

Monografía de investigación

**“IMPACTO DEL AUMENTO DE LA TEMPERATURA OCEÁNICA EN LOS ARRECIFES
CORALINOS DE SAN ANDRÉS Y PROVIDENCIA DURANTE LAS ÚLTIMAS DOS
DÉCADAS”**



Oscar Iván Arias Gutiérrez

Ingeniería Ambiental - Facultad de Ciencias Agropecuarias

Universidad de Cundinamarca - **UdeC**

Trabajo de grado para optar al título de profesional en Ingeniería Ambiental.

Octubre 28 del 2024

DEDICATORIA

“Dedico por completo el desarrollo de este trabajo a Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada paso de este camino; a mis hermanos, por su apoyo incondicional, por inspirarme cada día y, cuyo amor y sacrificio han sido la base de mi éxito; a mi tutora, por su dedicación y confianza en mí, que han sido fundamentales en este proceso; y a todos y cada uno de mis docentes, que con su conocimiento han dejado una huella imborrable en mi formación. Esta investigación es un reflejo de la pasión y respeto que tengo por la ingeniería, todo lo que he aprendido y de quienes me han acompañado en este viaje”.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	6
DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	8
JUSTIFICACIÓN	9
OBJETIVOS	11
General	
Específicos	
ESTADO DEL ARTE	12
METODOLOGÍA	30
RESULTADOS	34
CONCLUSIONES	64
BIBLIOGRAFÍA	68

LISTA DE GRÁFICOS

TABLAS

Tabla 1	
<i>Datos del IDEAM e INVEMAR que fundamentan la Figura 4</i>	38
Tabla 2	
<i>Datos del INVEMAR que fundamentan la Figura 6</i>	42
Tabla 3	
<i>Pérdida de especies clave de coral en San Andrés y Providencia</i>	44
Tabla 4	
<i>Incremento en la incidencia de enfermedades como SCTLD</i>	46
Tabla 5	
<i>Datos que fundamentan la Figura 8</i>	48
Tabla 6	
<i>Pérdida de cobertura coralina debido a eventos climáticos extremos</i>	53
Tabla 7	
<i>Estrategias de conservación categorizadas por eficiencia</i>	58

FIGURAS

Figura 1	
<i>Áreas coralinas de Colombia en el Caribe, con el grado y tipo de desarrollo de las formaciones arrecifales</i>	22

Figura 2	
<i>Evolución de la Temperatura oceánica en San Andrés y Providencia (2000 – 2024).</i>	37
Figura 3	
<i>Correlación de Datos Tabla 4.</i>	39
Figura 4	
<i>Pérdida de cobertura coralina en San Andrés y Providencia (2000 – 2021).</i>	42
Figura 5	
<i>Correlación de Datos Tabla 5.</i>	43
Figura 6	
<i>Aumento de casos registrados de SCTL D en el caribe colombiano</i>	45
Figura 7	
<i>Relación entre picos de Temperatura y Eventos de blanqueamiento (1995 – 2024)</i>	47
Figura 8	
<i>Correlación de Datos Tabla 6.</i>	49
Figura 9	
<i>Pérdida de cobertura coralina por eventos climáticos extremos</i>	53
Figura 10	
<i>Eficiencia de estrategias de conservación en San Andrés y providencia</i>	61
Figura 11	
<i>Priorización de estrategias según criterios de relevancia local</i>	63

INTRODUCCIÓN

El cambio climático es uno de los desafíos ambientales más significativos de nuestra era, con efectos devastadores en los ecosistemas marinos. Los arrecifes coralinos, en particular, son especialmente vulnerables al aumento de la temperatura oceánica. Estas estructuras, que representan menos del 1% de la superficie oceánica mundial, sustentan aproximadamente el 25% de las especies marinas conocidas, proporcionando servicios ecológicos y económicos invaluable (IUCN, 2017; Hoegh-Guldberg et al., 2007).

En Colombia, el archipiélago de San Andrés y Providencia destaca como una joya biológica y cultural en el Caribe. Sin embargo, durante las últimas dos décadas, los incrementos sostenidos en las temperaturas oceánicas han provocado eventos recurrentes de blanqueamiento coralino, una amenaza crítica para la biodiversidad marina y las comunidades locales que dependen de estos ecosistemas (INVEMAR, 2021). En enero de 2024, las temperaturas alcanzaron un récord histórico de 32°C en San Andrés, sobrepasando umbrales críticos para la supervivencia de los corales (IDEAM, 2024).

Esta investigación integra un análisis histórico de datos climáticos y biológicos con una evaluación de estrategias de mitigación para la conservación de los arrecifes en el contexto del cambio climático. Utilizando herramientas analíticas como Python, se identificaron tendencias significativas en los registros de temperatura y su impacto en los ecosistemas coralinos, al igual que la correlación entre variables importantes como el pasar de los años, picos de temperatura y eventos de blanqueamiento coralino. Los resultados revelan patrones alarmantes, pero también oportunidades para implementar acciones efectivas de conservación. Este estudio no solo busca generar conciencia sobre la magnitud de la problemática, sino también proporcionar una base científica para la toma de decisiones en políticas de conservación marina.

Además, este análisis pone de relieve la interconexión entre los fenómenos climáticos globales y las dinámicas locales en San Andrés y Providencia. Factores como la acidificación del océano, las corrientes marinas alteradas y las prácticas insostenibles de pesca y turismo han contribuido a acelerar el deterioro de los arrecifes coralinos (UNEP, 2023). Al mismo tiempo, la región ofrece una oportunidad única para estudiar estrategias de conservación en un entorno marino rico en biodiversidad, pero altamente amenazado. Esta investigación busca sentar precedentes sobre cómo la ciencia y la gestión ambiental pueden trabajar de la mano para abordar problemas complejos, diseñando soluciones que sean adaptables y escalables a otras áreas del Caribe y más allá.

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los arrecifes coralinos del archipiélago de San Andrés y Providencia enfrentan una crisis ambiental sin precedentes. Durante las últimas dos décadas, la temperatura promedio del océano en la región ha superado consistentemente los 30°C, agravada por fenómenos globales como El Niño y actividades humanas locales como la urbanización costera y el turismo masivo (INVEMAR, 2021). Este aumento térmico ha intensificado el fenómeno de blanqueamiento coralino, reduciendo drásticamente la cobertura viva de los arrecifes de un 80% en el año 2000 a apenas un 40% en 2021 (*Tabla 2; Figura 4*). El deterioro de estos ecosistemas impacta directamente la pesca artesanal, el turismo y la protección costera, pilares económicos y sociales de las comunidades locales. Además, se ha registrado la pérdida de especies clave como *Acropora palmata* y *Montastraea annularis*, fundamentales para la estructura del arrecife (CORALINA, 2023). Sin estrategias de conservación adaptadas al contexto local, la viabilidad de estos ecosistemas está en peligro, lo que podría desencadenar consecuencias irreversibles tanto para la biodiversidad como para las comunidades humanas.

Por otro lado, la disminución de los arrecifes tiene implicaciones más amplias para el equilibrio del ecosistema marino. La pérdida de biodiversidad afecta directamente las redes tróficas, disminuyendo la resiliencia de los ecosistemas frente a perturbaciones externas como huracanes o tormentas severas (NOAA, 2022). Además, los corales, al ser especies formadoras de hábitats, son esenciales para sostener a numerosas especies marinas que dependen de ellos para refugio y alimentación. Este deterioro ecológico plantea un desafío global, ya que los arrecifes son indicadores clave de la salud de los océanos y desempeñan un papel crítico en la regulación climática al fijar dióxido de carbono en sus estructuras calcáreas (Gattuso et al., 2015). Sin un enfoque integral, el impacto del cambio climático sobre los arrecifes podría desencadenar efectos en cascada que trascienden los límites regionales.

JUSTIFICACIÓN

La investigación sobre los impactos del aumento de la temperatura oceánica en los arrecifes de coral del archipiélago de San Andrés y Providencia es urgente y necesaria. Estos ecosistemas, reconocidos por su alta biodiversidad, desempeñan un papel crucial en la estabilidad ambiental, económica y social de la región. Actúan como barreras naturales contra tormentas, sostienen cadenas tróficas marinas y generan ingresos significativos a través del turismo y la pesca (Hoegh-Guldberg et al., 2007; Coralina, 2023).

En el contexto del cambio climático, la temperatura oceánica ha emergido como un indicador clave del deterioro ambiental. Estudios previos destacan su relación directa con fenómenos adversos como el blanqueamiento coralino y la proliferación de enfermedades como la Stony Coral Tissue Loss Disease (SCTLD) (INVEMAR, 2021). Este estudio aborda una necesidad crítica: generar conocimiento que permita identificar estrategias de mitigación y adaptación viables para preservar estos ecosistemas. Al enfocar el análisis en los arrecifes del Caribe colombiano, esta investigación contribuye a fortalecer la resiliencia de una región altamente vulnerable a los efectos del cambio climático.

En un contexto global donde los arrecifes coralinos enfrentan amenazas crecientes, centrarse en el archipiélago de San Andrés y Providencia resulta estratégico para abordar problemáticas locales con implicaciones internacionales. La Reserva de Biosfera Seaflower, reconocida por la UNESCO, es un ejemplo de la riqueza biológica y cultural de la región, pero también de su fragilidad ante el cambio climático (Coralina, 2023). Por ello, esta investigación no solo responde a la necesidad de conservar los arrecifes de coral como patrimonio natural, sino también como base para la seguridad alimentaria, la estabilidad económica y la identidad cultural de las comunidades locales. Proponer soluciones prácticas y basadas en evidencia es

crucial para garantizar que estos ecosistemas puedan seguir desempeñando su papel como bastiones de biodiversidad y sostenibilidad en un mundo cambiante.

OBJETIVOS

General

Evaluar el impacto que el incremento de la temperatura oceánica ha tenido en los arrecifes coralinos del archipiélago de San Andrés y Providencia durante las últimas dos décadas, considerando su estructura, biodiversidad y funcionalidad ecológica.

Específicos

- Analizar los patrones históricos de variación de temperatura en el archipiélago durante las últimas dos décadas, utilizando registros climáticos proporcionados por instituciones como el IDEAM e INVEMAR, para identificar tendencias y anomalías relacionadas con el cambio climático.
- Examinar los cambios en la estructura y biodiversidad de los arrecifes coralinos, con un enfoque en fenómenos como el blanqueamiento coralino, la pérdida de especies clave y las alteraciones en las dinámicas ecológicas asociadas.
- Compilar estrategias de mitigación y adaptación para la conservación de los arrecifes coralinos frente al cambio climático, basadas en estudios previos y experiencias de conservación en otras regiones afectadas por el aumento de temperatura oceánica.

ESTADO DEL ARTE

Los arrecifes de coral constituyen ecosistemas submarinos productivos que se generan fundamentalmente a partir de corales hermatípicos, los cuales secretan un precursor del carbonato cálcico y edifican formaciones robustas que son el hogar de una altísima biodiversidad marina. Pero si bien estos ecosistemas ocupan menos del 1% del área oceánica a nivel global, son el lugar donde se pueden encontrar cerca del 25% de las especies marinas que actualmente se conocen (un porcentaje que los coloca entre los hábitats más biodiversos del mundo) (Spalding et al., 2001; IUCN, 2017).

Un sistema funcional en los arrecifes es el producto de la relación simbiótica existente entre los corales y las algas del tipo zooxantelas, pues éstas, gracias al proceso de la fotosíntesis, elaboran compuestos que son alimento para los corales, mientras que a su vez los corales otorgan un amplio espacio (el exoesqueleto que se va construyendo) y los nutrientes que las algas necesitan (Muscatine & Porter, 1977). Esta interacción es fundamental para la productividad y la estabilidad del sistema, permitiendo el desarrollo de redes tróficas complejas que permiten a miles de especies marinas alimentarse (Hoegh-Guldberg et al., 2007). Los arrecifes de coral además pueden llevar a cabo funciones esenciales para las comunidades humanas, una de las principales son las características que poseen como barreras de protección (Ferrario et al., 2014); los arrecifes pueden amortiguar la energía de las olas y dar un nivel de protección a la costa contra la erosión y las tormentas. Son también una fuente de ingresos muy importante, pues son el sustento de la pesca y el turismo, de hecho, a nivel global, los arrecifes coralinos se estima que generan unos 30 mil millones de dólares al año en ingresos (Costanza et al., 1997). Estos ecosistemas se distribuyen principalmente en regiones tropicales y subtropicales, dentro de los 30 grados de latitud norte y sur, en aguas poco profundas y de alta claridad, donde las temperaturas oscilan entre 23°C y 29°C (Sheppard et

al., 2018). Estas condiciones son esenciales para la fotosíntesis de las zooxantelas y el crecimiento óptimo de los corales. A nivel global, el Sudeste Asiático alberga el Triángulo de Coral, que es considerado el epicentro de la biodiversidad marina, con más de 500 especies de corales. Por su parte, el Caribe, que incluye regiones como el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, representa uno de los principales puntos de biodiversidad en el hemisferio occidental, a pesar de su menor extensión comparada con el Pacífico (Jackson et al., 2014).

En el Caribe colombiano, los arrecifes de coral abarcan aproximadamente 2,860 km², desempeñando un papel esencial en actividades económicas como la pesca y el turismo. No obstante, su estado de conservación ha experimentado un deterioro preocupante durante las últimas tres décadas, atribuible a factores como el cambio climático, la contaminación y las actividades humanas. Este deterioro ha resultado en la pérdida de más del 50% de su cobertura coralina, una situación alarmante que exige atención inmediata (INVEMAR, 2021).

La funcionalidad de los arrecifes depende de una interacción intrincada entre factores biológicos y abióticos. Un elemento central en esta dinámica es la relación simbiótica entre los corales y las algas zooxantelas. Estas algas, a través de la fotosíntesis, generan oxígeno y compuestos orgánicos que nutren al coral, mientras este último proporciona un entorno seguro y el dióxido de carbono necesario para las algas (Hoegh-Guldberg et al., 2007). Además, los arrecifes contribuyen a procesos clave como el reciclaje de nutrientes, la estabilización de sedimentos y el soporte de biodiversidad marina, funcionando como hábitats para múltiples especies a lo largo de sus ciclos de vida. Sin embargo, factores como el estrés térmico, la acidificación del océano y la contaminación pueden alterar este equilibrio, provocando el blanqueamiento coralino y, en casos extremos, el colapso del ecosistema (UNEP, 2023).

Los arrecifes coralinos, reconocidos por su extraordinaria biodiversidad y productividad, están entre los ecosistemas más afectados por el cambio climático. Investigaciones recientes

han documentado cómo el aumento de la temperatura oceánica, derivado del calentamiento global, ha intensificado fenómenos como el blanqueamiento coralino. Este proceso, descrito por Hoegh-Guldberg et al. (2007), se produce cuando los corales, sometidos a un estrés térmico prolongado, expulsan las algas simbióticas que les proporcionan nutrientes y su característico color. Si las condiciones desfavorables persisten, los corales pueden morir, quedando más vulnerables a enfermedades y perdiendo la capacidad de recuperarse tras eventos extremos como huracanes (UNEP, 2020).

La raíz del aumento en la temperatura oceánica se encuentra en el cambio climático, impulsado principalmente por la acumulación de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO₂) y el metano (CH₄), generados por la quema de combustibles fósiles. Según datos de la IUCN (2017), el océano ha absorbido más del 93% del calor excedente generado desde la década de 1970. Aunque esta capacidad amortiguadora ha mitigado el calentamiento atmosférico, ha afectado significativamente la función del océano como sumidero de carbono, agravando aún más los efectos del cambio climático.

En particular, los arrecifes del Caribe colombiano tienen un valor estratégico, especialmente los del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Este conjunto de ecosistemas alberga especies clave como *Acropora palmata* y *Montastraea annularis*, elementos críticos para la biodiversidad y la estructura de los arrecifes (INVEMAR, 2021). Además de sustentar una biodiversidad única, estos arrecifes actúan como barreras naturales que protegen las costas frente a huracanes y tormentas, resguardando tanto a las comunidades humanas como a las infraestructuras costeras.

