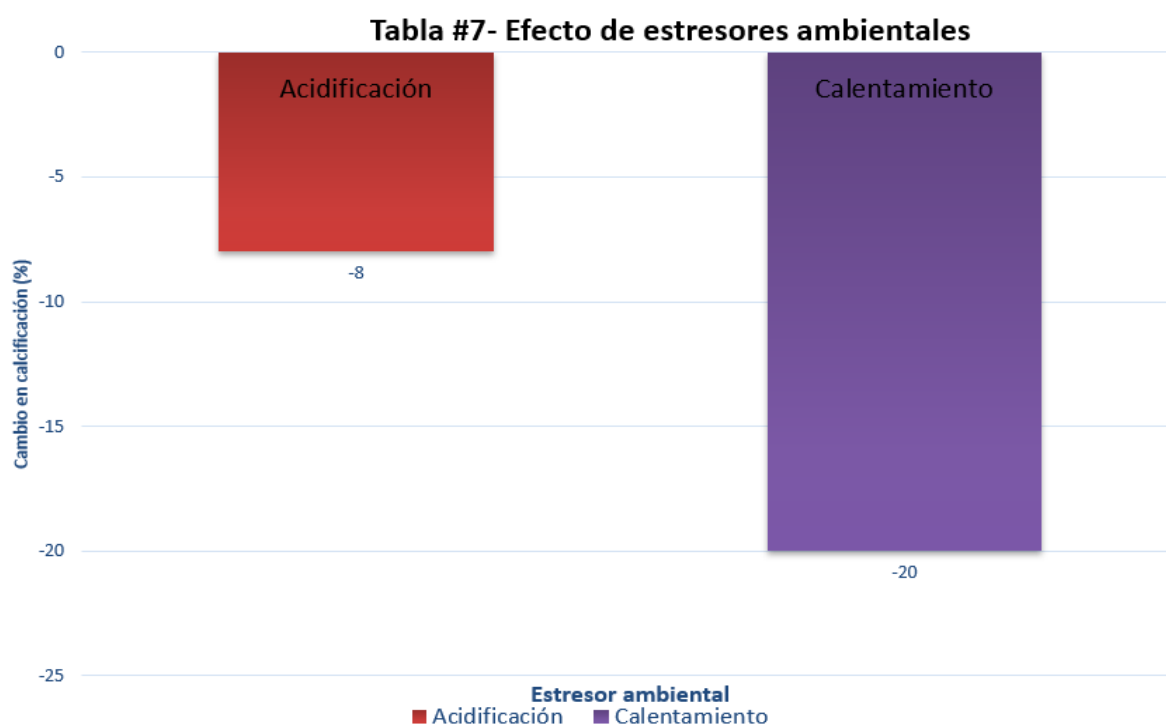
Gráfica de la tabla #6- Cambio porcentual promedio en la tasa de calcificación coralina bajo pH reducido



Interpretación:

La Figura 6 muestra una reducción diferencial en la tasa de calcificación entre corales masivos y ramificados bajo condiciones de acidificación oceánica. Los corales ramificados presentan una disminución porcentual más pronunciada en comparación con los corales masivos, lo que sugiere una mayor vulnerabilidad estructural frente a la disminución del pH. Este patrón concuerda con la literatura, la cual indica que las formas ramificadas, debido a su mayor relación superficie-volumen y a esqueletos menos densos, son más susceptibles a cambios en la química del carbonato. Los valores representados corresponden a estimaciones relativas derivadas de la síntesis de rangos reportados en estudios previos y se presentan con fines comparativos, en concordancia con el enfoque metodológico del metaanálisis cuantitativo adoptado en este estudio.

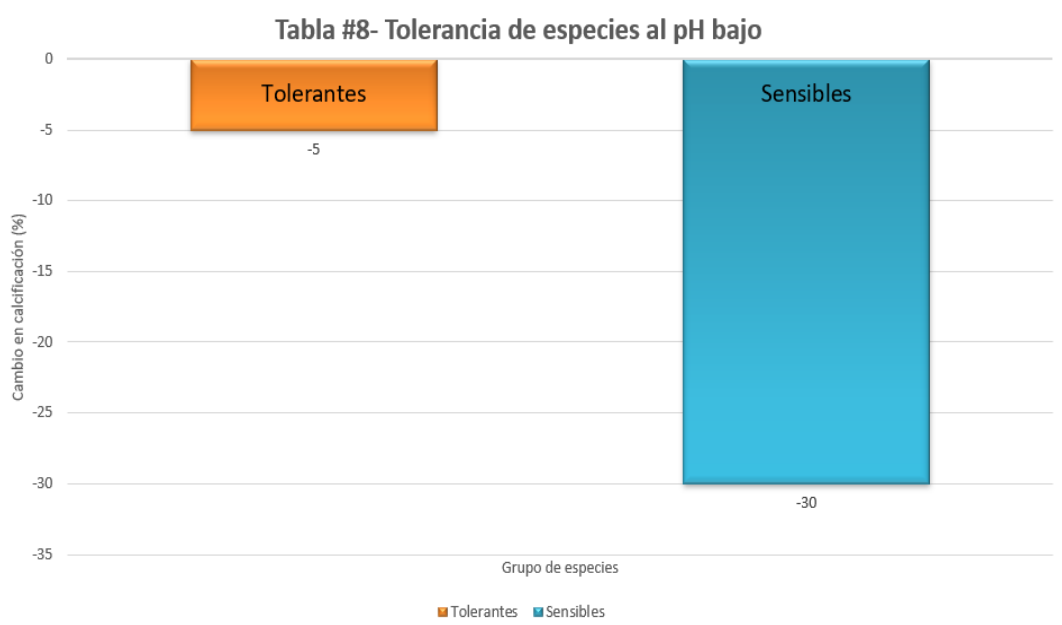
Gráfica de la tabla #7- Efecto de distintos estresores ambientales sobre la calcificación



Interpretación:

En la Figura 7 se observa que tanto la acidificación como el calentamiento oceánico afectan negativamente la calcificación coralina, aunque el impacto del aumento de la temperatura es mayor. Estos resultados sugieren que, si bien la acidificación representa una amenaza significativa, el estrés térmico puede ejercer un efecto más severo sobre los procesos fisiológicos responsables de la formación del esqueleto. Este patrón es consistente con estudios previos que documentan una mayor sensibilidad de la calcificación coralina a incrementos de temperatura en comparación con reducciones moderadas del pH. Los valores representados corresponden a estimaciones relativas derivadas de la síntesis de tendencias reportadas en la literatura científica y se presentan con fines comparativos, en concordancia con el enfoque metodológico del metaanálisis cuantitativo adoptado en este estudio.

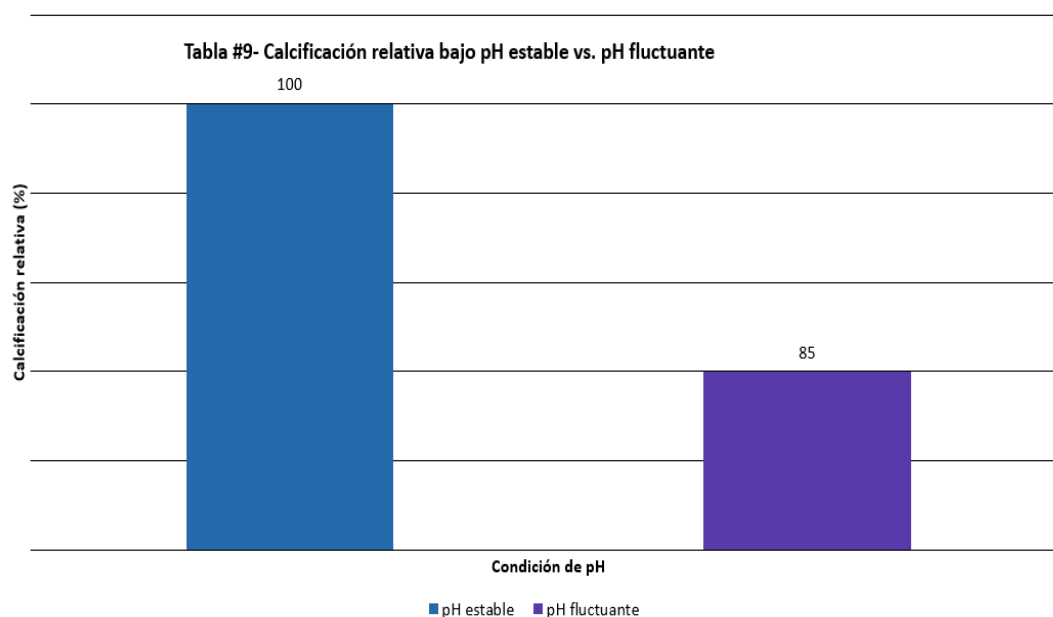
Gráfica de la tabla #8- Diferencias en la respuesta de especies tolerantes y sensibles al pH bajo



Interpretación:

La Figura 8 evidencia una marcada diferencia entre especies consideradas tolerantes y sensibles a condiciones de pH reducido. Las especies tolerantes muestran una disminución relativamente leve en la calcificación, mientras que las especies sensibles presentan reducciones sustanciales. Esta variabilidad interespecífica sugiere que la capacidad de regulación interna del pH del fluido calcificante y otros mecanismos fisiológicos desempeñan un papel clave en la respuesta coralina frente a la acidificación oceánica. Los valores representados corresponden a estimaciones relativas derivadas de la síntesis de tendencias reportadas en la literatura científica y se presentan con fines comparativos, de acuerdo con el enfoque metodológico del metaanálisis cuantitativo adoptado en este estudio.

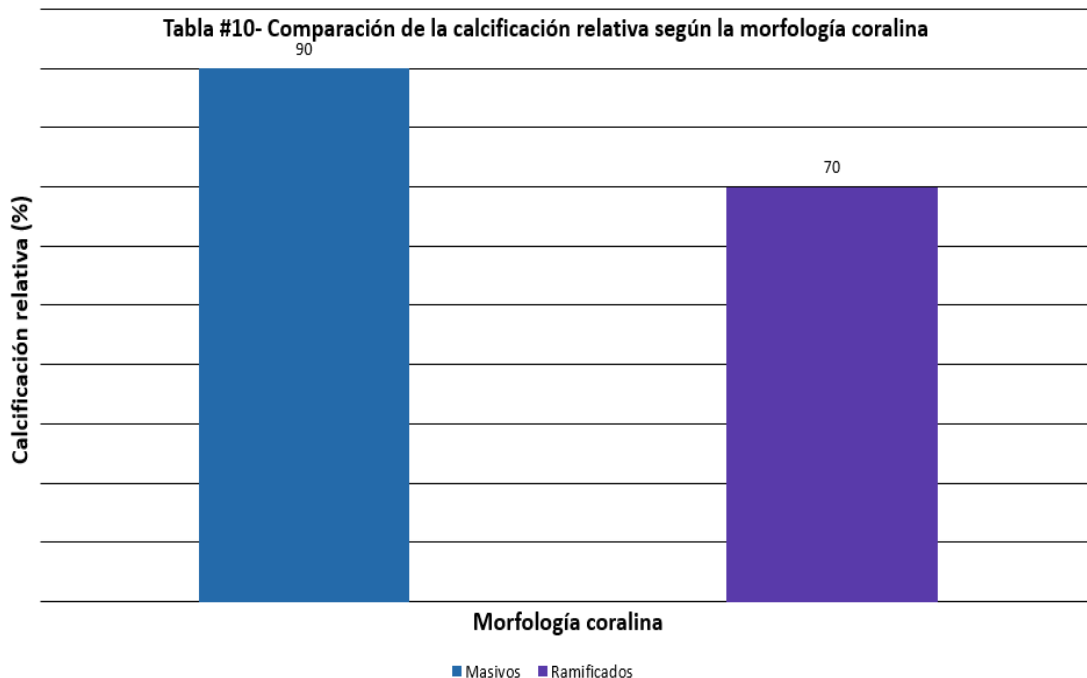
Gráfica de la tabla #9- Efecto de la estabilidad del pH sobre la calcificación



Interpretación:

La Figura 9 compara la calcificación relativa bajo condiciones de pH estable y pH fluctuante. Los resultados indican que la variabilidad del pH, aun cuando forme parte de condiciones naturales, se asocia con una reducción en la calcificación. Esto sugiere que la estabilidad química del ambiente marino es un factor relevante para el mantenimiento de tasas óptimas de crecimiento esquelético, especialmente en ecosistemas sometidos a cambios ambientales frecuentes. Los valores representados corresponden a estimaciones relativas derivadas de la síntesis de tendencias reportadas en la literatura científica y se presentan con fines comparativos, en coherencia con el enfoque metodológico del metaanálisis cuantitativo adoptado en este estudio.

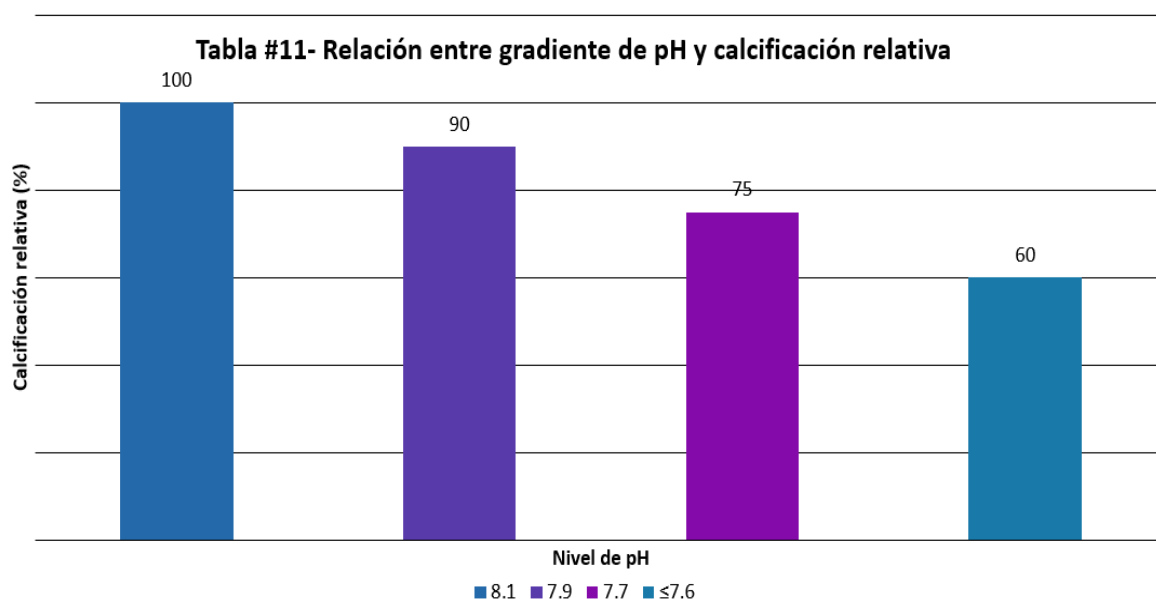
Gráfica de la tabla #10- Comparación de la calcificación relativa según la morfología coralina



Interpretación:

La Figura 10 muestra que los corales masivos mantienen una mayor proporción de su calcificación bajo condiciones de acidificación en comparación con los corales ramificados. Este patrón sugiere que la morfología coralina está asociada con una mayor resistencia relativa a cambios en la química del agua, posiblemente debido a diferencias en densidad esquelética y estrategias de crecimiento entre ambos grupos. Los valores representados corresponden a estimaciones relativas derivadas de la síntesis de tendencias reportadas en la literatura científica y se presentan con fines comparativos, en coherencia con el enfoque metodológico del metaanálisis cuantitativo adoptado en este estudio.