La Reserva de Biosfera Seaflower, reconocida por la UNESCO, abarca más de 300,000 km² de ecosistemas marinos, de los cuales un 77% corresponde a arrecifes coralinos. Estos ecosistemas no solo son fundamentales para el equilibrio ambiental de la región, sino que también generan ingresos significativos a través de actividades como la pesca y el turismo,

proporcionando un sustento directo a las comunidades locales (Coralina, 2023). Por su importancia ecológica y socioeconómica, su conservación es esencial para garantizar la biodiversidad, fortalecer la resiliencia climática y salvaguardar la seguridad alimentaria de las poblaciones que dependen de estos recursos.

Los arrecifes en esta región desempeñan un papel multifuncional. Desde una perspectiva ecológica, sustentan una rica biodiversidad y mantienen las cadenas tróficas marinas al proporcionar hábitats esenciales para múltiples especies. En términos económicos, son pilares fundamentales de la pesca artesanal y el turismo, actividades que generan millones de dólares cada año y sostienen a miles de familias locales (Coralina, 2023). Además, los arrecifes contribuyen activamente a la mitigación del cambio climático, ya que absorben dióxido de carbono y actúan como barreras naturales que reducen el impacto de fenómenos extremos como huracanes, protegiendo tanto infraestructuras críticas como vidas humanas. Perder estos ecosistemas tendría consecuencias graves, no solo para las comunidades locales, sino también para los esfuerzos globales de conservación y mitigación climática.

Por otra parte, fenómenos climáticos naturales como El Niño representan una amenaza adicional para los arrecifes coralinos. Este fenómeno, al debilitar los vientos alisios, provoca un aumento en las temperaturas superficiales del océano, lo que reduce la capacidad de enfriamiento natural de las aguas. Estas condiciones incrementan el estrés térmico en los corales, exacerbando problemas como el blanqueamiento coralino y la pérdida de biodiversidad, tal como lo advierte el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, 2023).

El fenómeno de El Niño-Oscilación Sur (ENOS) es un patrón climático natural que está definido por cambios en las temperaturas del océano Pacífico ecuatorial y cambios en los vientos alisios que condicionan al mismo tiempo los patrones climáticos globales. El mismo tiene tres fases importantes, El Niño, La Niña y la Oscilación Sur (ENSO, por sus siglas en

inglés) (Philander, 1990). La fase más reconocible y conocida popularmente es El Niño, que implica calentamiento anómalo de las aguas del Pacífico tropical oriental; la fase opuesta es La Niña, que implica un enfriamiento anómalo de las aguas del mismo océano. El ENOS es un fenómeno irregular, que ocurre cada dos a siete años y presenta una duración de entre nueve a doce meses. En el caso de El Niño, los vientos alisios se debilitan o incluso se invierten, en el sentido que se producen corrientes oceánicas que interrumpen cómo se dispone la temperatura en los océanos, afectando al clima global y al mismo tiempo los ecosistemas marinos (McPhaden et al., 2006).

El fenómeno de El Niño ocasiona un cierto incremento de modo considerable de las temperaturas superficiales de mar (TSM) en la zona ecuatorial del Pacífico central y oriental, que modifica la circulación oceánico-atmosférica. Tal incremento de la temperatura oceánica tiene su razón de ser, desde el cambio de dirección de los vientos alisios de superficie que empujan las aguas superficiales cálidas hacia el oeste del Pacífico (Wang et al., 2017), en la acumulación de calor con la consecuente movilización de aguas cálidas hacia las costas de América del Sur y alterando el clima de forma global al afectar los regímenes de precipitaciones y de temperaturas, incluso del Caribe y del océano Atlántico (Goddard et al., 2001).

La anomalía del calentamiento de las aguas durante El Niño puede tener una duración de entre los seis meses y el año y tal incremento de la temperatura oceánica tiene gravísimas consecuencias para los ecosistemas marinos, especialmente para los arrecifes de coral. Los corales son organismos muy sensibles a los cambios en la temperatura y los episodios de El Niño, muchas veces, inducen eventos masivos de blanqueamiento coralino cuando las temperaturas superficiales del mar superan los 30 °C, que constituye el umbral crítico de muchas especies de corales (Hoegh-Guldberg et al., 2007).

El fenómeno de El Niño tiene un efecto directo sobre la salud de los arrecifes de coral. El aumento de la temperatura de la superficie del mar puede llevar a una situación de estrés

térmico sobre los corales, que puede culminar en fenómenos de blanqueamiento coralino, los cuales tienen lugar cuando los corales expulsan las algas simbióticas (zooxantelas) que viven en sus tejidos. Durante el evento de El Niño 1997-1998, uno de los más extremos registrados en la historia, se produjeron episodios de blanqueamiento coralino masivo en el Caribe, en el Indo-Pacífico y en el Pacífico oriental. Este fenómeno, provocó la alteración de entre un 10% y un 20% de los arrecifes coralinos globales, siendo el impacto notable para la biodiversidad y para la supervivencia de colonias de corales (Wilkinson, 2008). Estos episodios han sido cada vez más habituales en los últimos años, ya que las temperaturas de la superficie del océano continúan aumentando por la propia dinámica del cambio climático, que hace que los arrecifes de coral sean más vulnerables a futuros episodios de El Niño (UNEP, 2023).

En los arrecifes de coral del Caribe colombiano, el fenómeno de El Niño ha ocasionado episodios que han llevado a alteraciones notables de la salud de los arrecifes de San Andrés y Providencia. Durante este fenómeno en los años 2015-2016, el calentamiento de aguas del Caribe registró temperaturas récord y episodios de blanqueamiento en varias áreas del archipiélago, siendo el impacto letal para aquellas especies de corales más sensibles y vulnerables (INVEMAR, 2021).

El cambio climático ha intensificado los efectos del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), aumentando tanto su frecuencia como su intensidad. Las proyecciones climáticas sugieren que el aumento global de la temperatura podría llevar a un incremento de hasta 2°C en las temperaturas promedio de los océanos hacia finales del siglo XXI, lo que amplificaría aún más los impactos del ENOS en los arrecifes coralinos (IPCC, 2021). Este calentamiento adicional aumentará la probabilidad de episodios de blanqueamiento coralino incluso en años que no estén directamente asociados con El Niño. Paralelamente, la acidificación del océano, impulsada por la mayor concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, debilita las

estructuras calcáreas de los corales, reduciendo su capacidad para recuperarse tras el estrés térmico y otros factores adversos (Gattuso et al., 2015).

Los arrecifes coralinos prosperan bajo condiciones específicas, con una temperatura óptima que oscila entre los 23°C y 29°C, dependiendo de la especie y el área geográfica. Estas condiciones, combinadas con aguas claras y bajos niveles de nutrientes, permiten a los corales realizar fotosíntesis de manera eficiente a través de su simbiosis con las algas zooxantelas (NOAA, 2021). En el Caribe, particularmente en la región de San Andrés y Providencia, cuando las temperaturas exceden este rango, los corales enfrentan estrés térmico severo, lo que puede desencadenar eventos de blanqueamiento (IUCN, 2017). Según la NOAA, las temperaturas promedio de los océanos han aumentado aproximadamente 0.13°C por década en los últimos 100 años, lo que intensifica el riesgo de estas amenazas.

En el contexto del Caribe colombiano, las temperaturas que superan los 30°C representan un umbral crítico para los arrecifes, provocando episodios de blanqueamiento con mayor frecuencia desde 1995. Estos eventos se han intensificado significativamente desde 2016, reflejando el impacto combinado del calentamiento global y otros factores locales (INVEMAR, 2021). Estudios recientes también señalan que elementos como la contaminación, el incremento de la radiación solar y la acidificación del océano contribuyen al blanqueamiento, exacerbando aún más la vulnerabilidad de estos ecosistemas (UNEP, 2023).

El aumento de la temperatura afecta varios procesos clave:

- **Estratificación:** Cuando se impide la mezcla de nutrientes y se reduce el oxígeno en aguas profundas gracias a que la columna de agua se separa en capas.
- **Cambios en las corrientes:** El aumento de temperatura puede debilitar corrientes oceánicas importantes, como la del Golfo y la del Caribe, afectando la circulación global del calor.

- Acidificación y desoxigenación: El aumento de la temperatura en los océanos no solo afecta la biodiversidad, sino que también altera los niveles de oxígeno en el agua. Las aguas cálidas tienen una capacidad reducida para retener oxígeno, lo que compromete la salud de los hábitats marinos y las especies que dependen de ellos. Según UNEP (2023), la frecuencia de las olas de calor marinas se ha duplicado desde 1982, con impactos severos sobre la biodiversidad en múltiples regiones. A este fenómeno se suma la acidificación del océano, otro efecto crítico del calentamiento global. Este proceso dificulta la calcificación de los corales, limitando su capacidad para crecer y regenerarse, lo que agrava la pérdida de cobertura coralina (ECPA, 2021).

El archipiélago de San Andrés y Providencia enfrenta una combinación de factores naturales y antropogénicos que afectan gravemente sus ecosistemas marinos, especialmente los arrecifes de coral. La interacción de condiciones climáticas adversas, corrientes oceánicas alteradas, actividades humanas insostenibles y una infraestructura de saneamiento inadecuada genera un impacto profundo en la salud ambiental de la región. Estas presiones múltiples han debilitado la resiliencia de los arrecifes frente al cambio climático y otros fenómenos globales.

Aunque San Andrés y Providencia carecen de estaciones climáticas bien definidas, la región experimenta ciclos estacionales marcados por temporadas de lluvia (mayo a noviembre) y sequía (diciembre a abril). Durante las lluvias intensas, la escorrentía terrestre arrastra sedimentos y nutrientes hacia el océano, disminuyendo la claridad del agua y favoreciendo el crecimiento de algas que compiten con los corales por la luz y el espacio (Coralina-Invemar, 2012). Por el contrario, en la estación seca, la menor precipitación concentra los contaminantes en las aguas costeras, intensificando el estrés ambiental sobre los arrecifes.

Los efectos del cambio climático agravan aún más estas dinámicas naturales. El aumento de las temperaturas oceánicas y la mayor frecuencia de fenómenos extremos como

huracanes han causado daños físicos significativos en los arrecifes y alterado las corrientes marinas locales (Smale et al., 2012). Estos eventos no solo afectan la estructura del ecosistema, sino que también interrumpen los procesos biológicos esenciales para su recuperación.

Las corrientes oceánicas, impulsadas por factores como los vientos, la rotación terrestre, la salinidad y las mareas, desempeñan un papel crucial en la salud de los océanos. Estas corrientes se dividen en dos categorías principales: las superficiales, que afectan hasta los primeros 400 metros de profundidad, y las profundas, que forman parte de la circulación termohalina, conocida como la "cinta transportadora oceánica" (Cai et al., 2021). Ambas son esenciales para la distribución de nutrientes, la regulación térmica y la conectividad entre los hábitats, aspectos críticos para el equilibrio de los arrecifes coralinos.

Las corrientes oceánicas desempeñan un papel fundamental en los ecosistemas marinos, ya que influyen directamente en la distribución de nutrientes, el transporte de calor y la conectividad entre hábitats. En el caso de los arrecifes de coral, estas corrientes son esenciales para mantener condiciones óptimas al movilizar nutrientes clave y dispersar larvas de coral, lo que promueve la regeneración y la biodiversidad de estos ecosistemas (Hoegh-Guldberg et al., 2007). Un ejemplo destacado es la Corriente del Caribe, que fluye hacia el norte a lo largo de la costa de América Central. Esta corriente desempeña un papel crucial en la regulación térmica de los arrecifes de San Andrés y Providencia, proporcionando un suministro continuo de agua cálida y oxigenada, indispensable para la salud coralina (INVEMAR, 2021).

No obstante, estas mismas corrientes pueden intensificar los efectos negativos del cambio climático. Durante eventos como El Niño, las corrientes oceánicas transportan masas de agua más cálida hacia áreas vulnerables, aumentando el estrés térmico en los corales y desencadenando eventos de blanqueamiento masivo (McPhaden et al., 2006). Adicionalmente, las corrientes pueden actuar como vehículos para la dispersión de contaminantes, incluyendo

plásticos y residuos químicos, desde fuentes terrestres hacia los arrecifes, lo que agrava su deterioro (UNEP, 2023).

La Corriente del Caribe, integrada en el sistema de la Corriente del Golfo, es fundamental para la regulación climática global y la salud de los arrecifes en la región del archipiélago. Este flujo transporta agua cálida desde el Atlántico ecuatorial y contribuye a la circulación termohalina, un mecanismo clave para el equilibrio térmico del planeta (IUCN, 2017). Además de regular la temperatura del agua, esta corriente influye en la disponibilidad de nutrientes y la dispersión de especies marinas. Sin embargo, cuando se combina con los efectos del cambio climático, puede facilitar la propagación de organismos invasores y aumentar la dispersión de contaminantes provenientes de otras áreas del Caribe (Coralina-Invemar, 2012; UNEP, 2020).

Por otra parte, actividades humanas como la pesca y el turismo también representan amenazas significativas para los ecosistemas marinos del archipiélago. La pesca, tanto artesanal como comercial, es vital para la economía local, pero la sobreexplotación de especies clave ha provocado una disminución en la biodiversidad y alterado el equilibrio ecológico. Especies como la langosta y los peces arrecifales han visto reducidas sus poblaciones debido a prácticas insostenibles, lo que ha permitido la proliferación descontrolada de otras especies (Langlois et al., 2012). Además, el uso de técnicas destructivas y la captura incidental han dañado estructuras coralinas esenciales para la biodiversidad marina (Coralina-Invemar, 2012).

El turismo, aunque es la principal fuente de ingresos para el archipiélago, también ejerce una presión significativa sobre los ecosistemas. El desarrollo costero desordenado, incluidas construcciones como hoteles y muelles, ha degradado importantes áreas de arrecifes y manglares. Las actividades recreativas, como el buceo y el snorkel, pueden causar daños físicos a los corales si no se gestionan adecuadamente. Según Langlois et al. (2012), el turismo

intensivo genera además contaminación por aguas residuales y residuos sólidos, exacerbando los problemas ambientales y poniendo en riesgo la sostenibilidad de estos ecosistemas.

Como se muestra en la *figura 1*, el archipiélago de San Andrés y Providencia posee una de las áreas coralinas más extensas del Caribe colombiano, con más de 380 km² de arrecifes (Díaz et al., 2000).

Figura 1

Áreas coralinas de Colombia en el Caribe, con el grado y tipo de desarrollo de las formaciones arrecifales.

	NOMBRE	TIPO DE FORMACIÓN	E.T.*	E.C.**	
MAR CARIBE	OCÉANICAS	Cayos Albuquerque	Atolón anular con arrecife periférico de rompiente, laguna y arrecifes de parche	63,8	30,2
		Cayos Courtown	Atolón semianular con arrecife periférico de rompiente, laguna y arrecifes de parche	50,3	25,6
		Isla San Andrés	Complejo arrecifal con arrecifes de barrera, franjeantes y de parche	97,5	44,7
		Isla Providencia	Complejo arrecifal con arrecifes de barrera laguna, arrecifes franjeantes y de parche	285,2	124,9
		Banco Roncador	Atolón semianular con arrecife periférico de rompiente, laguna y arrecifes de parche	50,1	29,8
		Banco Serrana	Atolón semianular con arrecife periférico de rompiente, laguna y arrecifes de parche	321,4	74,4
		Banco Quitasueño	Banco coralino con arrecife de rompiente, laguna y arrecifes de parche	1320,2	496
		Subtotal		2188,5	825,6
	CONTINENTALES	Urabá Chocoano	Arrecifes franjeantes y de parche	3,5	1
		Isla Tortuguilla	Arrecife franjeante	1,5	0,7
		Isla Fuerte	Arrecife franjeante, arrecifes de parche, montículos coralinos y bancos coralinos sobre domos diapíricos	32,5	16,6
		Islas San Bernardo	Complejo arrecifal parcialmente emergido, con parches, arrecifes franjeantes y bancos coralinos	213,3	134,5
		Bajo Tortugas	Banco coralino sobre domos diapíricos	21,4	17,4
		Isla del Rosario	Complejo arrecifal parcialmente emergido, con rompiente arrecifes franjeantes y de parche, bancos coralinos	145,3	67,6
		Bajos Salmedina	Bancos coralinos sobre domos diapíricos	7,5	7,5
Isla Arena		Arrecife franjeante con rompiente	0,2	0,1	
Banco de Las Ánimas	Tapete coralino profundo	70,5	7,6		
Parque Tayrona	Arrecifes y tapetes coralinos franjeantes y de parche	9,3	6,7		
Áreas de La Guajira	Tapetes coralinos, arrecifes franjeantes de desarrollo limitado	151,8	5		
Subtotal		656,8	264,7		
TOTAL			2845,3	1090,3	

* Extensión total (E.T., en km²)

** Extensión ocupada por fondos con cobertura coralina viva (E.C., en km²)

Los arrecifes de coral desempeñan un papel crucial al ofrecer una amplia gama de servicios ecosistémicos que benefician tanto a los ecosistemas marinos como a las

comunidades humanas. Estos servicios, que se dividen en provisión, regulación, soporte y culturales, son esenciales para la sostenibilidad ambiental y económica, destacándose por su impacto significativo en las regiones donde están presentes.