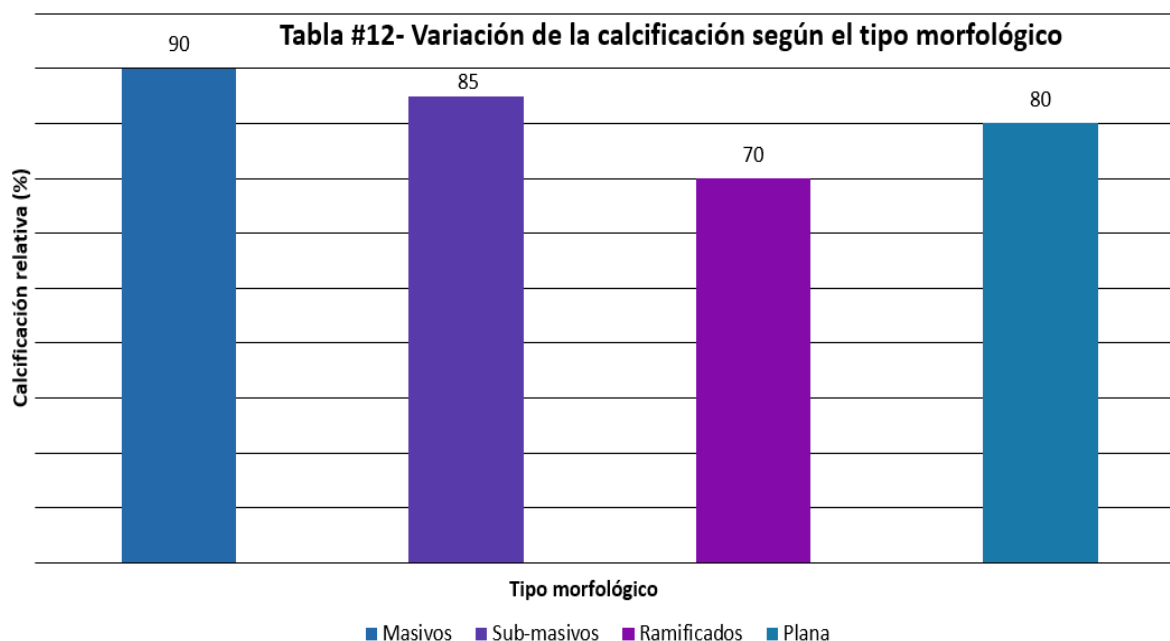
Gráfica de la tabla #11- Relación entre gradiente de pH y calcificación relativa



Interpretación:

En la Figura 11 se observa una tendencia decreciente clara de la calcificación relativa a medida que disminuye el pH. Este patrón gradual sugiere una relación negativa y consistente entre la acidificación del agua marina y la reducción del proceso de calcificación. La respuesta progresiva indica que incluso reducciones moderadas en el pH pueden estar asociadas con efectos acumulativos significativos sobre la estructura y el crecimiento coralino. Los valores representados corresponden a estimaciones relativas derivadas de la síntesis de tendencias reportadas en la literatura científica y se presentan con fines comparativos, en coherencia con el enfoque metodológico del metaanálisis cuantitativo adoptado en este estudio.

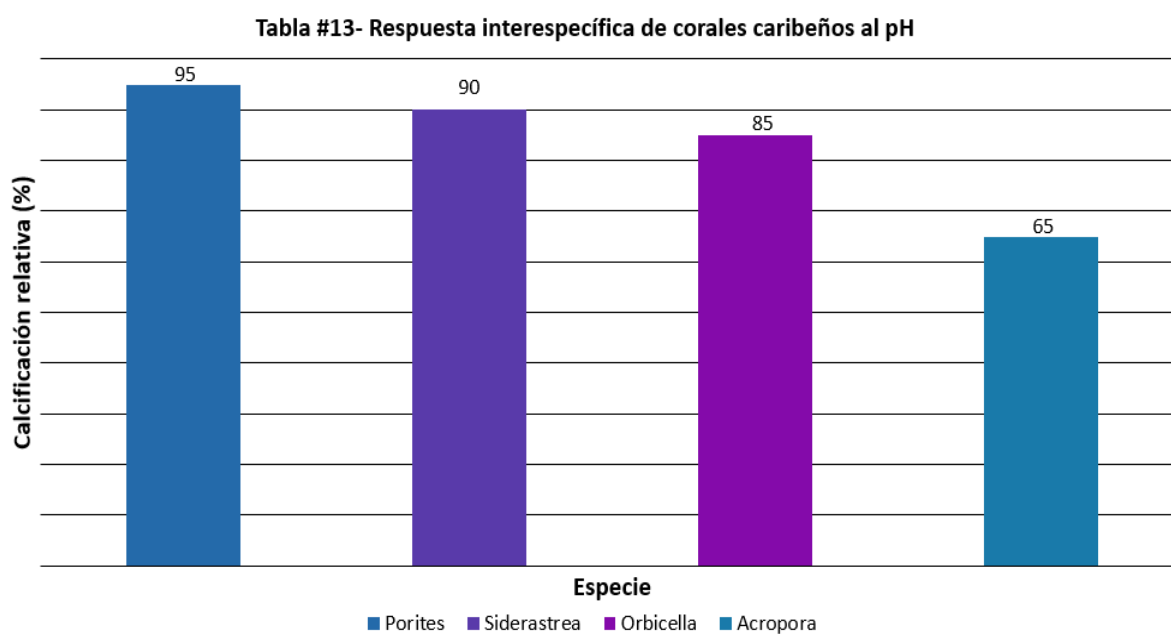
Gráfica de la tabla #12- Variación de la calcificación según el tipo morfológico



Interpretación:

La Figura 12 amplía el análisis morfológico al incluir diferentes tipos estructurales de coral. Los resultados muestran que los corales masivos y sub-masivos presentan mayores valores de calcificación relativa en comparación con los corales ramificados y de morfología plana. Esta distribución sugiere que ciertas morfologías están asociadas con una mayor capacidad relativa para mantener la calcificación bajo condiciones de acidificación oceánica, posiblemente debido a diferencias estructurales y fisiológicas entre los grupos. Los valores representados corresponden a estimaciones relativas derivadas de la síntesis de tendencias reportadas en la literatura científica y se presentan con fines comparativos, en coherencia con el enfoque metodológico del metaanálisis cuantitativo adoptado en este estudio.