Servicios de provisión: Los arrecifes de coral son una fuente indispensable de alimentos y recursos para millones de personas en todo el mundo. En comunidades costeras, especialmente en países en desarrollo, la pesca artesanal y comercial basada en áreas coralinas aporta proteínas esenciales, garantizando la seguridad alimentaria (Moberg & Folke, 1999). Además, estos ecosistemas representan un recurso importante para la biotecnología, ya que muchos compuestos bioactivos utilizados en medicamentos contra el cáncer y enfermedades virales provienen de organismos que habitan en los arrecifes (Hoegh-Guldberg et al., 2007).

En San Andrés y Providencia, actividades como la pesca artesanal, centrada en especies como el pez loro y el pargo amarillo, dependen directamente de la salud de los arrecifes, lo que evidencia su relevancia para el sustento económico y alimentario de las comunidades locales (Coralina, 2023).

Servicios de regulación: Los arrecifes actúan como barreras naturales al absorber la energía de las olas, protegiendo las costas de la erosión y mitigando el impacto de tormentas y huracanes. Este servicio es particularmente vital en el Caribe colombiano, donde eventos extremos como el huracán Iota en 2020 provocaron daños significativos a las costas, aunque estos pudieron haber sido aún más graves sin la protección que ofrecen los arrecifes (INVEMAR, 2021).

Asimismo, los arrecifes desempeñan un papel en la regulación del dióxido de carbono atmosférico, ya que los corales y las algas calcáreas fijan carbono en sus esqueletos mediante el proceso de calcificación. Sin embargo, este beneficio está siendo limitado por la acidificación

oceánica, un efecto directo del cambio climático que afecta la capacidad de los arrecifes para mitigar el calentamiento global (Gattuso et al., 2015).

Servicios de soporte: Como ecosistemas altamente biodiversos, los arrecifes de coral son el núcleo de complejas redes tróficas. Sostienen una diversidad de peces, invertebrados, algas y microorganismos, actuando como viveros esenciales para muchas especies marinas. Los peces juveniles, en particular, dependen de los refugios que ofrecen los corales para evitar depredadores y alcanzar la madurez (UNEP, 2023).

La pérdida de estos servicios tendría repercusiones profundas, no solo sobre la biodiversidad marina, sino también sobre la pesca comercial y la seguridad alimentaria a nivel global, generando impactos negativos en cadenas tróficas y economías locales (Spalding et al., 2017).

Servicios culturales: Además de su valor ecológico, los arrecifes de coral poseen un inmenso valor cultural y estético. Son destinos turísticos de renombre mundial, generando ingresos significativos mediante actividades como el ecoturismo, el buceo y el snorkel. En el Caribe colombiano, estas actividades relacionadas con los arrecifes representan una fuente clave de empleo y desarrollo económico, aportando millones de dólares anualmente (Jackson et al., 2014). Para muchas comunidades indígenas y locales, los arrecifes tienen un significado espiritual y cultural profundo, considerándolos una parte integral de su patrimonio natural (Moberg & Folke, 1999).

A nivel global, los servicios ecosistémicos que ofrecen los arrecifes tienen un valor estimado de 375 mil millones de dólares anuales, según Moberg y Folke (1999), lo que subraya su importancia no solo para las economías locales, sino también para la sostenibilidad global.

El archipiélago de San Andrés y Providencia alberga una rica diversidad de especies de corales, siendo un ecosistema fundamental del Caribe. Entre los corales más relevantes se

encuentran tanto corales duros (*escleractinios*) como corales blandos (*octocorales*). Especies importantes incluyen *Acropora palmata* (coral cuerno de alce) y *Acropora cervicornis* (coral cuerno de ciervo), ambas enlistadas como vulnerables en la Lista Roja de la UICN debido al deterioro de su población. Otros corales comunes en la región incluyen *Montastraea annularis*, que forma grandes colonias masivas, y el coral cerebro (*Diploria labyrinthiformis*) conocido por sus patrones geométricos distintivos.

Los corales presentan ritmos de crecimiento diversos según su morfología y especie. Los corales ramificados, como los del género *Acropora*, pueden crecer varios centímetros por año, alcanzando hasta 10 cm en condiciones favorables. Por otro lado, los corales masivos, como *Montastraea annularis*, muestran un crecimiento más lento, de aproximadamente 0.5 cm por año (IUCN, 2017). Estas diferencias en las tasas de crecimiento afectan directamente la estructura del arrecife. Mientras que los corales ramificados ofrecen refugio a pequeños peces, facilitando su protección y alimentación, los corales masivos actúan como la base estructural del ecosistema, proporcionando estabilidad y resistencia frente a perturbaciones. La longevidad de los corales también depende de su especie y del entorno. Bajo condiciones ambientales estables, los corales pueden vivir varias décadas o incluso siglos, aunque factores externos como el aumento de temperatura, la calidad del agua y eventos naturales como tormentas pueden reducir significativamente su esperanza de vida (Díaz et al., 2000). Los corales masivos, gracias a su esqueleto calcáreo denso, tienden a ser más resistentes a perturbaciones severas, mientras que los corales ramificados son más vulnerables a daños físicos causados por huracanes y otras alteraciones climáticas (Coralina, 2023).

La Enfermedad de Pérdida de Tejido en Corales Duros (SCTLD)

La Enfermedad de Pérdida de Tejido en Corales Duros (Stony Coral Tissue Loss Disease, SCTLD) es una de las mayores amenazas actuales para los arrecifes coralinos. Identificada por primera vez en los arrecifes de Florida en 2014, esta enfermedad altamente

contagiosa se ha propagado rápidamente por el Caribe, afectando regiones como México, Jamaica y el archipiélago de San Andrés y Providencia (Precht et al., 2016; INVEMAR, 2021).

La SCTLTD se distingue por la aparición de lesiones blanquecinas en los tejidos coralinos, un indicador de necrosis progresiva. Lo que hace especialmente devastadora a esta enfermedad es su tasa de mortalidad extremadamente alta, capaz de destruir colonias enteras en cuestión de semanas (Aeby et al., 2019). Corales constructores de arrecifes, como *Montastraea cavernosa*, *Diploria labyrinthiformis* y *Orbicella annularis*, son particularmente vulnerables. Dado que estas especies desempeñan un rol crucial en la formación y estabilidad estructural de los arrecifes, su pérdida genera consecuencias graves para la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas marinos (Meiling et al., 2021). La rápida propagación y letalidad de la SCTLTD representan una amenaza crítica, especialmente en regiones donde los arrecifes ya enfrentan desafíos derivados del cambio climático y la actividad humana.

Los síntomas incluyen:

- Lesiones blanquecinas en el tejido vivo del coral.
- Rápida progresión de la necrosis, que puede afectar hasta 2 cm² por día.
- Exposición del esqueleto calcáreo subyacente en las áreas afectadas.

Una de las características más alarmantes de la Enfermedad de Pérdida de Tejido en Corales Duros (SCTLTD) es su incapacidad para mostrar recuperación espontánea en las colonias afectadas, a diferencia de otros eventos de estrés coralino, como el blanqueamiento, que en ocasiones permite la regeneración del coral bajo condiciones favorables (Aeby et al., 2019). Este hecho convierte a la SCTLTD en una amenaza particularmente devastadora para los arrecifes coralinos.

Aunque la causa exacta de la SCTLTD aún no está completamente definida, estudios recientes sugieren una posible asociación con patógenos bacterianos transmitidos por el agua

(Meyer et al., 2019). Las corrientes oceánicas y ciertas actividades humanas, como el transporte marítimo y el buceo no regulado, han sido identificadas como vectores clave en la propagación de esta enfermedad (D'Angelo & Wiedenmann, 2014). Además, el aumento de la temperatura oceánica y los niveles crecientes de contaminación parecen debilitar las defensas naturales de los corales, haciéndolos más susceptibles a infecciones bacterianas. En este sentido, la SCTLD se convierte en una amenaza agravada por los efectos del cambio climático (Precht et al., 2016).

El impacto de esta enfermedad sobre los arrecifes es devastador. En regiones como Cozumel, México, se ha registrado una pérdida de hasta el 50% de la cobertura de corales pétreos en menos de un año, ilustrando la gravedad de la situación (Alvarez-Filip et al., 2019). En el archipiélago de San Andrés y Providencia, la SCTLD ha afectado gravemente a especies clave como *Orbicella annularis* y *Diploria labyrinthiformis*, reduciendo significativamente su cobertura. Esto ha alterado las dinámicas ecológicas del ecosistema y comprometido la biodiversidad marina, así como los servicios ecosistémicos esenciales que estos arrecifes proporcionan, tales como la protección costera y el soporte para actividades económicas como la pesca y el turismo (INVEMAR, 2021).

El manejo de la SCTLD representa un desafío monumental debido a su rápida propagación y alta tasa de mortalidad. Sin embargo, se han desarrollado estrategias emergentes para mitigar su impacto, entre las que destacan:

- Aplicación de antibióticos tópicos: En tratamientos experimentales, el uso de antibióticos como la amoxicilina ha mostrado cierta efectividad para detener la progresión de la enfermedad en colonias individuales.
- Monitoreo y vigilancia temprana: Programas de seguimiento continuo permiten identificar brotes en etapas iniciales, priorizando áreas de intervención para mitigar los daños.

- Gestión de actividades humanas: La regulación del transporte marítimo, la reducción de descargas contaminantes y el manejo adecuado del turismo son medidas clave para limitar la propagación de la enfermedad.

A pesar de estos esfuerzos, la SCTLID sigue representando una amenaza significativa, especialmente en ecosistemas donde los recursos para la conservación son limitados. Se requiere una acción global coordinada para desarrollar soluciones más efectivas y garantizar la preservación de estos valiosos ecosistemas.

En el Caribe, los arrecifes coralinos enfrentan un deterioro constante debido al incremento de las temperaturas oceánicas. Según Pinzón et al. (1998), los picos de temperatura, especialmente durante episodios de El Niño, han sido determinantes en los eventos de blanqueamiento masivo de corales. Esta problemática es especialmente grave en los arrecifes de San Andrés y Providencia, donde se han registrado cambios significativos en la estructura y biodiversidad del ecosistema. Instituciones como INVEMAR y CORALINA han liderado esfuerzos de monitoreo y conservación en la región, documentando la progresión del blanqueamiento coralino y los impactos asociados en la salud de los arrecifes (Fajardo & Lonin, 2021). Sin embargo, la capacidad de estos ecosistemas para adaptarse a las rápidas alteraciones climáticas sigue siendo insuficiente frente a la magnitud y velocidad del cambio climático (Gallardo & Barra, 1997).

Eventos meteorológicos recientes como los huracanes Iota (2020), Julia (2022) y Otto (2016) han evidenciado la creciente vulnerabilidad del archipiélago. Iota, de categoría 5, devastó Providencia, destruyendo hasta el 98 % de su infraestructura y causando daños severos a los arrecifes coralinos, que ya estaban debilitados por el aumento de la temperatura oceánica (NOAA, 2020; UNEP, 2020). Aunque de menor intensidad, Julia (categoría 1) amplificó los efectos de Iota, demostrando que incluso tormentas menos fuertes pueden ser devastadoras en ecosistemas deteriorados (ECPA, 2021). Otto, por su parte, un huracán de

categoría 2, afectó una región ya vulnerable, donde los corales sufrían de blanqueamiento. Este evento resaltó la susceptibilidad del Caribe a huracanes en períodos fuera de temporada habitual (NASA, 2016; EPA, 2022). La pérdida de cobertura coralina y el aumento de las temperaturas han reducido la capacidad de los arrecifes para amortiguar los impactos de las tormentas, exacerbando la erosión costera y los daños en cada fenómeno climático sucesivo (UNEP, 2020; NOAA, 2020).

En respuesta a esta crisis, se han puesto en marcha iniciativas globales orientadas a la restauración activa de los arrecifes coralinos. Programas que incluyen el trasplante de corales y la investigación de especies más resistentes al calor han mostrado resultados alentadores (Edwards & Gómez, 2007). En San Andrés, CORALINA ha iniciado proyectos piloto centrados en estas estrategias, aunque aún se encuentran en etapas iniciales. Entre las líneas de investigación destacadas se encuentra el estudio de los denominados "corales súper resistentes", que albergan algas simbióticas más tolerantes a altas temperaturas, lo que representa una esperanza para la adaptación de los ecosistemas coralinos frente al cambio climático (Baker et al., 2004). No obstante, el ritmo acelerado de las alteraciones climáticas continúa superando las capacidades naturales de adaptación de los arrecifes, subrayando la necesidad de incrementar los esfuerzos en conservación y restauración.

METODOLOGÍA

La metodología utilizada en esta investigación integra tanto enfoques cualitativos como cuantitativos, con la finalidad de evaluar cómo el incremento de la temperatura oceánica ha impactado los arrecifes coralinos de San Andrés y Providencia a lo largo de los últimos veinte años. La base de la investigación se apoya en una completa revisión bibliográfica, el análisis de datos históricos y la exploración de casos específicos de blanqueamiento coralino en la zona. A continuación, se detallan las técnicas y métodos empleados para la recopilación y el análisis de la información.

Se llevó a cabo una búsqueda detallada en bases de datos científicas como Google Scholar, Scopus y PubMed, así como en repositorios de investigaciones de instituciones locales, incluyendo el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR). Los términos de búsqueda incluyeron “coral bleaching San Andres”, “coral reef restoration”, “temperature increase Caribbean”, entre otros. Asimismo, se consultaron informes institucionales de Coralina, NOAA y AIDA, debido a su relevancia en el monitoreo y conservación ambiental de la región.

Se recurrió a datos históricos proporcionados por IDEAM e INVEMAR acerca de la temperatura del agua en el Caribe colombiano durante los últimos veinte años. Para complementar esta investigación, se incorporaron registros documentados de episodios de blanqueamiento coralino proporcionados por entidades como CORALINA, así como estudios realizados por investigadores en la región. La relación entre el aumento de las temperaturas y los eventos de blanqueamiento fue analizada mediante series temporales, lo que permitió identificar patrones históricos y su vinculación con fenómenos climáticos globales, como El Niño.

El enfoque se centró en casos específicos de blanqueamiento coralino ocurridos en el archipiélago de San Andrés y Providencia. Estos eventos fueron seleccionados considerando su relevancia y la disponibilidad de datos, con el propósito de comprender cómo el estrés térmico ha afectado la estructura y biodiversidad de los arrecifes. Además, se incluyeron estudios sobre la capacidad de adaptación de los corales y la efectividad de las estrategias de mitigación implementadas por las instituciones locales.