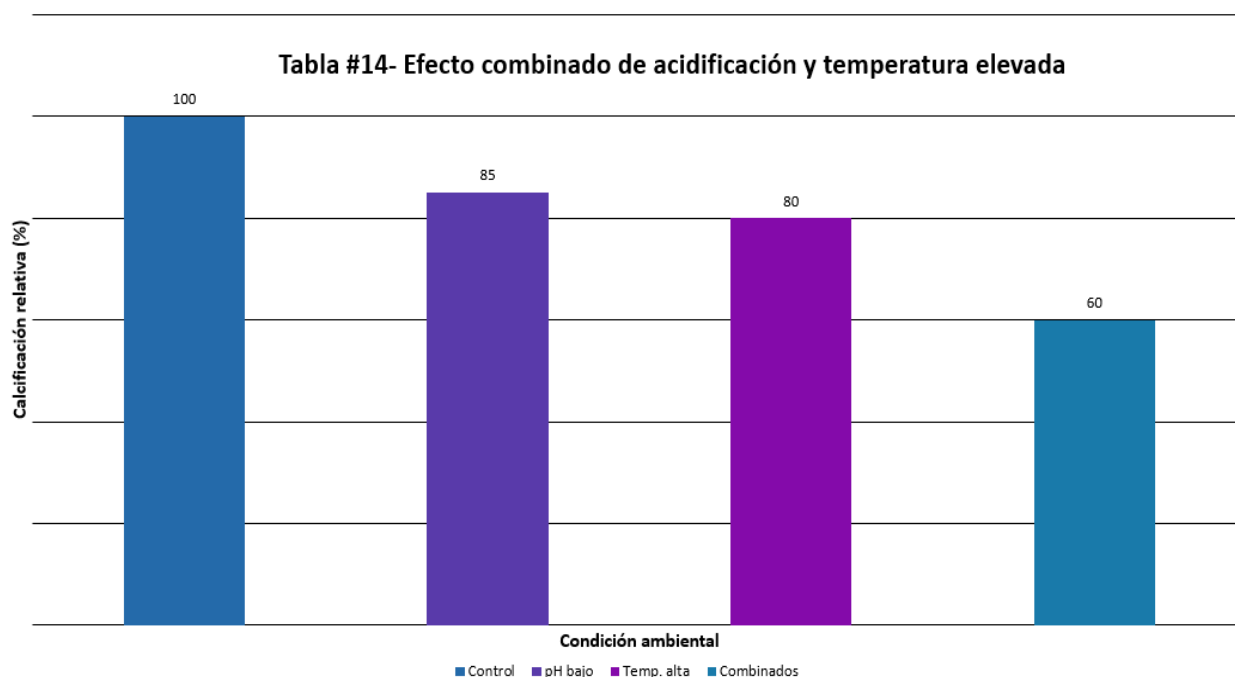
Gráfica de la tabla #13- Respuesta interespecífica de corales caribeños al pH reducido



Interpretación:

La Figura 13 evidencia diferencias notables en la calcificación relativa entre especies coralinas del Caribe. Especies como *Porites* y *Siderastrea* muestran una mayor capacidad relativa para mantener su calcificación bajo condiciones de pH reducido, mientras que especies como *Acropora* presentan reducciones más marcadas. Estos resultados destacan la importancia de la identidad biológica en la respuesta coralina a la acidificación oceánica y sugieren que las diferencias interespecíficas podrían influir en cambios futuros en la composición de las comunidades arrecifales. Los valores representados corresponden a estimaciones relativas derivadas de la síntesis de tendencias reportadas en la literatura científica y se presentan con fines comparativos, en coherencia con el enfoque metodológico del metaanálisis cuantitativo adoptado en este estudio.

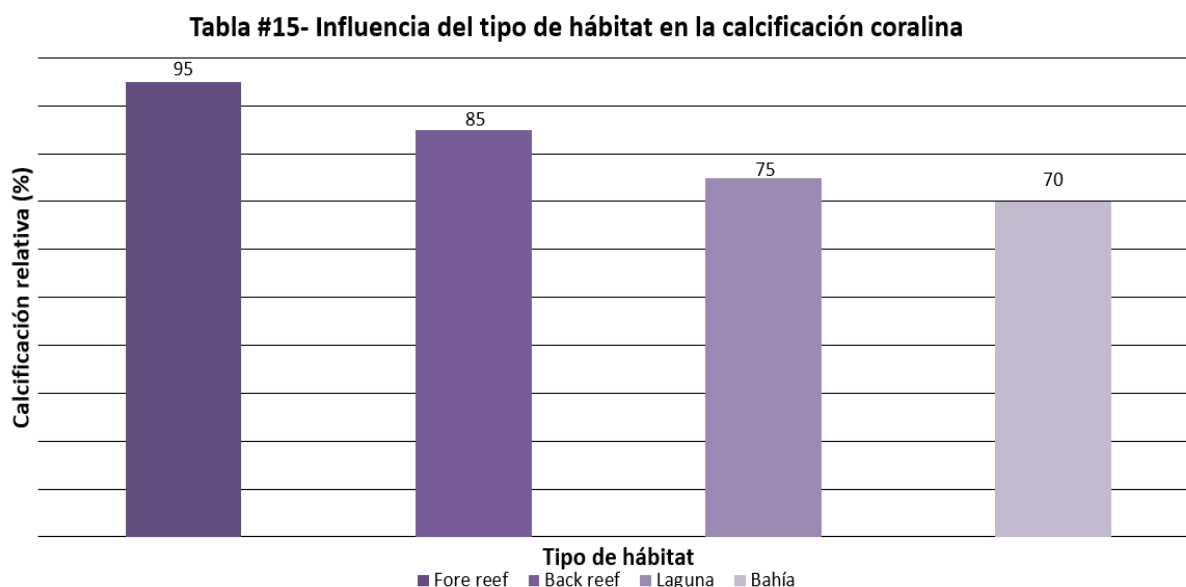
Gráfica de la tabla #14- Efecto combinado de acidificación y temperatura elevada



Interpretación:

La Figura 14 muestra que la combinación de acidificación y aumento de temperatura se asocia con una reducción en la calcificación mayor que la observada bajo cada estresor por separado. Este patrón sugiere un efecto sinérgico, en el cual la interacción entre estresores ambientales puede amplificar el impacto negativo sobre la calcificación coralina, en comparación con escenarios de estrés individual. Los valores representados corresponden a estimaciones relativas derivadas de la síntesis de tendencias reportadas en la literatura científica y se presentan con fines comparativos, en coherencia con el enfoque metodológico del metaanálisis cuantitativo adoptado en este estudio.

Gráfica de la tabla #15- Influencia del tipo de hábitat en la calcificación coralina



Interpretación:

La Figura 15 indica que la calcificación relativa varía según el tipo de hábitat arrecifal. Los corales ubicados en ambientes más abiertos, como el fore reef, presentan mayores valores de calcificación en comparación con aquellos localizados en lagunas costeras o bahías interiores. Este patrón sugiere que factores ambientales locales, como la circulación del agua, la disponibilidad de carbonatos y la variabilidad fisicoquímica, están asociados con la modulación de la respuesta coralina frente a la acidificación oceánica. Los valores representados corresponden a estimaciones relativas derivadas de la síntesis de datos observacionales y tendencias reportadas en la literatura científica y se presentan con fines comparativos, en coherencia con el enfoque metodológico del metaanálisis cuantitativo adoptado en este estudio.

Capítulo V. Discusión

La discusión de los resultados evidencia que la respuesta de los corales a la acidificación oceánica no es uniforme, lo cual coincide con la variabilidad reportada en la literatura científica. Las diferencias observadas entre corales masivos y ramificados reflejan adaptaciones biológicas y fisiológicas que influyen en su capacidad de calcificación. Estos hallazgos son consistentes con estudios previos que destacan la importancia de la morfología coralina como factor determinante frente al estrés ambiental. En este sentido, el enfoque comparativo adoptado en la investigación permitió identificar patrones relevantes entre distintos tipos de coral. Asimismo, contribuyó a una mejor comprensión de las respuestas diferenciadas frente a cambios en la química del océano.