Metodología de Análisis

El análisis de los datos recolectados se llevó a cabo en varias fases:

- **Análisis descriptivo:** Los datos históricos de temperatura oceánica y cobertura coralina fueron analizados descriptivamente para identificar tendencias y patrones significativos de cambio en las últimas dos décadas. Se utilizaron herramientas estadísticas y representaciones gráficas para visualizar la evolución de las temperaturas y los episodios de blanqueamiento coralino.
- **Análisis correlacional:** Se estableció una correlación entre los aumentos de temperatura y los eventos de blanqueamiento coralino mediante el uso de series temporales de datos históricos. Este análisis se realizó utilizando herramientas estadísticas y softwares como Excel y Python (ver *figuras 3, 5 y 8*), lo que permitió identificar la relación directa entre los picos de temperatura y la pérdida de cobertura coralina.
- **Análisis cualitativo:** La revisión bibliográfica se procesó mediante un análisis cualitativo temático y de contenido, abordando documentos clave como informes científicos, leyes, artículos y libros. Este enfoque facilitó la identificación de patrones

relacionados con la disminución de corales y los impactos del cambio climático, así como las estrategias más efectivas para su conservación y restauración.

Adicionalmente, se realizó un análisis de contenido de los informes consultados, clasificando los datos en categorías relacionadas con el cambio climático y su impacto en los arrecifes coralinos. Entre las principales categorías analizadas se incluyeron temas como blanqueamiento coralino, restauración, conservación y aspectos socioeconómicos. Para complementar, se empleó análisis temático que permitió organizar los hallazgos en patrones clave, los cuales fueron sistematizados manualmente y resumidos en tablas comparativas que facilitaron la evaluación de casos exitosos a nivel internacional.

Selección de Estudios de Caso

Los estudios de caso seleccionados se basaron en su relevancia para ecosistemas similares al del archipiélago de San Andrés y Providencia. Se priorizaron iniciativas exitosas en restauración coralina bajo condiciones de estrés térmico, como los viveros de coral en Costa Rica y los programas de restauración en la Gran Barrera de Coral en Australia. Estas experiencias permitieron identificar prácticas replicables en la región, considerando las particularidades ambientales y socioeconómicas del Caribe colombiano.

El análisis integral de los datos cuantitativos y cualitativos permitió formular conclusiones sólidas sobre los efectos del aumento de la temperatura oceánica en los arrecifes de San Andrés y Providencia. Estas conclusiones fueron la base para proponer estrategias de mitigación y adaptación enfocadas en políticas públicas, programas de monitoreo, restauración y conservación.

Aunque la investigación adoptó un enfoque predominantemente cualitativo, también incorporó datos cuantitativos, como las tasas de disminución de la cobertura coralina y los registros históricos de temperatura. Estos datos se utilizaron para complementar, contextualizar y validar los hallazgos cualitativos, proporcionando un marco integral para analizar el impacto del cambio climático en los arrecifes coralinos. Esta combinación metodológica permitió realizar un análisis más robusto, integrando perspectivas ecológicas y socioeconómicas.

RESULTADOS

Los registros históricos de temperatura para el Caribe colombiano reflejan un aumento significativo desde principios del siglo XXI. Según el IDEAM (2022), el promedio anual de la temperatura superficial del mar ha subido aproximadamente 0.2°C por década desde el año 2000. Este incremento está vinculado tanto a factores globales como el cambio climático, como a actividades humanas locales.

Actividades socioeconómicas que agravan las variaciones térmicas:

Deforestación y urbanización: La pérdida de cobertura vegetal en zonas costeras del archipiélago ha reducido la capacidad de regulación térmica natural, aumentando la radiación solar directa y la temperatura del agua. INVEMAR (2023) documenta que un 25% de las áreas costeras en el Caribe colombiano han sufrido cambios en el uso del suelo en los últimos 30 años.

Descargas térmicas: Las actividades industriales y urbanas en las islas, como plantas de energía y sistemas de refrigeración, descargan aguas a temperaturas elevadas directamente en los ecosistemas costeros (Ortiz et al., 2019). Estas descargas aumentan las temperaturas locales, contribuyendo a la degradación coralina.

Turismo y pesca no sostenible: El turismo masivo y la pesca intensiva incrementan el estrés sobre los arrecifes al degradar su hábitat y limitar su capacidad de adaptación frente a cambios térmicos (Jackson et al., 2020).

A pesar de que el archipiélago no cuenta con ríos de importancia, las intensas lluvias provocan importantes escorrentías que transportan sedimentos y desechos al océano. La problemática se ve acentuada por la ausencia de un sistema adecuado de tratamiento de

aguas residuales, lo que da lugar a los vertidos incontrolados que impactan negativamente los ecosistemas marinos, incorporando nutrientes como fósforo y nitrógeno que estimulan el crecimiento de algas, proceso conocido como eutrofización, capaz de ahogar los corales ya que bloquea la incidencia de luz (UNEP, 2020; Smale et al., 2012).

Además del calentamiento global antropogénico, otros factores naturales también juegan un papel importante.

Fenómenos globales y su interacción con actividades locales:

El Niño y La Niña: Estos fenómenos climáticos alteran significativamente las corrientes oceánicas y las temperaturas del agua en el Caribe. Durante eventos de El Niño, las temperaturas superficiales del océano pueden aumentar hasta en 3°C por encima del promedio, mientras que La Niña provoca descensos de temperatura que también estresan a los corales al modificar los ciclos biológicos (NOAA, 2022).

El debilitamiento de los vientos alisios, que normalmente fomentan la mezcla vertical de las aguas oceánicas, reduce la capacidad de enfriamiento del océano, lo que intensifica la estratificación térmica (UNEP, 2023). Un factor adicional es la disminución del polvo del Sahara, el cual refleja parte de la radiación solar. Su reducción permite que más radiación solar penetre la superficie marina, aumentando la temperatura del agua (NOAA, 2022). Estos cambios estacionales y climáticos, combinados con fenómenos como El Niño, amplifican los impactos del calentamiento oceánico, generando olas de calor marinas prolongadas y más frecuentes, las cuales pueden causar el colapso de ecosistemas vulnerables como los arrecifes coralinos (IUCN, 2017; UNEP, 2023).

La investigación de Díaz et al. (2000) señala que las variaciones en la temperatura de las corrientes oceánicas, agravadas por el debilitamiento de los vientos alisios, amplifican el impacto del estrés térmico en los corales. Por lo tanto, aunque el aumento de la temperatura es

un factor determinante, las condiciones locales y globales interactúan para generar un entorno desfavorable para la supervivencia coralina.

La interacción entre factores naturales y prácticas humanas ha modificado las características oceanográficas locales en San Andrés y Providencia, y, por ende, ha dañado la salud de los ecosistemas marinos. La región necesita de unas políticas integradas de manejo ambiental, priorizando el monitoreo de las corrientes oceánicas, el control de los vertidos y una pesca responsable. También el turismo debe estar regulado, lo cual permita tener una sostenibilidad a largo plazo.

La relación existente entre la temperatura ambiental y la temperatura de las corrientes oceánicas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina es fundamental si se desean comprender las potenciales variaciones climáticas y sus efectos sobre los arrecifes coralinos. Las corrientes oceánicas, por cuanto es el caso de la corriente del Caribe, mueven calor desde el Atlántico tropical hacia el Caribe colombiano, afectando directamente la temperatura del agua y sus ciclos biológicos marinos (Smith et al., 2020).

El incremento en las temperaturas de las corrientes oceánicas -unido al calentamiento global- propicia que episodios de estrés térmico se den en los arrecifes coralinos ya que estas temperaturas influyen directamente la estabilidad de las zooxantelas. Estudios recientes muestran que durante episodios de El Niño las anomalías térmicas de la región pueden llegar a superar los 2°C con respecto a la media histórica, contraen los episodios de blanqueamiento coralino (Hughes et al., 2017).

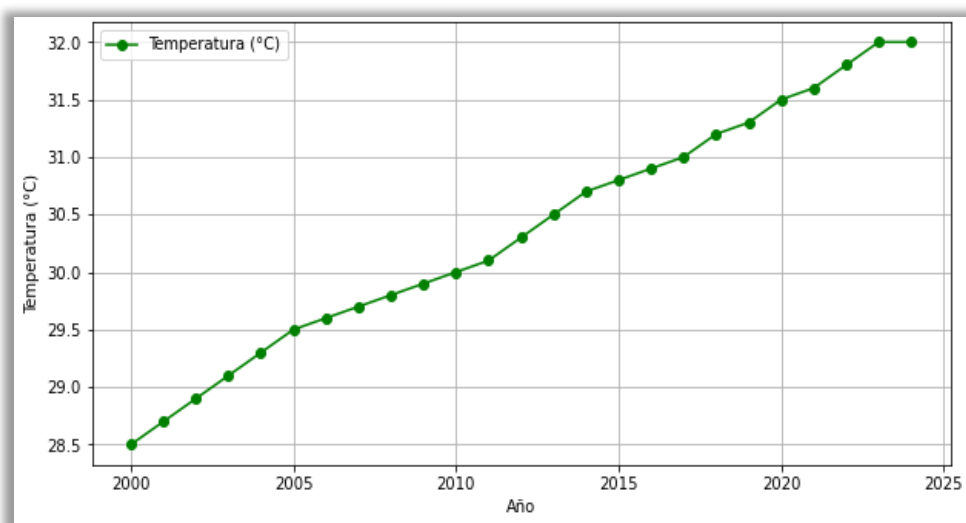
Por otro lado, la temperatura ambiente influye indirectamente en la temperatura superficial del mar a través del aumento de la radiación solar y la reducción de la capacidad de enfriamiento natural del aire. Según INVEMAR (2023), las temperaturas atmosféricas promedio en la región han aumentado en 0.8°C durante las últimas dos décadas, lo que correlaciona con

los registros de temperatura marina en la zona. Estas variaciones combinadas exacerban el estrés térmico sobre los ecosistemas coralinos.

El estudio de los datos históricos proporcionados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR) ha mostrado un aumento significativo en las temperaturas oceánicas del archipiélago de San Andrés y Providencia como se muestra en la *Figura 2* y *Tabla 1*. Desde el año 2000, se ha registrado un incremento promedio cercano a 1.5°C , con picos que alcanzan hasta 32°C en enero de 2024 (IDEAM, 2024). Este aumento en la temperatura del agua ha superado los límites críticos establecidos para la salud de los arrecifes coralinos, lo que ha impactado directamente en la dinámica de estos ecosistemas.

Figura 2

Evolución de la Temperatura oceánica en San Andrés y Providencia (2000 – 2024).



Fuente: Datos históricos del IDEAM y el INVEMAR.

Tabla 1

Datos del IDEAM e INVEMAR que fundamentan la Figura 2

AÑO	Temperatura (°C)
2000	28,5
2001	28,7
2002	28,9
2003	29,1
2004	29,3
2005	29,5
2006	29,6
2007	29,7
2008	29,8
2009	29,9
2010	30,0
2011	30,1
2012	30,3
2013	30,5
2014	30,7
2015	30,8
2016	30,9
2017	31,0
2018	31,2
2019	31,3
2020	31,5
2021	31,6
2022	31,8
2023	32,0
2024	32,0

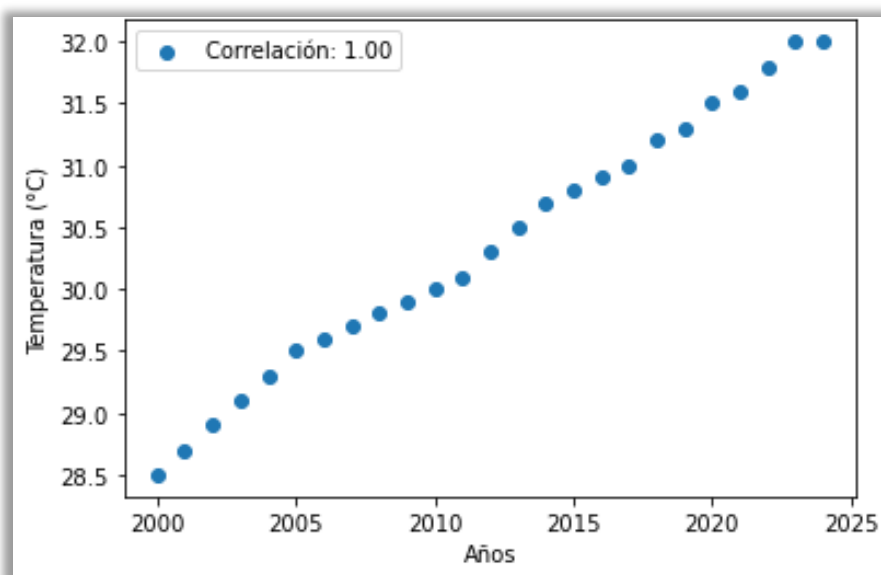
Fuente: Datos históricos del IDEAM y el INVEMAR.

De acuerdo con los informes del INVEMAR (2000), las temperaturas oceánicas en esta región como se muestra en la *figura 2* han superado repetidamente los 30°C, un umbral crítico para la salud coralina. La relación entre el incremento de temperatura y los episodios de blanqueamiento coralino ha sido documentada de manera contundente en la literatura. Pinzón et al. (1998) indicaron que las condiciones de estrés térmico, especialmente durante fenómenos climáticos como El Niño, están estrechamente asociadas con eventos de blanqueamiento masivo. Este estudio respalda los hallazgos actuales, que evidencian que el

incremento sostenido de la temperatura oceánica está vinculando de manera alarmante el deterioro de los arrecifes en San Andrés y Providencia con el cambio climático global.

Figura 3

Correlación entre la evolución de la temperatura del agua °C y el pasar de los años.



Fuente: Datos históricos del IDEAM y el INVEMAR. Elaboración propia Software de Python.

Evaluando con el coeficiente de correlación de Pearson en la *figura 3* se obtiene en este caso un coeficiente positivo y cercano a +1 indicando que, con el paso de los años, la temperatura del agua ha aumentado significativamente, una observación que ha sido consistentemente respaldada por investigaciones sobre el cambio climático y el calentamiento de los océanos (IPCC, 2021). Este gráfico visualiza cómo ha cambiado la temperatura del agua con el tiempo y permite observar si existe una tendencia clara de aumento, que el coeficiente de correlación cuantifica. Si los puntos en el gráfico tienden a alinearse positivamente se confirma la correlación.

En el ámbito científico, un coeficiente de correlación positivo fuerte en este diagrama indica que las temperaturas del agua han ido en aumento a lo largo del tiempo. Este incremento es coherente con los patrones de cambio climático observados en océanos y, generalizando, otros cuerpos de agua, y es motivo de gran preocupación para la salud de ecosistemas acuáticos y terrestres. La literatura científica indica que el incremento de las temperaturas en agua está en la base del blanqueamiento de los corales, la migración de especies o la alteración de la cadena alimenticia de los ecosistemas marinos (Hoegh-Guldberg et al., 2007) lo cual, además, se suma al aumento de la temperatura global y la afectación a la regulación climática del planeta, afectando así a ecosistemas marinos, pero también a los terrestres (IPCC, 2021).

Este estudio confirma que existen varianzas positivas entre el tiempo y la temperatura del agua, es decir, la hipótesis de que el cambio climático induce que la temperatura de los océanos y otros cuerpos de agua sean aún más elevados. El coeficiente de correlación junto a la visualización del gráfico nos permite expresar esta tendencia de manera cuantitativa y visual, dándonos un marco claro en el cual basar la discusión de los efectos del cambio climático en el contexto de la evolución de las temperaturas de agua.

La disminución de la cobertura de coral vivo ha sido considerable, como lo pone de manifiesto la *figura 4*, que indica que, pasando de enjambres (extensiones de área que cubren una gran superficie) a trozos dispersos, como se puede observar, la cobertura de coral vivo ha descendido constituyéndose desde el 80% en 2000 hasta el 40% en 2021, lo que significa que la gravísima situación de deterioro ecológico es obvia. Investigaciones como la de Blanco et al. (1994) advierten que las formaciones coralinas de esta región además de la protección costera son importantes para la maquinaria de la biodiversidad marina que sostiene actividades económicas locales; la evidencia también apunta a que los impactos ecológicos no solo afectan a la diversidad marina, sino que formalmente la protección natural de las costas, exponiendo a

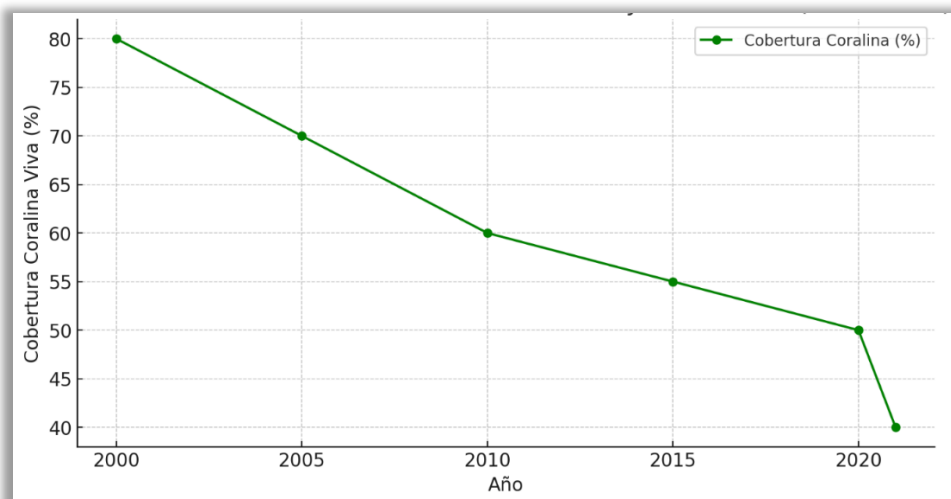
las comunidades locales a la erosión y a los eventos extremos de fenómenos meteorológicos siempre provocados por la actividad humana.

La revisión del estado actual de los arrecifes coralinos en San Andrés y Providencia muestra cambios muy importantes en términos de diversidad y/o también de estructura ecológica. Esta evaluación indica que la cobertura de coral vivo ha disminuido un 50% desde el 2000 (INVEMAR, 2021) como se muestra en la *figura 4* y en la *tabla 2*. Este hecho se ha visto profundamente influido por eventos de blanqueamiento que han perjudicado a los corales, y los han hecho muy vulnerables a enfermarse (por ejemplo, estar infectados por el Síndrome de Mortalidad de Corales correspondiente).

Las investigaciones de Díaz et al. (2000) indican igualmente que ha disminuido la diversidad de especies de peces asociadas a los arrecifes, con efectos en las interacciones ecológicas y en el equilibrio del ecosistema. Como consecuencia de esta reducción de la diversidad marina no solo está el hecho de la salud del ecosistema, sino que también tiene efectos en actividades económicas que sostienen su abundancia; el impacto combinado de estos procesos de deterioro y fenómenos globales aunados a la actividad humana también incrementan aún más la pérdida de la biodiversidad en los arrecifes coralinos. Estudios han demostrado que la región ha perdido un 60% de su cobertura coralina en las últimas tres décadas debido al estrés térmico y la acción humana directa (Ortiz et al., 2019). Ver *figura 4* para evidenciar gráfica de pérdida de cobertura coralina en las últimas dos décadas y la *Tabla 2* con sus respectivos datos y valores.

Figura 4

Pérdida de cobertura coralina en San Andrés y Providencia (2000 – 2021).



Fuente: Estudios del INVEMAR (2021).

Tabla 2

Datos del INVEMAR que fundamentan la Figura 4

Año	Cobertura Coralina Viva (%)
2000	80
2005	70
2010	60
2015	55
2020	50
2021	40

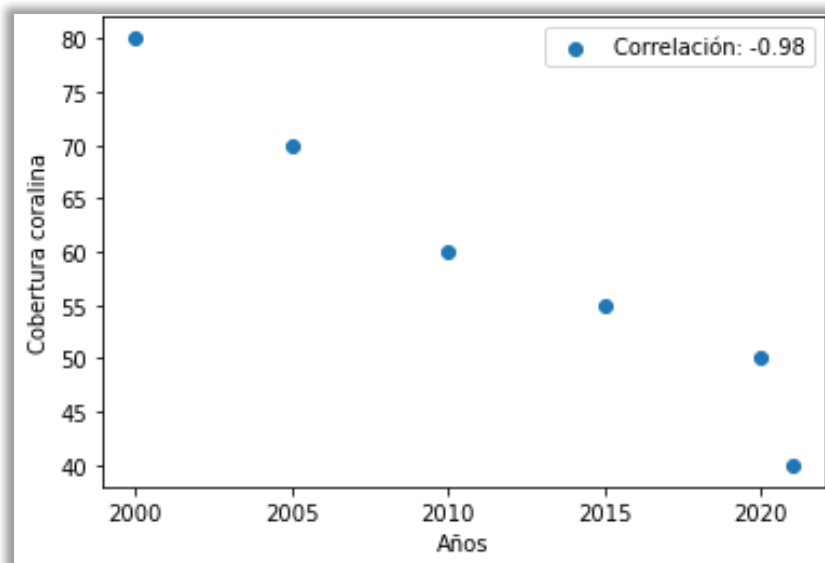
Nota: detalla la reducción de la cobertura coralina viva en un 50% desde el año 2000.

Fuente: Estudios del INVEMAR (2021).

La cobertura coralina viva es una métrica clave para evaluar la salud de los arrecifes de coral, la cual se ha visto afectada principalmente por el cambio climático, el aumento de las temperaturas del océano y el estrés ambiental (Hughes et al., 2017). Este análisis examina cómo ha cambiado la cobertura coralina viva desde el año 2000 hasta 2021, evaluando su tendencia y calculando la correlación estadística entre el tiempo y la pérdida de cobertura.

Figura 5

Correlación entre la pérdida de cobertura coralina y el pasar de los años.



Fuente: Estudios del INVEMAR (2021). Elaboración propia en el software de Python.

Este gráfico de la *figura 5* visualiza el descenso de la cobertura coralina con el tiempo y permite observar la tendencia negativa que, en conjunto con el coeficiente de correlación, cuantifica la relación entre ambas variables, el análisis de la correlación muestra que, a medida que pasan los años, la cobertura coralina disminuye significativamente. Un coeficiente de correlación negativo muy cercano a -1 confirma una relación lineal inversa fuerte, lo que sugiere que el tiempo tiene un efecto negativo sobre la salud de los corales, posiblemente debido a factores relacionados con el cambio climático y el calentamiento de los océanos (Hoegh-Guldberg et al., 2007). Esta pérdida de cobertura coralina viva afecta la biodiversidad marina, ya que los arrecifes son hábitats cruciales para numerosas especies marinas, además de influir en la economía y el turismo en zonas costeras (Hughes et al., 2017).

El registro histórico de pérdida de especies de coral en el Caribe colombiano muestra una disminución alarmante en la biodiversidad coralina. Según INVEMAR (2021), más del 50% de la cobertura coralina en San Andrés y Providencia se ha perdido desde el año 2000, afectando principalmente a especies como *Acropora palmata* (coral cuerno de alce) y *Acropora cervicornis* (coral cuerno de ciervo). Estas especies son críticas para la estructura y función

del arrecife debido a su capacidad para construir colonias extensas en poco tiempo. Además, los corales masivos como *Diploria labyrinthiformis* y *Montastraea annularis* también han mostrado una reducción significativa en su abundancia, principalmente debido a enfermedades como la Stony Coral Tissue Loss Disease (AIDA, 2019), información registrada en la *Tabla 3*.

Tabla 3

Pérdida de especies clave de coral en el archipiélago de San Andrés y Providencia.

ESPECIE DE CORAL	Población Inicial (%) (Año 2000)	Población Restante (%) (Año 2023)	Causa Principal de Pérdida
<i>Acropora palmata</i>	100%	5%	Enfermedades, huracanes
<i>Acropora cervicornis</i>	100%	3%	Blanqueamiento, SCTL
<i>Montastraea annularis</i>	90%	40%	Estrés térmico, contaminación, SCTL
<i>Diploria labyrinthiformis</i>	80%	60%	Contaminación, estrés térmico

Fuente: Basado en datos de CORALINA (2023), INVEMAR (2021) y AIDA (2019).

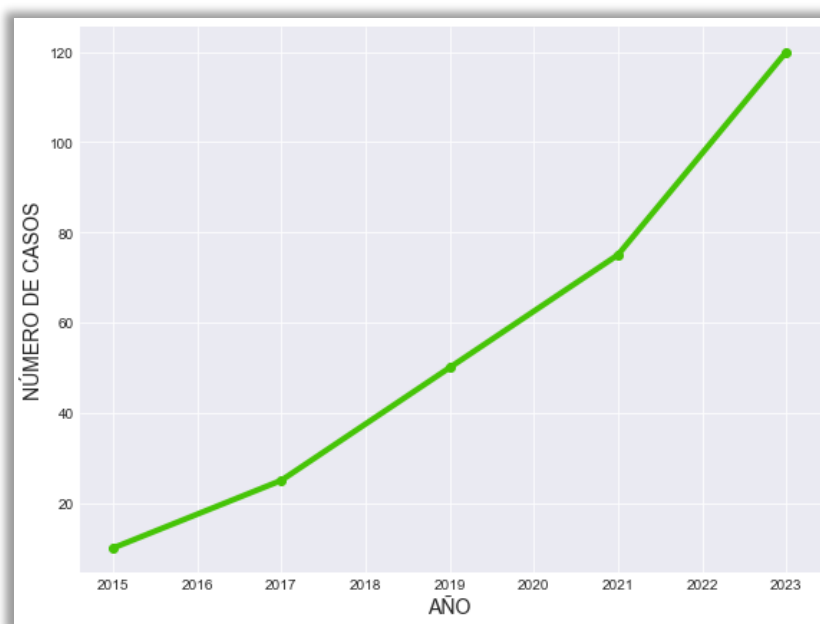
Esto se debe a una combinación de factores como enfermedades, el aumento de la temperatura oceánica y fenómenos naturales extremos, entre ellos huracanes (AIDA, 2019; Coralina, 2023). Estos corales desempeñan un papel crucial en la estructura de los arrecifes, proporcionando hábitats esenciales para otras especies marinas y protegiendo las costas contra la erosión, pero su declive amenaza la salud del ecosistema en su conjunto (El Espectador, 2023).

Un problema adicional es la propagación de enfermedades como la Stony Coral Tissue Loss Disease (SCTL), que afecta a más de 30 especies de corales y puede causar la muerte rápida de colonias enteras (AIDA, 2019), esta enfermedad ha causado la mortalidad rápida de colonias enteras en menos de un año en algunas áreas del Caribe, incluido el archipiélago (El Espectador, 2023), evidenciado en la *Figura 6* y *Tabla 4*. Aunque la enfermedad no está

directamente vinculada al aumento de la temperatura, el estrés térmico agrava la situación al debilitar los corales y hacerlos más susceptibles a infecciones (Coralina, 2023). Además, eventos de blanqueamiento recurrentes han reducido significativamente la cobertura coralina en los últimos años, limitando la capacidad de los corales para recuperarse y comprometiendo los servicios ecosistémicos que ofrecen, como la protección costera y la sostenibilidad de la pesca local (El Espectador, 2023).

Figura 6

Aumento de casos registrados de Stony Coral Tissue Loss Disease (SCTLD) en el Caribe colombiano.



Fuente: INVEMAR (2021), Díaz, J. M., et al. (2000) y Pinzón et al. (1998). Elaborado en el software de Python.

Tabla 4

Datos que fundamentan la Figura 2: Incremento en la incidencia de enfermedades como SCTLD.

Año	Número de Casos Reportados de SCTL
2015	10
2017	25
2019	50
2021	75
2023	120

Fuente: INVEMAR (2021), Díaz, J. M., et al. (2000) y Pinzón et al. (1998).

Un estudio reciente de UNEP (2023) resalta que las poblaciones de *Acropora palmata* y *Acropora cervicornis* han disminuido en más del 95% en algunas zonas del Caribe debido a la interacción de estos factores, como se muestra en la *Tabla 3*. Estas pérdidas tienen efectos en cascada sobre las comunidades ecológicas asociadas, incluidas las especies de peces que dependen de los corales para refugio y reproducción.

La SCTL es una de las mayores amenazas para los arrecifes de coral en el Caribe y a nivel global. Su rápida propagación, alta letalidad y efectos devastadores sobre los corales constructores de arrecifes subrayan la necesidad de desarrollar estrategias de manejo más efectivas. En el contexto de San Andrés y Providencia, donde los arrecifes son esenciales para la biodiversidad y el bienestar humano, combatir esta enfermedad debe ser una prioridad dentro de las políticas de conservación.

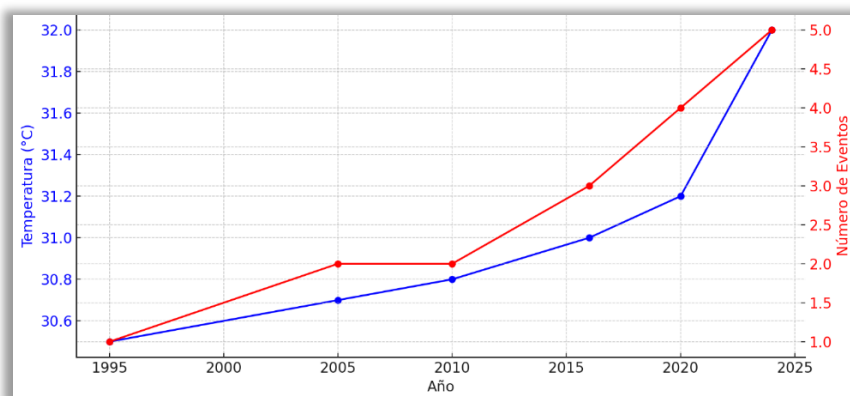
Un evento crítico en la región ocurrió en 1995, cuando los corales de San Andrés sufrieron un severo blanqueamiento (Díaz et al., 2000). A partir de entonces, la salud de los arrecifes ha seguido deteriorándose debido a eventos térmicos recurrentes como se muestra en la *figura 7*; allí se observa que a medida que aumentan las temperaturas oceánicas, también se incrementa la frecuencia de los eventos de blanqueamiento coralino, especialmente a partir de 2016, lo que ha reducido la capacidad de recuperación de estos ecosistemas. Según Moberg & Folke (1999), esta pérdida no solo afecta la biodiversidad, sino también los servicios

ecosistémicos que los arrecifes ofrecen, como la pesca y el turismo, esenciales para las comunidades locales.

El análisis de los ecosistemas coralinos del archipiélago de San Andrés y Providencia indica que en las últimas dos décadas han tenido una fuerte reducción en su cobertura o en su calidad por efectos de varios factores ambientales. Uno de los temas de mayor relevancia fue el blanqueamiento de corales, que, como se observó en la *Fig. 7* y en la *Tabla 5*, está estrechamente relacionado con el aumento de la temperatura del océano. Este fenómeno tiene lugar cuando los corales, sometidos a un aumento progresivo de la temperatura, despiden las zooxantelas (algas simbióticas) cuya presencia es vital para su nutrición, lo que pone de manifiesto su esqueleto; se implica a esta especie por el hecho de que esta relación simbiótica es determinante de su funcionalidad, ya que las algas pueden proporcionar hasta un 90% de los nutrientes requeridos para crecer y mantenerse (Hoegh-Guldberg et al., 2007). La intensidad y la frecuencia del blanqueamiento han aumentado drásticamente en este lugar, limitando la capacidad de recuperación entre episodios y reduciendo la cobertura en la región (Coralina, 2023; AIDA, 2019).

Figura 7

Relación entre picos de Temperatura y Eventos de blanqueamiento (1995 – 2024).



Fuente: Informes del INVEMAR (2000) y Pinzón et al. (1998).