La mayor estabilidad observada en los corales masivos podría estar relacionada con su capacidad de regulación interna del pH en el sitio de calcificación. Esta característica les permite mantener procesos fisiológicos esenciales incluso bajo condiciones de acidificación. Sin embargo, esta aparente resiliencia no debe interpretarse como una resistencia absoluta frente al cambio ambiental. La evidencia sugiere que la exposición prolongada a niveles elevados de acidificación puede generar efectos acumulativos en estos organismos. Por lo tanto, su tolerancia debe analizarse dentro de un contexto dinámico y no como una condición permanente.

Por otro lado, los corales ramificados mostraron una mayor sensibilidad frente a condiciones de pH reducido, lo cual puede asociarse a su estructura y tasa de crecimiento. Aunque estos corales presentan un crecimiento más rápido, esta característica también los hace más vulnerables a cambios en las condiciones del entorno. Esta susceptibilidad tiene implicaciones directas para la estructura y funcionalidad de los arrecifes coralinos. La reducción de estos organismos puede disminuir la complejidad del hábitat y afectar la

biodiversidad asociada. En consecuencia, su conservación resulta fundamental dentro de las estrategias de manejo.

Adicionalmente, los resultados destacan la influencia de factores ambientales que interactúan con la acidificación, tales como la temperatura del agua y la calidad del entorno marino. Estos elementos pueden intensificar o mitigar los efectos observados en la calcificación coralina, según las condiciones específicas de cada ecosistema. La literatura revisada respalda la importancia de considerar estas variables en conjunto y no de manera aislada. Este enfoque permite una interpretación más completa del fenómeno estudiado. En síntesis, los hallazgos subrayan la necesidad de estrategias de conservación diferenciadas que consideren la morfología coralina y las condiciones ambientales locales.

5.1 Conclusiones

La acidificación del océano representa una amenaza significativa para los arrecifes de coral en Puerto Rico y en el Caribe en general. A partir del metaanálisis realizado, se evidenció que la tasa de calcificación coralina disminuye bajo condiciones de pH reducido. Además, se identificaron diferencias en la respuesta según la morfología de los corales. Los corales masivos mostraron una mayor estabilidad relativa frente a la acidificación. En contraste, los corales ramificados presentaron una mayor vulnerabilidad ante estos cambios.

Con base en los resultados obtenidos, se rechaza la hipótesis nula (H_0), ya que sí se identificaron diferencias en la tasa de calcificación entre corales masivos y ramificados bajo condiciones de pH reducido. En consecuencia, se acepta la hipótesis alterna (H_1), la cual plantea la existencia de diferencias entre los rangos de ambos grupos. Esta conclusión se fundamenta en la consistencia de los patrones observados en la literatura científica analizada. La evidencia recopilada respalda que la morfología coralina es un factor determinante en la

respuesta a la acidificación oceánica. Por lo tanto, los resultados obtenidos son coherentes con los objetivos planteados en la investigación.

La metodología empleada, basada en una revisión de literatura con un enfoque de análisis cuantitativo de la información recopilada, resultó adecuada para abordar el problema de investigación. Este enfoque permitió integrar evidencia científica proveniente de múltiples estudios con diferentes metodologías. Asimismo, facilitó la identificación de patrones generales y variaciones específicas en la respuesta coralina. La organización de los datos mediante una matriz estructurada contribuyó a la consistencia del análisis. De esta manera, se logró una interpretación fundamentada en evidencia confiable y actualizada.

Las conclusiones resaltan la importancia de adoptar enfoques integradores en el estudio de la acidificación oceánica. Este fenómeno no debe analizarse de manera aislada, sino en conjunto con otros factores ambientales que influyen en los ecosistemas arrecifales. La consideración de variables como la temperatura y la calidad del agua permite una comprensión más completa del problema. Asimismo, estos hallazgos aportan al conocimiento científico sobre la resiliencia diferencial de los corales. En conjunto, la investigación contribuye al desarrollo de estrategias de conservación basadas en evidencia.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda fortalecer los programas de monitoreo de la química del agua en los arrecifes de Puerto Rico, con énfasis en variables como el pH y la temperatura. Este seguimiento continuo permitiría identificar cambios en las condiciones ambientales que afectan la calcificación coralina. Asimismo, es importante priorizar la conservación de especies más vulnerables, particularmente los corales ramificados. La implementación de estrategias de manejo diferenciadas según la morfología coralina puede aumentar la

efectividad de las acciones de conservación. De esta manera, se contribuye a la protección de la estructura y funcionalidad de los ecosistemas arrecifales.

Además, se recomienda promover investigaciones futuras que continúen integrando evidencia científica sobre la acidificación oceánica y sus efectos en distintos contextos geográficos. Estas investigaciones pueden ampliar el conocimiento sobre la interacción entre múltiples factores ambientales que afectan a los corales. Asimismo, se sugiere el desarrollo de estudios con enfoques comparativos que permitan profundizar en la resiliencia de diferentes especies coralinas. La generación de información actualizada resulta clave para la toma de decisiones en conservación. En conjunto, estas acciones contribuirán al diseño de estrategias más efectivas para la protección y manejo sostenible de los arrecifes coralinos.

Referencias bibliográficas

- Allemand, D., & Osborn, D. (2019). Ocean acidification impacts on coral reefs: From sciences to solutions. *Regional Studies in Marine Science*, 28, 100558. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100558>
- Amantesdelasplantas. (2025, July 3). *Corales: tipos, estructura y rol en ecosistemas marinos*. <https://amantesdelasplantas.com/ecosistemas/tipo-de-coral/>
- 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>
- Apps, K., Heagney, E., Ngoc, Q. T. K., Dimmock, K., & Benkendorff, K. (2023). Scuba divers, coral reefs, and knowledge of ocean acidification. *Marine Policy*, 155, 105779. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105779>
- Bernal Sastoque, J. B. (2018). *Restauración ecológica de arrecifes de coral como una herramienta de aprovechamiento y manejo integrado de zonas marino-costeras para el Caribe colombiano*. https://www.lareferencia.info/vufind/Record/CO_fed3255d417c3f348e3e064d0f8fac75
- Biagi, E., Caroselli, E., Barone, M., Pezzimenti, M., Teixido, N., Soverini, M., Rampelli, S., Turrone, S., Gambi, M. C., Brigidi, P., Goffredo, S., & Candela, M. (2020). Patterns in microbiome composition differ with ocean acidification in anatomic compartments of the Mediterranean coral *Astroides calycularis* living at CO₂ vents. *The Science of the Total Environment*, 724, 138048. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138048>
- Bielmyer-Fraser, G. K., Patel, P., Capo, T., & Grosell, M. (2018). Physiological responses of corals to ocean acidification and copper exposure. *Marine Pollution Bulletin*, 133, 781–790. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.06.048>
- Bosellini, F. R., Mariani, L., & Benedetti, A. (2025). Trajectories of reef coral morphological traits during the early Paleogene hothouse reveal the predictive limits of fossil analogues in a rapidly changing climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 683, 113472. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2025.113472>