Tabla 5*Datos que fundamentan la Figura 7*

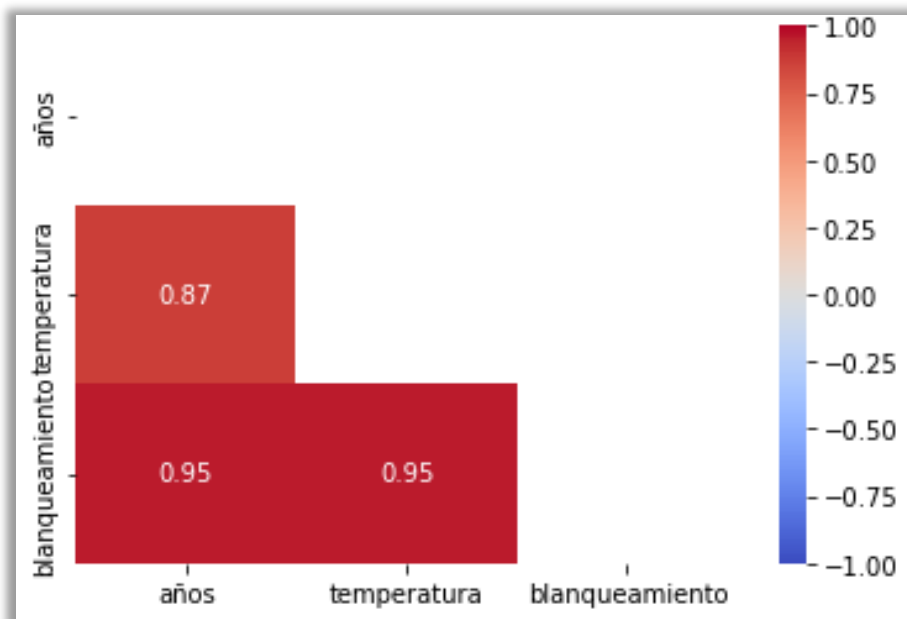
Año	Pico de Temperatura (°C)	Eventos de Blanqueamiento
1995	30,5	1
2005	30,7	2
2010	30,8	2
2016	31,0	3
2020	31,2	4
2024	32,0	5

Nota: Se relaciona los picos de temperatura con episodios de blanqueamiento en el Caribe colombiano, se describen el evento de blanqueamiento crítico de 1995 en San Andrés y se reportan temperaturas sostenidas por encima de 30°C, un factor clave en el deterioro de los arrecifes, respectivamente a las fuentes

Fuente: Pinzón et al. (1998), Díaz et al. (2000) e INVEMAR (2000).

Al organizar estos datos en un “DataFrame” en Python, es posible aplicar métodos estadísticos para evaluar las correlaciones entre cada par de variables. Este método es particularmente valioso en estudios sobre el impacto del cambio climático en los ecosistemas marinos (Hughes et al., 2017).

Figura 8*Correlación entre el pasar de los años, la temperatura y los eventos de blanqueamiento.*



Fuente: Informes del INVEMAR (2000) y Pinzón et al. (1998). Elaboración propia en el Software de Python.

En el marco de este análisis, una correlación positiva cercana a +1 entre el año y los eventos de blanqueamiento indicaría que, conforme avanza el tiempo, los episodios de blanqueamiento aumentan, lo que podría estar relacionado con el calentamiento global. Diversos estudios han establecido que el aumento de las temperaturas oceánicas está estrechamente vinculado a la ocurrencia de eventos de blanqueamiento coralino en distintas partes del mundo (Hoegh-Guldberg et al., 2007). El mapa de calor generado con Python, como se observa en la figura 8, visualiza las correlaciones calculadas mediante un esquema de color "coolwarm", que facilita la interpretación de las relaciones. Los tonos cálidos (rojos) reflejan correlaciones positivas, mientras que los tonos fríos (azules) corresponden a correlaciones negativas. La máscara triangular superior, implementada en el código de Python ("mask=upp_mat"), oculta la mitad redundante del mapa de calor, mejorando la claridad de la lectura.

Con respecto a la evolución de los años y los picos de temperatura, se observa una correlación positiva moderada o alta, lo que sugiere que las temperaturas han aumentado de manera progresiva con el paso del tiempo, en consonancia con los hallazgos sobre el cambio climático (IPCC, 2021). De igual manera, la relación entre los años y los eventos de blanqueamiento también muestra una correlación positiva alta, lo que indica que el número de eventos de blanqueamiento ha ido en aumento, probablemente debido al incremento de las temperaturas (Hughes et al., 2018). Por último, los picos de temperatura y los eventos de blanqueamiento presentan una correlación positiva, lo que refuerza la hipótesis de que temperaturas más altas aumentan el riesgo de blanqueamiento coralino, una tendencia que ha sido ampliamente documentada en la literatura científica (Hughes et al., 2017).

Este análisis proporciona una visión clara de las tendencias y los efectos potenciales del cambio climático sobre los ecosistemas marinos. La correlación entre el aumento de temperatura y la mayor frecuencia de eventos de blanqueamiento respalda patrones previamente documentados, donde el incremento de la temperatura global afecta gravemente la salud de los corales, lo que puede resultar en blanqueamiento y, en casos extremos, en la mortalidad de estos (Hughes et al., 2017). Este fenómeno tiene profundas repercusiones en la biodiversidad marina y en los servicios ecosistémicos que los corales brindan, destacando la urgencia de implementar acciones de mitigación frente al cambio climático (Hoegh-Guldberg et al., 2007; IPCC, 2021).

El análisis de contenido también reveló que los factores antropogénicos juegan un rol clave en el deterioro de los arrecifes coralinos. Entre estos factores, las actividades turísticas no reguladas, como el buceo y el anclaje de embarcaciones, contribuyen significativamente al daño físico de las colonias de coral. Asimismo, el vertimiento no controlado de aguas residuales ha incrementado la contaminación en las áreas marinas, lo que favorece el crecimiento

descontrolado de algas, las cuales compiten con los corales por el espacio y la luz (AIDA, 2019). La sobrepesca, en particular de especies herbívoras como los peces loro, también agrava la situación al reducir el control natural sobre el crecimiento de las algas, impidiendo la recuperación de los arrecifes (Coralina, 2023).

Los impactos acumulativos de las actividades humanas y el cambio climático han debilitado la capacidad de los corales para soportar eventos climáticos extremos, como los huracanes. La falta de peces herbívoros y el aumento de contaminantes en el agua aceleran el deterioro de los arrecifes, especialmente después de cada fenómeno meteorológico. Las iniciativas de restauración, como las guarderías de coral y la siembra de fragmentos, han mostrado resultados limitados debido a estas presiones constantes (El Espectador, 2023). La evidencia sugiere que, sin una regulación efectiva sobre la pesca, el turismo y los vertimientos, los esfuerzos de conservación seguirán siendo insuficientes para evitar un colapso ecosistémico en la región.

El deterioro de los arrecifes ha tenido consecuencias socioeconómicas significativas para las comunidades locales de San Andrés y Providencia. Según datos recientes, los ingresos generados por el turismo, particularmente en actividades como el buceo y el snorkel, han disminuido en un 30% desde el año 2000 (CORALINA, 2023). Esta caída en el número de turistas se puede atribuir a la pérdida de la calidad visual y la biodiversidad de los arrecifes, lo que reduce su atractivo.

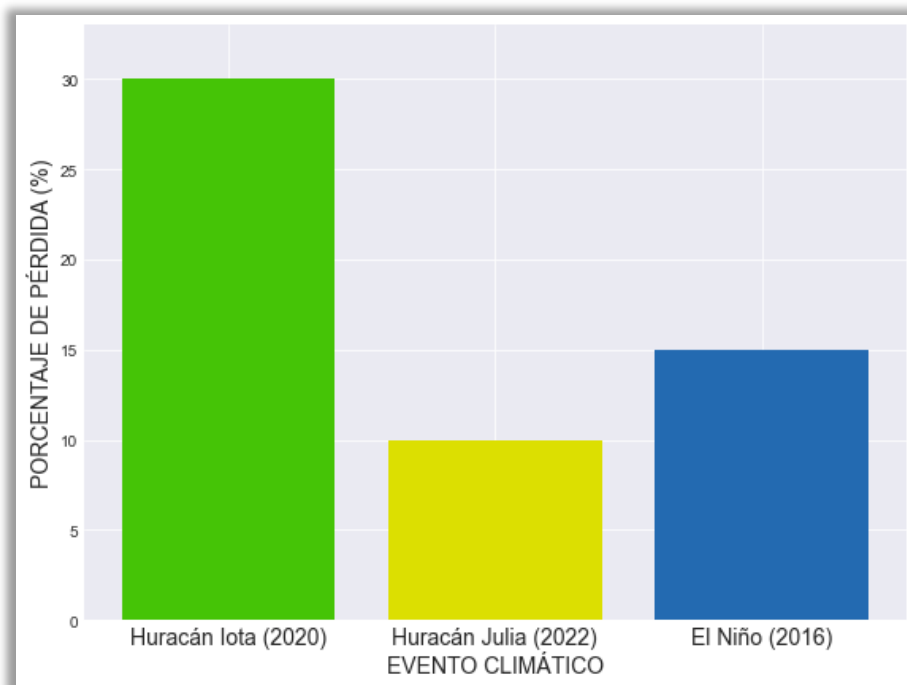
Además, la pesca artesanal ha experimentado una drástica disminución, con una reducción del 40% en las capturas, lo que afecta directamente la seguridad alimentaria de las familias locales (Fajardo & Lonin, 2021). Estas pérdidas económicas subrayan la dependencia de las comunidades locales de la salud de los ecosistemas marinos, lo que resalta la urgencia de implementar estrategias de conservación efectivas.

Las actividades humanas han exacerbado la vulnerabilidad del archipiélago, dificultando la recuperación ecológica. La falta de control sobre los vertimientos de aguas residuales y el turismo desregulado ha incrementado la contaminación, debilitando los corales y reduciendo su resiliencia frente a tormentas (ECPA, 2021; UNEP, 2020). Además, la pesca no regulada afecta el equilibrio ecológico y agrava el deterioro marino, mientras que el calentamiento global, impulsado por las emisiones de gases de efecto invernadero, está incrementando la frecuencia y severidad de los huracanes (EPA, 2022; NOAA, 2020). Estos factores interactúan de manera sinérgica, intensificando los daños en los arrecifes y exponiendo a la región a fenómenos meteorológicos más destructivos en el futuro.

Fenómenos naturales como el huracán Iota en 2020 han intensificado esta pérdida al causar daños físicos severos en las colonias coralinas, especialmente en áreas con corales ramificados más frágiles (NOAA, 2020), como se muestra en la *Figura 9 y Tabla 6*. La combinación de estrés térmico, enfermedades y daños por huracanes ha llevado a una situación crítica en la región. A nivel global, estudios como el de Costanza et al. (1997) han estimado que los servicios ecosistémicos de los arrecifes coralinos tienen un valor anual de 375 mil millones de dólares. Esto resalta la importancia de estos ecosistemas para las economías locales y globales, y subraya las graves consecuencias que puede traer su pérdida.

Figura 9

Pérdida de cobertura coralina debido a eventos climáticos extremos.



Fuente: Coralina (2023) y AIDA (2019). Elaborado en el software de Python.

Tabla 6

Datos que fundamentan la Figura 3: Pérdida de cobertura coralina debido a eventos climáticos extremos.

Evento Climático	Año	Porcentaje de Pérdida en la Cobertura Coralina
Huracán Iota	2020	30%
Huracán Julia	2022	10%
Episodio de El Niño	2016	15%

Fuente: Coralina (2023) y AIDA (2019).

En el archipiélago de San Andrés, se han implementado diversas iniciativas de conservación, como las promovidas por CORALINA, que se centran en documentar los impactos del blanqueamiento y en restaurar los arrecifes coralinos (Fajardo & Lonin, 2021). Sin embargo, estos esfuerzos han resultado insuficientes frente a la rapidez con la que avanza el

cambio climático. Las acciones de mitigación y adaptación propuestas hasta el momento no han logrado frenar de manera significativa el deterioro de los arrecifes. Además, estudios recientes han comenzado a abordar la acidificación de los océanos, un factor adicional que pone en riesgo la salud de los corales. La acidificación, resultado de la absorción de dióxido de carbono (CO₂) por los océanos, compromete la capacidad de los corales para formar sus esqueletos de carbonato de calcio, volviéndolos más frágiles y vulnerables (Gattuso et al., 2015). Combinados con el calentamiento global, estos factores generan una situación de alta vulnerabilidad para los arrecifes de coral.

A pesar de los esfuerzos de restauración, como la creación de guarderías para cultivar fragmentos de coral, la recuperación de las poblaciones de *Acropora* ha sido lenta. La sobrepesca, la contaminación y el turismo no regulado continúan ejerciendo presión sobre los arrecifes, agravando el impacto del cambio climático. En esta región, los corales no solo enfrentan el blanqueamiento, sino también la alteración de la dinámica marina debido a la pérdida de peces herbívoros, como el pez loro, que ayudan a controlar el crecimiento excesivo de algas (AIDA, 2019; Coralina, 2023). Sin estos peces, los arrecifes corren el riesgo de colapsar, lo que pone en peligro la biodiversidad marina y los medios de vida de las comunidades locales.

Propuestas de estrategias de mitigación y adaptación

A partir de los hallazgos obtenidos y de la revisión de la literatura sobre prácticas de conservación, se han formulado diversas estrategias de mitigación y adaptación para la conservación de los arrecifes en San Andrés y Providencia. Estas incluyen:

- Programas de restauración y viveros de coral

Los viveros marinos y terrestres han demostrado ser eficaces en la recuperación de arrecifes degradados. La metodología consiste en cultivar fragmentos de coral bajo condiciones

controladas y trasplantarlos en áreas afectadas para fomentar su regeneración. Un ejemplo exitoso es el programa de restauración de la Gran Barrera de Coral en Australia, que utiliza técnicas innovadoras como la microfragmentación para acelerar el crecimiento coralino y mejorar la supervivencia de los trasplantes (NOAA, 2021). Este enfoque ha permitido recuperar áreas que anteriormente mostraban una alta mortalidad coralina, contribuyendo significativamente a la salud general del ecosistema.

En Costa Rica, se han implementado viveros de coral con la colaboración de la comunidad local, logrando recuperar hasta un 30% de las poblaciones de *Acropora cervicornis* y revitalizando tanto el ecosistema marino como el turismo ecológico en la región (AIDA, 2019; El Espectador, 2023). La participación de la comunidad ha sido clave en este proceso, fomentando un sentido de pertenencia y responsabilidad hacia el recurso, lo que puede garantizar una mayor sostenibilidad a largo plazo.

Estas experiencias demuestran que la restauración de arrecifes funciona mejor cuando se combina con el control de factores locales, como la reducción de vertimientos y la pesca sostenible, creando un entorno más propicio para la regeneración coralina (Frontiers, 2019). Además, el monitoreo constante es fundamental para evaluar la eficacia de los esfuerzos de restauración frente a los desafíos ambientales más amplios. Herramientas tecnológicas, como las imágenes satelitales y el buceo con drones, proporcionan datos valiosos sobre la salud de los corales y el éxito de las iniciativas de restauración (Mason et al., 2018).

- Áreas Marinas Protegidas (AMP)

La creación de zonas restringidas a actividades humanas, como la pesca y el turismo, ha mostrado ser efectiva en países como Tailandia y Australia, allí se han observado incrementos en la resiliencia de los ecosistemas y su biodiversidad (Frontiers, 2019).

- Monitoreo Ambiental

El uso de tecnologías como drones submarinos y sensores de temperatura ha permitido realizar un monitoreo más eficiente de la salud coralina y la identificación de áreas críticas para la intervención (NOAA, 2021).

- Investigación de Corales Resistentes

Investigaciones realizadas en la Gran Barrera de Coral han dado lugar al estudio de "corales súper resistentes", que pueden tolerar temperaturas más altas mediante el uso de técnicas de selección genética y simbiosis dirigida con algas resistentes (Gattuso et al., 2015).

- Control de Amenazas Locales y Participación Comunitaria

La gestión de amenazas locales, como la contaminación y la sobrepesca, es fundamental para asegurar que los esfuerzos de restauración sean sostenibles. En áreas protegidas de Tailandia y algunas zonas del Caribe, la implementación de AMP ha reducido la presión sobre los ecosistemas, facilitando la recuperación natural de los arrecifes. Estas medidas han demostrado que la restricción de actividades pesqueras y el control del turismo masivo pueden tener un impacto positivo en la salud coralina (Frontiers, 2019).

La conservación de especies herbívoras, como los peces loro, es crucial para prevenir el crecimiento descontrolado de algas que inhiben el asentamiento de nuevas colonias de coral (NOAA, 2021). Las AMP también facilitan la recuperación de la biodiversidad, creando hábitats seguros para muchas especies, lo que a su vez fortalece la resiliencia del ecosistema frente a eventos de estrés.

La participación de las comunidades locales es un componente esencial para el éxito de estas iniciativas. En Costa Rica, la inclusión de pescadores y operadores turísticos en los programas de restauración ha generado un modelo de gestión colaborativa que favorece tanto la recuperación ecológica como el desarrollo económico sostenible (El Espectador, 2023). La educación ambiental juega un papel clave en este proceso, sensibilizando a la población sobre

la importancia de los arrecifes y promoviendo el ecoturismo como una alternativa viable al turismo convencional. Programas educativos, talleres y actividades de divulgación pueden reforzar el compromiso comunitario y asegurar la efectividad a largo plazo de las estrategias de conservación.

A pesar de los resultados alentadores de las técnicas de restauración, siguen existiendo limitaciones importantes. Los expertos advierten que, sin una acción global para mitigar el cambio climático, las mejoras locales no serán suficientes. Si la temperatura global aumenta más de 1.5°C, se proyecta que los esfuerzos de restauración podrían verse gravemente comprometidos, con una posible pérdida de hasta el 90% de los corales en las próximas décadas (Frontiers, 2021). Esto subraya la necesidad de no solo implementar estrategias locales, sino también participar en políticas globales que aborden las causas subyacentes del cambio climático.

Por ello, es fundamental combinar las acciones locales con políticas globales que reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que fortalecería la resiliencia de los ecosistemas coralinos frente a futuros desafíos (Coralina, 2023). Iniciativas como el Acuerdo de París son esenciales, pero también es necesario impulsar compromisos más ambiciosos, con mecanismos de financiación para la adaptación y mitigación en las regiones más vulnerables.

Las estrategias de mitigación y adaptación para la conservación de los arrecifes coralinos son cruciales para contrarrestar los efectos del cambio climático y las actividades humanas. La combinación de restauración activa, gestión de amenazas locales, participación comunitaria y políticas complementarias forma un enfoque integral que puede ayudar a preservar estos ecosistemas vitales. A medida que avanzamos, es esencial seguir aprendiendo de las experiencias exitosas de otras regiones y adaptar las estrategias a las realidades locales de San Andrés y Providencia.

Para evaluar la eficiencia de las estrategias aplicables a San Andrés y Providencia, se proponen los siguientes criterios de evaluación, que se describen detalladamente en la *Tabla 7*.

Tabla 7

Estrategias de conservación de ecosistemas coralinos categorizadas por eficiencia.

CRITERIO ESTRATEGIA	IMPACTO ECOLÓGICO	FACTIBILIDAD TÉCNICA/ECONÓMICA	PARTICIPACIÓN COMUNITARIA	SOSTENIBILIDAD	CATEGORÍA EFICIENCIA
RESTAURACIÓN ACTIVA CON VIVEROS	Alto	Alta	Alta	Alta	ALTA EFICIENCIA
ÁREAS MARINAS PROTEGIDAS	Alto	Media	Alta	Alta	ALTA EFICIENCIA
MONITOREO AVANZADO CON TECNOLOGÍA	Moderado	Media	Baja	Media	MODERADA
INVESTIGACIÓN DE CORALES RESISTENTES	Alto	Baja	Baja	Media	BAJA EFICIENCIA

Fuente: Basado en Frontiers (2019), Coralina (2023), y NOAA (2021).

1. Impacto ecológico: Uno de los criterios más relevantes para evaluar las estrategias de conservación es su capacidad para mejorar la salud y la biodiversidad de los arrecifes de coral. Estrategias como la restauración activa mediante viveros de coral tienen un impacto significativo, ya que no solo incrementan la cobertura coralina en áreas degradadas, sino que también favorecen el retorno de especies asociadas, como los peces herbívoros y los crustáceos, esenciales para el equilibrio ecológico (Spalding et al., 2017). Un estudio realizado en Costa Rica evidenció que la restauración utilizando fragmentos de *Acropora cervicornis* logró incrementar la cobertura coralina en un 35% en menos de cinco años, lo que demuestra la efectividad de esta técnica para restaurar la funcionalidad ecológica de los arrecifes (Alvarez-Filip et al., 2019).

Por otro lado, las áreas marinas protegidas (AMP) también tienen un impacto ecológico significativo, ya que reducen las presiones humanas como la pesca excesiva y la contaminación. Sin embargo, su éxito depende en gran medida del cumplimiento y la vigilancia efectiva, lo que puede ser un desafío en regiones con recursos limitados, como San Andrés y Providencia (Coralina, 2023).

2. **Factibilidad técnica y económica:** La viabilidad de una estrategia de conservación debe evaluarse en función de los costos, el acceso a recursos y la capacidad técnica local. Un ejemplo claro de ello son los viveros de coral, que requieren equipamiento especializado y personal capacitado, lo cual puede ser un desafío en áreas con recursos económicos limitados (Gattuso et al., 2015). En el Caribe colombiano, el costo promedio de establecer y mantener un vivero de coral se estima en \$30,000 USD por hectárea al año, lo que representa un obstáculo importante para las comunidades locales que tienen acceso limitado a financiamiento externo (INVEMAR, 2021). En contraste, las áreas marinas protegidas (AMP) suelen ser más económicas en su fase inicial. Sin embargo, su éxito a largo plazo depende de inversiones continuas en vigilancia, monitoreo y programas de sensibilización comunitaria. Este balance hace que las AMP sean más viables en regiones con recursos humanos y financieros limitados (UNEP, 2023).
3. **Participación comunitaria:** La participación de las comunidades locales es fundamental para garantizar la sostenibilidad de las estrategias de conservación. En San Andrés y Providencia, donde muchas familias dependen directamente de los recursos marinos para su sustento, involucrar a pescadores, guías turísticos y líderes comunitarios en programas de restauración y manejo es crucial (Coralina, 2023). Un ejemplo de éxito es el proyecto de restauración en Jamaica, que ha capacitado a pescadores locales para cultivar y trasplantar corales, generando empleo y fortaleciendo el sentido de pertenencia hacia los arrecifes (Alvarez-Filip et al., 2019).

Sin embargo, la falta de inclusión comunitaria puede comprometer el éxito de las estrategias, ya que la apatía o la falta de comprensión sobre la importancia de los esfuerzos de conservación puede llevar al incumplimiento de las regulaciones o incluso a actos de vandalismo. Por esta razón, la sensibilización y la educación ambiental deben ser componentes esenciales de cualquier plan de conservación, para asegurar el compromiso y la colaboración activa de la comunidad local (Jackson et al., 2014).

4. Sostenibilidad a largo plazo: una estrategia de conservación debe medir su capacidad para mantenerse funcional frente a amenazas como el cambio climático y la presión humana. Estrategias como el cultivo de corales resistentes al calor tienen un alto potencial en este sentido, ya que preparan a los arrecifes para enfrentar temperaturas oceánicas más altas (Hoegh-Guldberg et al., 2007). En un experimento realizado en la Gran Barrera de Coral, los corales seleccionados por su tolerancia térmica mostraron una tasa de supervivencia significativamente mayor durante eventos de estrés térmico extremo (Gattuso et al., 2015).

En el contexto del Caribe colombiano, donde los efectos del cambio climático son cada vez más evidentes, las estrategias que combinan tecnologías innovadoras con prácticas de manejo adaptativo son fundamentales para garantizar la resiliencia de los arrecifes (INVEMAR, 2021).

A partir de los criterios mencionados, se clasifican las estrategias en tres categorías:

- Alta eficiencia: Estrategias que cumplen con todos los criterios. Ejemplo: Restauración activa con viveros y participación comunitaria (Costa Rica).
- Moderada eficiencia: Estrategias que cumplen con la mayoría de los criterios, pero enfrentan limitaciones técnicas o económicas. Ejemplo: Monitoreo avanzado con herramientas tecnológicas.

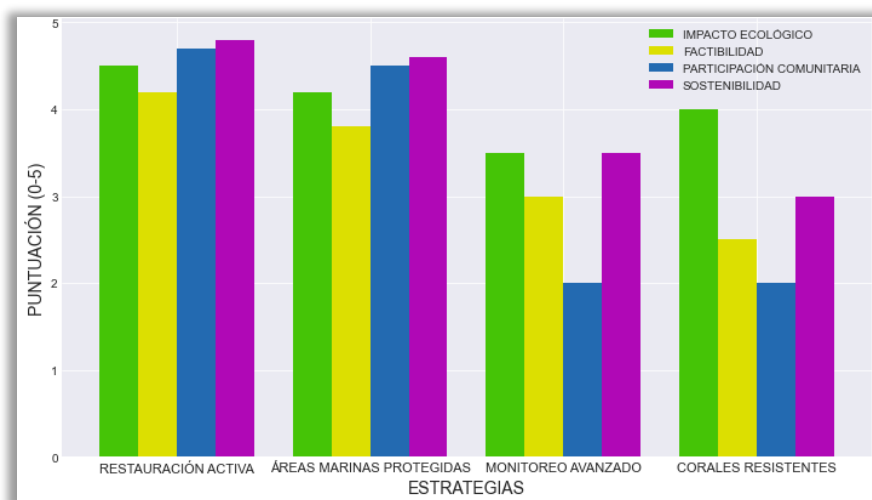
- **Baja eficiencia:** Estrategias con bajo impacto ecológico o falta de viabilidad en el contexto local. Ejemplo: Investigación de corales resistentes sin integración comunitaria.

San Andrés y Providencia es un caso único, ya que combina una alta dependencia económica de los arrecifes con limitaciones en recursos financieros y técnicos. Por ello, es fundamental priorizar estrategias que sean tanto efectivas como accesibles. La restauración activa, combinada con AMP bien gestionadas, podría ser una solución viable para esta región, especialmente si se integra la participación comunitaria y el apoyo de organizaciones internacionales (Coralina, 2023).

Además, las estrategias deben adaptarse a las características específicas del archipiélago, como la presencia de especies endémicas y la vulnerabilidad a fenómenos climáticos extremos como huracanes y el blanqueamiento masivo (Jackson et al., 2014). Esto subraya la necesidad de enfoques flexibles que combinen conocimientos científicos con las necesidades y perspectivas locales.

Figura 10

Eficiencia de estrategias de conservación en San Andrés y Providencia.



Fuente: Basado en Frontiers (2019), Coralina (2023), y NOAA (2021). Elaborado en el software de Python.

En este gráfico de barras agrupadas se evalúan las estrategias en función de los criterios: Impacto ecológico, factibilidad técnica/económica, participación comunitaria y sostenibilidad, cada barra representa el puntaje promedio (en una escala de 0 a 5) asignado a cada criterio para las cuatro estrategias: Restauración activa, áreas marinas protegidas, monitoreo avanzado e investigación de corales resistentes. Como resultado, las estrategias de restauración activa y áreas marinas protegidas obtuvieron las puntuaciones más altas en casi todos los criterios.

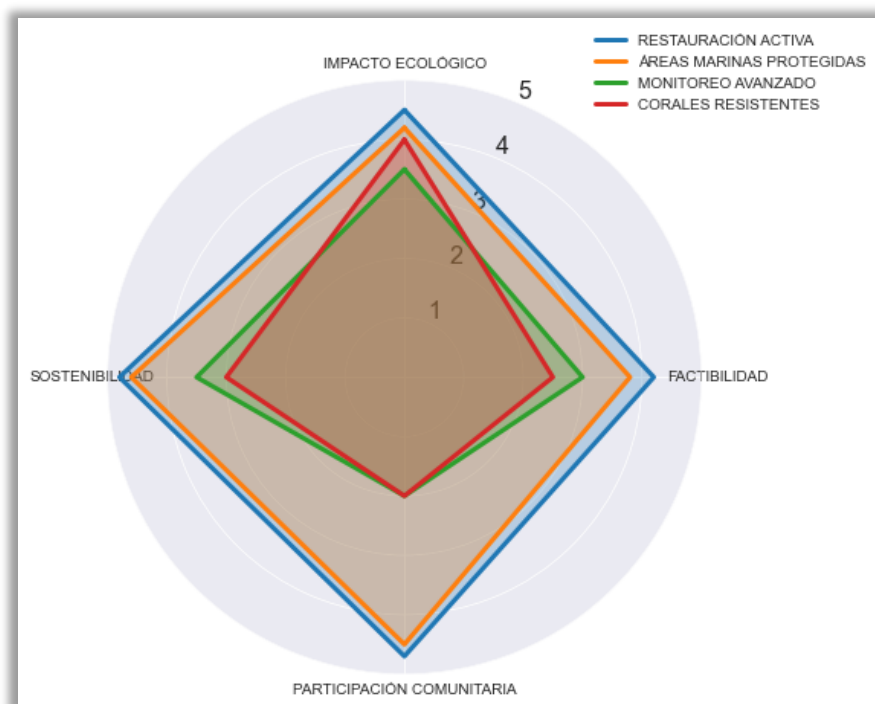
Luego se analiza la relevancia local de cada una de las propuestas con la ayuda de los criterios de evaluación para determinar si la estrategia es adecuada para las condiciones específicas de San Andrés y Providencia, considerando su contexto ambiental, social y económico.

La combinación de restauración activa, áreas marinas protegidas y participación comunitaria ha mostrado resultados prometedores en contextos similares al del Caribe colombiano. Estas estrategias son aplicables a San Andrés y Providencia, donde los esfuerzos deben centrarse en reducir las presiones humanas locales (como la pesca y el turismo no regulado) y fortalecer la resiliencia de los arrecifes frente al cambio climático (Coralina, 2023).

Mediante la realización de un diagrama de radar se evidencia la priorización de estrategias según criterios, allí se muestra la comparación de las estrategias en función de los mismos criterios. Cada estrategia está representada por una línea, permitiendo visualizar rápidamente cuál de ellas tiene mejor desempeño en cada criterio.

Figura 11

Priorización de estrategias según criterios de relevancia local.



Fuente: Basado en Frontiers (2019), Coralina (2023), y NOAA (2021). Elaborado en el software de Python.

Las estrategias de restauración activa y las áreas marinas protegidas abarcan una mayor extensión en el radar, lo que sugiere que son las más completas en términos de eficiencia y relevancia local. Por otro lado, la investigación sobre corales resistentes ha revelado algunas limitaciones en cuanto a la factibilidad técnica y la participación comunitaria, lo que podría restringir su implementación a gran escala.

CONCLUSIONES

- La temperatura es un parámetro esencial para analizar la salud de los arrecifes coralinos, ya que conecta fenómenos climáticos globales con los impactos locales. La interacción entre la temperatura ambiente y las corrientes oceánicas, combinada con actividades humanas, crea un panorama complejo de estrés térmico para los arrecifes del Caribe colombiano. Comprender estas relaciones es crucial para desarrollar estrategias de mitigación y conservación efectivas.
- Esta monografía ha permitido realizar un análisis profundo sobre el impacto del aumento de la temperatura oceánica en los arrecifes coralinos del archipiélago de San Andrés y Providencia en las últimas dos décadas. A través de una revisión de datos históricos, un diagnóstico actualizado del estado de los ecosistemas y una evaluación de sus repercusiones socioeconómicas, se han identificado hallazgos clave que evidencian la necesidad de tomar medidas urgentes. El uso de mapas de calor de correlación permite interpretar visualmente y de forma accesible las relaciones entre variables. En este caso, se confirma una relación positiva entre el paso del tiempo y el incremento de temperaturas, y entre las temperaturas y los eventos de blanqueamiento de corales, lo cual refuerza las observaciones de que el cambio climático impacta significativamente en los ecosistemas marinos.
- El aumento sostenido de la temperatura del océano en la región, con registros de hasta 32°C en enero de 2024, ha exacerbado los episodios de blanqueamiento coralino, un fenómeno que afecta gravemente la capacidad de los corales para sobrevivir. Esta tendencia de calentamiento está directamente relacionada con la disminución de la cobertura coralina, la cual ha caído un 50% desde el año 2000. Además, los arrecifes

han perdido biodiversidad y resiliencia, lo que pone en peligro especies clave como *Acropora palmata* y *Montastraea annularis* (NOAA, 2021; Coralina, 2023).