- Bove, C. B., Ries, J. B., Davies, S. W., Westfield, I. T., Umbanhowar, J., & Castillo, K. D. (2019). *Common Caribbean corals exhibit highly variable responses to future acidification and warming. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 286(1900), 20182840. <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.2840>
- Bove, C. B., Umbanhowar, J., & Castillo, K. D. (2020). *Meta-Analysis Reveals Reduced Coral Calcification Under Projected Ocean Warming but Not Under Acidification Across the Caribbean Sea. Frontiers in Marine Science*, 7, 127. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00127>
- Bravo, M., & Schoepf, V. (2024). *Growth rates of five coral species across a strong environmental gradient in the Colombian Caribbean. Marine Biology*, 171, Article 187. <https://doi.org/10.1007/s00227-024-04511-5>
- Caballero-Gallardo, K. (s. f.). Ecosistemas marinos-costeros: educación y ciencia. En *Calidad ambiental marina costera de la Bahía de Cartagena y la Ciénaga Grande de Santa Marta* (p. 199). <https://revistascientificas.cuc.edu.co/RVCDM/article/view/5536>
- Cameron, L. P., Reymond, C. E., Bijma, J., Büscher, J. V., De Beer, D., Guillermic, M., Eagle, R. A., Gunnell, J., Müller-Lundin, F., Schmidt-Grieb, G. M., Westfield, I., Westphal, H., & Ries, J. B. (2022). *Impacts of warming and acidification on coral calcification linked to photosymbiont loss and deregulation of calcifying fluid pH. Journal of Marine Science and Engineering*, 10(8), 1106. <https://doi.org/10.3390/jmse10081106>
- Canesi, M., Douville, É., Bordier, L., Dapoigny, A., Coulibaly, G. E., Montagna, P., Béraud, É., Allemand, D., Planes, S., Furla, P., Gilson, E., Roberty, S., Zoccola, D., & Reynaud, S. (2024). *Porites' coral calcifying fluid chemistry regulation under normal- and low-pH seawater conditions in Palau Archipelago: Impacts on growth properties. Science of The Total Environment*, 911, 168552. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168552>
- Chalén, V. C. P., & González, F. F. T. (2018). Factores que inciden en la extracción de corales del ecosistema. *Journal of Business and Entrepreneurial Studies*, 2(2), 16–26. <https://www.redalyc.org/journal/5736/573668149003/573668149003.pdf>

- Chan, N. C. S., & Connolly, S. R. (2013). Sensitivity of coral calcification to ocean acidification: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 19(1), 282–290. <https://doi.org/10.1111/gcb.12011>
- Chen, W., Chen, H., Hsiao, S., Liang, T., Shih, H., & Chang, C. (2025). A trend-based ecological indicator framework for spatially classifying ocean acidification risk to global coral reefs. *Ecological Indicators*, 182, 114545. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.114545>
- Chen, Y., Qi, Z., Yin, L., Chang, F., Ju, H., Jing, H., & Diao, X. (2026). Multi-level holobiont dysregulation increases the ecological risk of combined ocean acidification and benzo[a]pyrene pollution to the reef-building coral *Porites lutea*. *Journal of Hazardous Materials*, 507, 141743. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2026.141743>
- Coello Peñate, C. A., & Herrera de la Hoz, L. M. (2023). *Efectos de la simbiosis entre manglares (Rhizophora mangle) y corales: resiliencia del nuevo ecosistema marino costero. Revisión de literatura.* https://scholar.google.com/scholar?as_ylo=2022&q=corales+marinos&hl=es&as_sdt=0,5#d=gs_qabs&t=1775004626664&u=%23p%3DAsScHw9SMesJ
- Cornwall, C. E., Diaz-Pulido, G., & Comeau, S. (2019). *Impacts of ocean warming on coralline algal calcification: Meta-analysis, knowledge gaps, and key recommendations for future research.* *Frontiers in Marine Science*, 6, 186. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00186>
- Cornwall, C. E., Comeau, S., Kornder, N. A., Perry, C. T., van Hooideonk, R., DeCarlo, T. M., Pratchett, M. S., Anderson, K. D., Browning, T. N., Buddemeier, R. W., & others. (2021). Global declines in coral reef growth capacity and resilience under future ocean acidification and warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(21), e2015265118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2015265118>
- Cornwall, C. E., Comeau, S., Putnam, H., & Schoepf, V. (2022). Impacts of ocean warming and acidification on calcifying coral reef taxa: mechanisms responsible and adaptive capacity. *Emerging Topics in Life Sciences*, 6(1), 1–9. <https://doi.org/10.1042/etls20210226>
- Cryer, S., Schlosser, C., & Allison, N. (2022). The combined effects of ocean acidification and copper on the physiological responses of the tropical coral *Stylophora pistillata*.

Marine Environmental Research, 176, 105610.
<https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2022.105610>

DeCarlo, T. M., Cohen, A. L., Barkley, H. C., Cobban, Q., Young, C., Shamberger, K. E. F., Brainard, R. E., & Golbuu, Y. (2015). *Coral macrobioerosion is accelerated by ocean acidification and nutrients*. *Geology*, 43(1), 7–10. <https://doi.org/10.1130/G36147.1>

D’Olivo, J. P., Ellwood, G., DeCarlo, T. M., & McCulloch, M. T. (2019). *Deconvolving the long-term impacts of ocean acidification and warming on coral biomineralisation*. *Earth and Planetary Science Letters*, 526, 115785.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.115785>

Done, T. J. (1983). Coral zonation: Its nature and significance. En D. J. Barnes (Ed.), *Perspectives on coral reefs* (pp. 107–147). Australian Institute of Marine Science.

Eagle, R. A., Guillermic, M., De Corte, I., Alvarez Caraveo, B., Bove, C. B., Misra, S., Cameron, L. P., Castillo, K. D., & Ries, J. B. (2022). *Physicochemical control of Caribbean coral calcification linked to host and symbiont responses to varying pCO₂ and temperature*. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(8), 1075. <https://doi.org/10.3390/jmse10081075>

EcoExploratorio: Museo de Ciencias de Puerto Rico. (2022, August 25). *Arrecifes de corales*. <https://ecoexploratorio.org/vida-en-el-mar/ecosistemas-marinos/arrecifes-de-corrales/>

Enzor, L. A., Hankins, C., Vivian, D. N., Fisher, W. S., & Barron, M. G. (2017). *Calcification in Caribbean reef-building corals at high pCO₂ levels in a recirculating ocean acidification exposure system*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 499, 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2017.12.008>

Figuerola, B., Hancock, A. M., Bax, N., Cummings, V. J., Downey, R., Griffiths, H. J., Smith, J., & Stark, J. S. (2021). *A review and meta-analysis of potential impacts of ocean acidification on marine calcifiers from the Southern Ocean*. *Frontiers in Marine Science*, 8, 584445. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.584445>

- Galvis Galindo, I. V. (2024). *Incidencia de los filtros UV sobre los corales y otras especies marinas: una revisión*.
<https://agris.fao.org/search/en/providers/124652/records/691db1c749e41686f792b720>
- García-Troche, E. M., Morell, J. M., Meléndez, M., & Salisbury, J. E. (2021). *Carbonate chemistry seasonality in a tropical mangrove lagoon in La Parguera, Puerto Rico*. *PLOS ONE*, 16(5), e0250069. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0250069>
- Giménez-Casaldueiro, F. (2026). *Metodología de evaluación de blanqueamiento de corales*.
<https://agris.fao.org/search/en/providers/125030/records/699597efe6c33ba92ad5f8df>
- Glass, G. V. (1976). *Primary, secondary, and meta-analysis of research*. Educational Researcher, 5(10), 3–8. <https://doi.org/10.3102/0013189X005010003>
- Godefroid, M., Dupont, S., Metian, M., & Hédouin, L. (2022). Two decades of seawater acidification experiments on tropical scleractinian corals: Overview, meta-analysis and perspectives. *Marine Pollution Bulletin*, 178, 113552.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113552>
- Gómez-Cubillos, C., Zea, S., Guerra, C. A. D., & León, L. C. F. (2023). *Interacciones coral-césped, estructura de tallas de corales masivos y diversidad funcional de herbívoros como indicadores de estado de los arrecifes del complejo Islas Cayos de Bolívar, Reserva de Biosfera Seaflower [Conjunto de datos]*. En SiB Colombia - GBIF Colombia. <https://doi.org/10.15472/0skaoj>
- Grillo, A. C., Simancas-Giraldo, S. M., Steinel, N., Longhini, C. M., Soares, M. O., Bejarano, S., & Longo, G. O. (2025). *Ocean acidification and nitrate enrichment can mitigate negative effects of soft coral (Xenia) competition on hard coral (Stylophora pistillata) endosymbionts*. *Scientific Reports*, 15, 29937. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-15683-5>
- Guo, W., Bokade, R., Cohen, A. L., Mollica, N. R., Leung, M., & Brainard, R. E. (2020). *Ocean acidification has impacted coral growth on the Great Barrier Reef*. *Geophysical Research Letters*, 47(19), e2019GL086761.
<https://doi.org/10.1029/2019GL086761>