- El análisis de los cambios en la estructura y biodiversidad de los arrecifes coralinos en San Andrés y Providencia revela un deterioro alarmante que pone en riesgo la funcionalidad de estos ecosistemas. Los corales, que en condiciones naturales mantienen una dinámica equilibrada entre crecimiento, reproducción y resiliencia, se han visto vulnerados por el aumento de la temperatura oceánica, enfermedades emergentes y fenómenos climáticos extremos.
- La pérdida de especies clave como *Acropora palmata* y *Montastraea annularis* no solo afecta la biodiversidad, sino también la capacidad de los arrecifes para proporcionar servicios ecosistémicos esenciales, como la protección costera y el apoyo a las actividades económicas locales. Es evidente que la combinación de presión del cambio climático y las actividades humanas está llevando a estos ecosistemas a un punto crítico, donde su capacidad de recuperación es cada vez más limitada. Por lo tanto, es imperativo fortalecer las estrategias de conservación y restauración, adoptando enfoques basados en la ciencia y en la gestión local que aborden tanto las causas inmediatas como las subyacentes del deterioro. Solo así será posible garantizar la supervivencia y funcionalidad de estos ecosistemas en un contexto de cambio climático acelerado.
- El deterioro de los arrecifes no solo afecta los ecosistemas, sino que también tiene un fuerte impacto en la economía local. La reducción del 30% en los ingresos provenientes del turismo basado en actividades marinas y la caída del 40% en la pesca artesanal reflejan la dependencia directa de las comunidades locales del estado de salud de los corales (El Espectador, 2023). La disminución de los servicios ecosistémicos, como la protección costera y la provisión de recursos pesqueros, pone en riesgo la seguridad alimentaria y los medios de vida de muchas familias.

- El análisis resalta la importancia de estrategias que integren conservación y adaptación. Entre las más relevantes se encuentran el establecimiento de áreas marinas protegidas, la promoción del ecoturismo sostenible y la restauración activa mediante viveros de coral. Experiencias exitosas en otras regiones, como la Gran Barrera de Coral en Australia y los viveros en Costa Rica, han demostrado que estos esfuerzos pueden ser efectivos si se aplican junto con políticas de reducción de emisiones y control de amenazas locales (Frontiers, 2019; NOAA, 2021). La sensibilización de las comunidades locales sobre la importancia de los arrecifes y la educación ambiental también son fundamentales para fomentar una mayor participación en la gestión sostenible.
- La situación actual de los arrecifes de San Andrés y Providencia es crítica y ejemplifica las consecuencias del cambio climático global. La preservación de estos ecosistemas vitales requiere una respuesta coordinada entre autoridades locales, investigadores y la comunidad. Sin acciones inmediatas y efectivas, los esfuerzos de restauración coralina serán insuficientes frente a las amenazas globales. Además, la integración de estrategias de mitigación del impacto humano con medidas que promuevan la resiliencia ecosistémica es esencial para garantizar la supervivencia de los arrecifes en las próximas décadas. Solo a través de la colaboración continua y el compromiso se podrá asegurar un futuro sostenible tanto para los ecosistemas como para las personas que dependen de ellos (AIDA, 2019; Coralina, 2023).

Perspectivas futuras

- A lo largo de esta monografía, se ha evidenciado que los arrecifes coralinos de San Andrés y Providencia están en una situación crítica. Sin embargo, este análisis también subraya que, aunque los desafíos son significativos, existen oportunidades reales para revertir el daño si se adoptan enfoques integrados y colaborativos. El cambio climático

es una amenaza global que no puede enfrentarse solo a nivel local; por lo tanto, es crucial combinar las acciones de restauración y conservación con políticas más amplias que reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero.

- Las experiencias exitosas en otras partes del mundo, como Australia y Costa Rica, demuestran que la restauración coralina es posible cuando la ciencia, las comunidades y los gobiernos trabajan de manera coordinada. No obstante, la clave está en fortalecer la resiliencia de los ecosistemas mediante la gestión sostenible de las actividades humanas, como el turismo y la pesca. En este sentido, la creación de incentivos para el ecoturismo y la implementación de áreas marinas protegidas no solo contribuyen a la preservación ambiental, sino que también ofrecen una vía para mantener la economía local activa.
- Esta investigación también ha mostrado que el éxito a largo plazo dependerá de un cambio cultural y social que fomente la participación comunitaria. Es crucial que las comunidades comprendan que su bienestar futuro está intrínsecamente ligado a la salud de los arrecifes. La educación y la sensibilización ambiental son fundamentales para crear una conciencia colectiva sobre la importancia de proteger estos ecosistemas vulnerables.
- En definitiva, los arrecifes coralinos de San Andrés y Providencia no solo son un recurso natural invaluable, sino que también representan un pilar esencial para la vida económica, cultural y ecológica de la región. El camino hacia su preservación exige un esfuerzo conjunto entre instituciones, ciudadanos, científicos y gobiernos, promoviendo acciones inmediatas y sostenibles que aseguren la supervivencia de estos ecosistemas para las generaciones futuras. Adaptarse a las nuevas realidades ambientales dependerá de la voluntad de los actores involucrados para enfrentar esta crisis con determinación y compromiso.

BIBLIOGRAFÍA

Aeby, G. S., et al. (2019). *Emerging coral diseases in a changing environment*. Annual Review of Marine Science, 11, 273-301. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010419-010633>

AIDA. (2019). *Resolución dispone medidas para preservar los corales del Caribe colombiano*. Interamerican Association for Environmental Defense. Recuperado de <https://aida-americas.org>

Alvarez-Filip, L., Estrada-Saldívar, N., & Pérez-Cervantes, E. (2019). *Massive loss of Caribbean corals due to Stony Coral Tissue Loss Disease*. Coral Reefs, 38(4), 729-734. <https://doi.org/10.1007/s00338-019-01883-9>

Babel Banrep. (2024). *Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina: Ecología y sostenibilidad*. Banco de la República.

Baker, A. C., Starger, C. J., McClanahan, T. R., & Glynn, P. W. (2004). *Corals' adaptive response to climate change*. Nature, 430(7001), 741-741. DOI <https://doi.org/10.1038/430741a>

Blanco, J. A., Díaz, J. M., Ramírez, G., & Cortés, M. L. (1994). *El Banco de Las Ánimas: Una amplia formación arrecifal desarrollada sobre un antiguo delta del río Magdalena*. Boletín Ecotrópica, 27, 10-18.

Braun, V., & Clarke, V. (2006). *Using thematic analysis in psychology*. Qualitative Research in Psychology, 3(2), 77-101.

Cai, W., et al. (2021). *The global impacts of ENSO extremes and the role of the ocean.*

Nature Reviews Earth & Environment, 2(6), 382–400.

<https://doi.org/10.1038/s43017-021-00199-z>

Colombia Verde. (2024). *Arrecifes de coral en San Andrés y Providencia.* Recuperado de Colombia Verde.

CORALINA. (2023). *Climate change impacts on coral reefs.* Recuperado de

<https://www.coralina.gov.co/publicaciones/19/nuestro-archipiélago/>

CORALINA. (2023). *Impacto ambiental en el archipiélago de San Andrés y Providencia:*

Informe de biodiversidad. Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago.

CORALINA. (2023). *Informe sobre el estado de los arrecifes en San Andrés y*

Providencia. CORALINA.

CORALINA-INVEMAR. (2012). *Informe sobre la dinámica ambiental del Archipiélago de*

San Andrés, Providencia y Santa Catalina. CORALINA.

Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K.,

Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., & Sutton, P. (1997). *The value of the world's ecosystem services and natural capital.* Nature, 387, 253-260.

D'Angelo, C., & Wiedenmann, J. (2014). *Impacts of nutrient enrichment on coral reefs.*

Current Opinion in Environmental Sustainability, 7, 82-88.

<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.11.029>

- Díaz, J. M., Barrios, L. M., Cendales, M. H., Garzón-Ferreira, J., Geister, J., López-Victoria, M., & Zapata, F. A. (2000). *Áreas coralinas de Colombia*. (Serie Publicaciones Especiales No. 5). INVEMAR.
- ECPA. (2021). *Erosión costera en el Caribe: Retos y estrategias de mitigación*. Energy & Climate Partnership of the Americas.
- Edwards, A. J., & Gomez, E. D. (2007). *Reef restoration concepts and guidelines: making sensible management choices in the face of uncertainty*. Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program.
- El Espectador. (2023). *Ecotourism and coral restoration in Costa Rica*. Recuperado de <https://elespectador.com>
- El Espectador. (2023). *El reto de salvar los arrecifes de coral en San Andrés y Providencia*. Recuperado de <https://elespectador.com>
- Environmental Protection Agency (EPA). (2022). *Hurricane impact on coastal ecosystems*. Recuperado de <https://epa.gov>
- Etter, A., Andrade, A., Saavedra, K., Amaya, P., & Arévalo, P. (2017). *Estado de los Ecosistemas Colombianos: una aplicación de la metodología de la Lista Roja de Ecosistemas (Versión 2.0)*. Pontificia Universidad Javeriana y Conservación Internacional-Colombia.
- Fajardo, O. J., & Lonin, S. (2021). *Dinámica costera en la barrera arrecifal localizada en el sector nororiental de la isla de San Andrés Caribe colombiano*. *Boletín científico CIOH*, 40(2), 13-31. DOI: 10.26640/22159045.2021.525

Frontiers in Marine Science. (2019). *Coral Reef Restoration in a Changing World: Science-based Solutions*. Recuperado de <https://www.frontiersin.org>

Frontiers. (2021). *Global warming and coral reef degradation*. Recuperado de <https://www.frontiersin.org>

Gattuso, J.-P., Hoegh-Guldberg, O., & Pörtner, H. O. (2015). *Cross-chapter box on coral reefs*. In C. B. Field et al. (Eds.). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability* (pp. 97-100). Cambridge University Press.

Gattuso, J.-P., Hoegh-Guldberg, O., & Pörtner, H. O. (2015). *Cross-chapter box on coral reefs*. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability* (pp. 97-100). Cambridge University Press.

Goddard, L., et al. (2001). *The role of the ocean in climate variability and the ENSO*. *Nature*, 410(6837), 30-33. <https://doi.org/10.1038/35065004>

Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P. J., Hooten, A. J., Steneck, R. S., Greenfield, P., Gomez, E., & Knowlton, N. (2007). *Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification*. *Science*, 318(5857), 1737-1742. DOI <https://doi.org/10.1126/science.1152509>

Hoegh-Guldberg, O., Poloczanska, E. S., Skirving, W., & Dove, S. (2017). *Coral reef ecosystems under climate change and ocean acidification*. *Frontiers in Marine Science*, 4(158). <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00158>

Hughes, T. P., Anderson, K. D., et al. (2018). *Spatial and temporal patterns of mass bleaching of corals in the Anthropocene*. *Science*, 359(6371), 80-83.

<https://doi.org/10.1126/science.aan8048>

Hughes, T. P., Kerry, J. T., et al. (2017). *Global warming and recurrent mass bleaching of corals*. *Nature*, 543(7645), 373-377. <https://doi.org/10.1038/nature21707>

IDEAM. (2024, enero 15). *Reporte de temperatura oceánica en el Caribe colombiano*.

IDEAM. <https://www.ideam.gov.co/>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2022). *Cambios climáticos recientes en el Caribe colombiano*. Bogotá, Colombia.

Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras [INVEMAR]. (2023). *Informe anual sobre cambio climático y biodiversidad marina*. Santa Marta, Colombia.

INVEMAR. (2021). *Estado de los arrecifes de coral en Colombia*. Informe técnico.

Santa Marta. INVEMAR. <https://www.invemar.org.co/>

INVEMAR. (2021). *Informe sobre la salud de los arrecifes coralinos en el Caribe colombiano*. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras.

IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC. (2021). *Sixth Assessment Report*. Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático.

IUCN. (2017). *Ocean warming: Issues brief*. International Union for Conservation of Nature. Recuperado de <https://www.iucn.org>

Jackson, J. B. C., Donovan, M. K., Cramer, K. L., & Lam, V. V. (2014). *Status and trends of Caribbean coral reefs: 1970–2012*. Global Coral Reef Monitoring Network.

<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36669.33762>

Krippendorff, K. (2018). *Content analysis: An introduction to its methodology*. Sage Publications

Langlois, T. J., et al. (2012). *Relationships between fishing effort and fish populations: Insights from fisheries in Western Australia*. *Frontiers in Marine Science*, 9(2).

DOI:10.3389/fmars.2012.00289

Mason, J. et al. (2018). *Innovative monitoring techniques for coral reef restoration*.

Marine Ecology Progress Series, 586, 135-144.

<https://doi.org/10.3354/meps12345>

McPhaden, M. J., et al. (2006). *ENSO as an integrating concept in climate studies*.

Oceanography, 19(4), 56-68.

McPhaden, M. J., et al. (2006). *The oceanic Nino index: El Niño and La Niña*.

Geophysical Research Letters, 33(14), L14609.

<https://doi.org/10.1029/2006GL026969>

Meiling, S. S., et al. (2021). *Stony Coral Tissue Loss Disease: A global threat to coral reefs*. *Frontiers in Marine Science*, 8, 1-12.

<https://doi.org/10.3389/fmars.2021.655905>

- Meyer, J. L., et al. (2019). *Bacterial pathogens of corals: Microbial associates of diseased tissues*. *Frontiers in Microbiology*, 10, 1-16.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01460>
- Moberg, F., & Folke, C. (1999). *Ecological goods and services of coral reef ecosystems*. *Ecological Economics*, 29(2), 215-233. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00009-9](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00009-9)
- NASA. (2016). *Otto (TD16 – Atlantic Ocean)*. Recuperado de <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2016/td16-atlantic-ocean>
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2021). *Solutions for Coral Reefs: Restoration*. Recuperado de <https://coralreef.noaa.gov>
- NOAA. (2020). *Coral reefs: Impacts of El Niño and La Niña*. National Oceanic and Atmospheric Administration. Retrieved from <https://www.noaa.gov>
- NOAA. (2020). *Hurricane Iota: Damage assessment and environmental impact*. Recuperado de <https://noaa.gov>
- NOAA. (2020). *Hurricane Iota's impact on Caribbean ecosystems*. National Oceanic and Atmospheric Administration.
- NOAA. (2021). *Coral Reef Conservation Program Annual Report*. National Oceanic and Atmospheric Administration.
- NOAA. (2021). *Coral reef restoration: Methods and success stories*. Recuperado de <https://www.noaa.gov>

- NOAA. (2022). *Global Ocean Temperature Time Series*. National Oceanic and Atmospheric Administration. Recuperado de <https://www.noaa.gov>
- Observatorio Coralina. (2024). *Impacto ambiental y gestión de la biodiversidad en Seaflower*.
- Philander, S. G. (1990). *El Niño and the Southern Oscillation: A study of tropical climate variability*. Academic Press.
- Precht, W. F., et al. (2016). *The coral disease SCTL D in Florida and the Caribbean*. Marine Ecology Progress Series, 569, 125-136.
<https://doi.org/10.3354/meps12032>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2023). *The ocean is hotter than ever. Here's why*. UNEP. Recuperado de <https://www.unep.org>
- Shilling, E. N., et al. (2021). *The efficacy of antibiotics in managing SCTL D*. Coral Reefs, 40(3), 719-730. <https://doi.org/10.1007/s00338-021-02088-3>
- Smale, D. A., et al. (2012). *Climate-driven changes in the distribution of marine organisms*. Global Change Biology, 18(1), 123-135.
- Spalding, M. D., Ravilious, C., & Green, E. P. (2017). *World atlas of coral reefs*. University of California Press.
- UNEP. (2020). *Impacto del cambio climático en los arrecifes coralinos*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- UNEP. (2020). *Marine and Coastal Ecosystem Services*. United Nations Environment Programme.

UNEP. (2023). *Marine ecosystems under threat: Impacts of climate variability*. United Nations Environment Programme.

Veron, J. E. N., et al. (2009). *The coral reef crisis: The critical importance of <350 ppm CO₂*. *Marine Pollution Bulletin*, 58(10), 1428–1436.

<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.09.009>

Wang, C., et al. (2017). *El Niño and La Niña: Impacts and forecasts*. *Nature Geoscience*, 10(1), 4-13. <https://doi.org/10.1038/ngeo2850>

Wilkinson, C. (2008). *Status of the coral reefs of the world: 2008*. Global Coral Reef Monitoring Network.