- Hall-Spencer, J. M., & Harvey, B. P. (2019). Ocean acidification impacts on coastal ecosystem services due to habitat loss. *Emerging Topics in Life Sciences*, 3(2), 197–206. <https://doi.org/10.1042/ETLS20180117>
- Harvey, B. P., Agostini, S., Wada, S., Inaba, K., & Hall-Spencer, J. M. (2018). *Dissolution: The Achilles' Heel of the Triton Shell in an Acidifying Ocean*. *Frontiers in Marine Science*, 5, 371. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00371>
- Hsiao, S., Wu, H., Fu, H., & Chen, W. (2025). Accelerated ocean acidification (1985–2022) threatens tropical coral reefs and highlights biogeochemical refugia for marine conservation. *Journal of Sea Research*, 207, 102612. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2025.102612>
- Hue, T., Chateau, O., Lecellier, G., Kayal, M., Lanos, N., Gossuin, H., Adjerdoud, M., & Dumas, P. (2020). Temperature affects the reproductive outputs of coral-eating starfish *Acanthaster* spp. after adult exposure to near-future ocean warming and acidification. *Marine Environmental Research*, 162, 105164. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.105164>
- Institut Océanographique de Monaco. (2021, August 23). *¿Qué es el coral?* <https://www.oceano.org/es/oceano-en-cuestion/que-es-el-coral/>
- Isaak, A. L., Ho, M., Dhillon, M. S., Johnson, M. D., Westphal, H., & Doo, S. S. (2024). *Macroalgal presence decreases coral calcification rates more than ocean acidification*. *Coral Reefs*, 43(4), 1133–1137. <https://doi.org/10.1007/s00338-024-02515-7>
- Jiang, L., Sun, Y., Zhou, G., Tong, H., Huang, L., Yu, X., Liu, C., Zhang, Y., Yuan, X., Qian, P., & Huang, H. (2022). Ocean acidification elicits differential bleaching and gene expression patterns in larval reef coral *Pocillopora damicornis* under heat stress. *Science of the Total Environment*, 842, 156851. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156851>
- Jokiel, P. L., Rodgers, K. S., Kuffner, I. B., Andersson, A. J., Cox, E. F., & Mackenzie, F. T. (2008). *Ocean acidification and calcifying reef organisms: A mesocosm investigation*. *Coral Reefs*, 27(3), 473–483. <https://doi.org/10.1007/s00338-008-0380-9>

- Jury, C. P., Bahr, K. D., Cros, A., Dobson, K. L., Freel, E. B., Graham, A. T., McLachlan, R. H., Nelson, C. E., Price, J. T., Rocha de Souza, M., Shizuru, L., Smith, C. M., Sparagon, W. J., Squair, C. A., Timmers, M. A., Vicente, J., Webb, M. K., Yamase, N. H., Grottoli, A. G., & Toonen, R. J. (2024). *Experimental coral reef communities transform yet persist under mitigated future ocean warming and acidification. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 121(45), e2407112121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2407112121>
- Jury, C. P., Delano, M. N., & Toonen, R. J. (2019). *High heritability of coral calcification rates and evolutionary potential under ocean acidification. Scientific Reports*, 9, 20419. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56313-1>
- Kang, H., Chen, X., Deng, G., Zhao, J., & Wei, G. (2024). From Holocene to anthropogenic impact: Surpassing corals' pH up-regulation capacity under ocean acidification. *Global and Planetary Change*, 245, 104683. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2024.104683>
- Kavousi, J., Tanaka, Y., Nishida, K., Suzuki, A., Nojiri, Y., & Nakamura, T. (2016). Colony-specific calcification and mortality under ocean acidification in the branching coral *Montipora digitata*. *Marine Environmental Research*, 119, 161–165. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.05.025>
- Kennedy, E., Roelfsema, C., Lyons, M., Kovacs, E., Borrego-Acevedo, R., Roe, M., Phinn, S., Larsen, K., Murray, N., Yuwono, D., Wolff, J., & Tudman, P. (2020). Reef cover: A coral reef classification to guide global habitat mapping from remote sensing. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2020.09.10.292243>
- Kroeker, K. J., Kordas, R. L., Crim, R. N., Hendriks, I. E., Ramajo, L., Singh, G. S., Duarte, C. M., & Gattuso, J.-P. (2013). *Impacts of ocean acidification on marine organisms: Quantifying sensitivities and interaction with warming. Global Change Biology*, 19(6), 1884–1896. <https://doi.org/10.1111/gcb.12179>
- Kwiatkowski, L., Planchat, A., Pyolle, M., Torres, O., Bouttes, N., Comte, A., & Bopp, L. (2025). *Declining coral calcification to enhance twenty-first-century ocean carbon uptake by gigatonnes. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 122(23), e2501562122. <https://doi.org/10.1073/pnas.2501562122>

- Laboratorio Oceanográfico y Meteorológico del Atlántico de NOAA. (2025, May 6). *Morfología digital del coral*. <https://www.aoml.noaa.gov/es/digital-coral-morphology/>
- Lang, J. C., Marks, K. W., Kramer, P. A., Kramer, P. R., & Ginsburg, R. N. (2010). AGRRA protocol version 5.4. Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment Program. <https://www.agrra.org>
- Liu, P., Ang, S., Mayfield, A. B., & Lin, H. (2019). Influence of the seagrass *Thalassia hemprichii* on coral reef mesocosms exposed to ocean acidification and experimentally elevated temperatures. *The Science of the Total Environment*, 700, 134464. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134464>
- López Alcívar, G. F., & Vásquez Sánchez, L. R. (2023). *Influencia de la contaminación de los asentamientos humanos sobre los arrecifes de coral en la costa continental de Ecuador* [Tesis de licenciatura, Universidad Estatal del Sur de Manabí]. <https://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/4865>
- Manullang, C., Singh, T., Sakai, K., Miyagi, A., Iwasaki, A., Nojiri, Y., & Iguchi, A. (2023). Separate and combined effects of elevated pCO₂ and temperature on the branching reef corals *Acropora digitifera* and *Montipora digitata*. *Marine Environmental Research*, 188, 106030. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.106030>
- Martínez, A., Crook, E. D., Barshis, D. J., Potts, D. C., Rebolledo-Vieyra, M., Hernández, L. & Paytan, A. (2019). *Species-specific calcification response of Caribbean corals after 2-year transplantation to a low aragonite saturation submarine spring*. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 286(1905), 20190572. <https://doi.org/10.1098/rspb.2019.0572>
- Mejías-Rivera, C. L., Armstrong, R. A., Balint, S., García-Troche, E., McKinney, R. A., Morell, J. M., Oczkowski, A., & Courtney, T. A. (2023). *Localized inshore warming, acidification, and elevated particulate organic matter across a coupled mangrove, seagrass, and coral reef ecosystem in La Parguera, Puerto Rico*. *Coral Reefs*, 42(6), 1313–1327. <https://doi.org/10.1007/s00338-023-02435-y>
- Mena, S., Quesada-Pérez, F., Sánchez-Noguera, C., Salas-Moya, C., Alvarado, J. J., López-Garro, A., ... & Fonseca-López, L. (2025). Estructura comunitaria de ecosistemas coralinos en sitios de importancia para la conservación de la biodiversidad marina del Pacífico Norte de Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 73.

https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442025000200014

Mollica, N. R., Cohen, A. L., Mutchler, S. M., & Parker, M. (2018). *Ocean acidification affects coral growth by reducing skeletal extension and density. Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(8), 1754–1759.
<https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1712806115>

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2021). *Monitoring ocean acidification in Caribbean coral reefs: La Parguera buoy program (NOAA Technical Brief)*. <https://www.pmel.noaa.gov/>

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2021). *Monitoring ocean acidification in Caribbean coral reefs: The La Parguera buoy program. NOAA Fisheries*. <https://www.fisheries.noaa.gov/national/climate/monitoring-ocean-acidification-caribbean-coral-reefs>

Ortiz Sotomayor, Á. (2005). *Los arrecifes de coral*. Universidad de Puerto Rico, Programa Sea Grant. <https://www.seagrantpr.org/arrecifes/assets/docs/PRSG-Libro-Arrecifes-de-Coral.pdf>

Palacio-Castro, A. M., Enochs, I. C., Besemer, N., Boyd, A., Jankulak, M., Kolodziej, G., Hirsh, H. K., Webb, A. E., Towle, E. K., Kelble, C., Smith, I., & Manzello, D. P. (2023). *Coral reef carbonate chemistry reveals interannual, seasonal, and spatial impacts on ocean acidification off Florida. Global Biogeochemical Cycles*, 37, e2023GB007789. <https://doi.org/10.1029/2023GB007789>

Palmer, C. V. (2018). *Immunity and the coral crisis. Communications Biology*, 1, 91.
<https://doi.org/10.1038/s42003-018-0097-4>

Patel, F. D., Pinto, W., Dey, M., Alcoverro, T., & Arthur, R. (2023). *Carbonate budgets in Lakshadweep Archipelago bear the signature of local impacts and global climate disturbances. Coral Reefs*, 42(3), 729–742. <https://doi.org/10.1007/s00338-023-02374-8>

- Perry, C. T., & Alvarez-Filip, L. (2018). Changing geo-ecological functions of coral reefs in the Anthropocene. *Functional Ecology*, 33(6), 976–988. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13247>
- Price, N. N., Martz, T. R., Brainard, R. E., & Smith, J. E. (2012). *Diel variability in seawater pH relates to calcification and benthic community structure on coral reefs*. *PLoS ONE*, 7(8), e43843. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0043843>
- Raybaud, V., Tambutté, S., Ferrier-Pagès, C., Reynaud, S., Venn, A. A., Tambutté, É., Nival, P., & Allemand, D. (2017). Computing the carbonate chemistry of the coral calcifying medium and its response to ocean acidification. *Journal of Theoretical Biology*, 424, 26–36. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2017.04.028>
- Razak, T. B., Roff, G., Lough, J. M., & Mumby, P. J. (2019). Growth responses of branching versus massive corals to ocean warming on the Great Barrier Reef, Australia. *Science of the Total Environment*, 705, 135908. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135908>
- Rodríguez, R., Abud, A. V., De Lillo, Y. P. B., Pérez, D. Y. E., Taveras, D. B. B., & Mercedes, J. M. (2022). Importancia de los viveros de coral y su impacto socioeconómico. *AULA Revista de Humanidades y Ciencias Sociales*, 68(1), 78–91. <https://revistas.unphu.edu.do/index.php/aula/article/view/199>
- Rölfer, L., Reuter, H., Ferse, S. C., Kubicek, A., Dove, S., Hoegh-Guldberg, O., & Bender-Champ, D. (2020). Coral-macroalgal competition under ocean warming and acidification. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 534, 151477. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2020.151477>
- Ross, C. L., Warnes, A., Comeau, S., Cornwall, C. E., & McCulloch, M. (2022). *Coral calcification mechanisms in a warming ocean and the interactive effects of temperature and light*. *Communications Earth & Environment*, 3, 72. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00396-8>
- Schoepf, V., Grottoli, A. G., McLachlan, R. H., Price, J. T., Jury, C. P., Toonen, R. J., De Carlo, E. H., & McCulloch, M. T. (2025). *Coral calcification mechanisms across a natural environmental mosaic in Hawai'i*. *Limnology and Oceanography*, 70(8), 2223–2238. <https://doi.org/10.1002/lno.70118>

- Sekizawa, A., Uechi, H., Iguchi, A., Nakamura, T., Kumagai, N. H., Suzuki, A., Sakai, K., & Nojiri, Y. (2017). Intraspecific variations in responses to ocean acidification in two branching coral species. *Marine Pollution Bulletin*, 122(1–2), 282–287. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.061>
- Takeshita, Y., Cyronak, T., Martz, T. R., Kindeberg, T., & Andersson, A. J. (2018). *Coral reef carbonate chemistry variability at different functional scales*. *Frontiers in Marine Science*, 5, Article 175. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00175>
- Tambutté, E., Venn, A. A., Holcomb, M., Segonds, N., Techer, N., Zoccola, D., Allemand, D., & Tambutté, S. (2015). *Morphological plasticity of the coral skeleton under CO₂-driven seawater acidification*. *Nature Communications*, 6, 7368. <https://doi.org/10.1038/ncomms8368>
- Tang, J., Cai, W., Yan, Z., Zhang, K., Zhou, Z., Zhao, J., & Lin, S. (2022). Interactive effects of acidification and copper exposure on the reproduction and metabolism of coral endosymbiont *Cladocopium goreau*. *Marine Pollution Bulletin*, 177, 113508. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113508>
- Tanvet, C., Camp, E. F., Sutton, J., Houlbrèque, F., Thouzeau, G., & Rodolfo-Metalpa, R. (2023). *Corals adapted to extreme and fluctuating seawater pH increase calcification rates and have unique symbiont communities*. *Ecology and Evolution*, 13(5), e10099. <https://doi.org/10.1002/ece3.10099>
- Vásquez, N. P., & Silva, E. F. (2023). Futuro marino sostenible: importancia del tejido coralino en la conservación de ecosistemas costeros. *La Casa del Maestro*, 1(5), 334–346. <https://revistascientificas.cuc.edu.co/RVCDM/article/view/5536>
- Venn, A. A., Tambutté, E., Crovetto, M., & Tambutté, S. (2025). *pH regulation in coral photosymbiosis and the link to calcification under ocean acidification*. *New Phytologist*, 225(3), 1176–1188. <https://doi.org/10.1111/nph.70200>
- Widdicombe, S., & Spicer, J. I. (2008). *Predicting the impact of ocean acidification on benthic biodiversity: What can animal physiology tell us?* *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 366(1), 187–197. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2008.07.024>

Yang, H., Yuan, D., Zhou, Z., & Zhao, H. (2025). Nitrate enrichment exacerbates microbiome and metabolism disturbances of the coral holobiont under heat stress. *Marine Environmental Research*, 208, 107098. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2025.107098>

Yuan, X., Guo, Y., Cai, W., Huang, H., Zhou, W., & Liu, S. (2018). Coral responses to ocean warming and acidification: Implications for future distribution of coral reefs in the South China Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 138, 241–248. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.053>

Zheng, X., Kuo, F., Pan, K., Huang, H., & Lin, R. (2019). *Different calcification responses of two hermatypic corals (Pocillopora damicornis and Seriatopora caliendrum) to CO₂-driven ocean acidification. Environmental Science and Pollution Research*, 26(30), 30596–30602. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29397512/>