

Interacciones físico-biológicas en arrecifes de coral: perspectivas desde la dinámica de fluidos.**Physical-biological interactions in coral reefs: perspectives from fluid dynamics.**

Cedeño Vera Nallely Alexandra, Lucas Moreira Allan Josue, López García Maholy Michelle, Cevallos Sabando Miguel Andrés, Macias Barberán José Ricardo

**CIENCIA E INNOVACIÓN EN
DIVERSAS DISCIPLINAS
CIENTÍFICAS.**

**Julio - Diciembre, Vº5-
Nº2; 2024**

- ✓ **Recibido:** 02/08/2024
- ✓ **Aceptado:** 14/08/2024
- ✓ **Publicado:** 31/12/2024

PAIS

- Ecuador.
- Ecuador.
- Ecuador.
- Ecuador.
- Ecuador.

INSTITUCIÓN:

- Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Manabí.
- Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Manabí.
- Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Manabí.
- Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Manabí.
- Universidad Técnica de Manabí, Ecuador.

CORREO:

- nacedeno@pucesm.edu.ec
- ajlucasm@pucesm.edu.ec
- mmlopezg@pucesm.edu.ec
- macevalloss@pucesm.edu.ec
- jose.macias@utm.edu.ec

ORCID:

- <https://orcid.org/0009-0008-2597-0878>
- <https://orcid.org/0009-0004-5879-2343>
- <https://orcid.org/0009-0007-9742-1387>
- <https://orcid.org/0009-0001-3123-186X>
- <https://orcid.org/0000-0002-2857-6867>

FORMATO DE CITA APA.

Cedeño, N. Allan, L. López, M. Cevallos, M. Macias, J. (2024). *Interacciones físico-biológicas en arrecifes de coral: perspectivas desde la dinámica de fluidos*. G-ner@ndo, Vº5 (Nº2), 486 – 512.

Resumen

El artículo analiza el impacto de la hidrodinámica en la estructura de los arrecifes de coral. La investigación cubre tanto los principios fundamentales de la formación de arrecifes y su relevancia ecológica como los efectos específicos de la hidrodinámica sobre las propiedades físicas de los arrecifes. La distribución, la forma y la salud de los corales se investigan mediante las corrientes, las olas y otros movimientos del agua. Se presentan estudios de casos que muestran estos eventos en diferentes partes del mundo, donde se destacan los arrecifes de coral y los efectos de los hallazgos en la conservación y la gestión, enfatizando la importancia de las medidas de adaptación para contrarrestar el cambio climático y otros peligros de causas naturales y humanas. Dependiendo de las relaciones entre ellos y con otros organismos, como la competencia, la depredación, o con factores abióticos, como la fuerza, la dirección de las corrientes y olas, estas acciones pueden ser beneficios o perjudicial afectando el estado del ecosistema de coral, la capacidad de los arrecifes para recuperarse y la resiliencia a eventos extremos, como huracanes, son una función directa de estos procesos hidrodinámicos. Estos procesos, así como otros factores que influyen en ellos, como erosión y sedimentación o cambios en la temperatura global, influyen mucho al ecosistema de coral. La hidrodinámica, por otro lado, es vital para la reproducción y la diversidad genética; influyen en la dispersión de larvas y gametos.

Palabras Claves: Hidrodinámica, Morfología, Conservación.

Abstract.

The article analyzes the impact of hydrodynamics on the structure of coral reefs. The research covers both the fundamental principles of reef formation and its ecological relevance and the specific effects of hydrodynamics on the physical properties of reefs. Distribution, the shape and health of corals are investigated using currents, waves and other water movements. Case studies are presented showing these events in different parts of the world, highlighting coral reefs and the effects of the findings on conservation and management, emphasizing the importance of adaptation measures to counteract climate change and other dangers from natural and human causes. Depending on the relationships between them and with other organisms, such as competition, predation, or with abiotic factors, such as the force, direction of currents and waves, these actions can be beneficial or detrimental, affecting the state of the coral ecosystem, the ability of reefs to recover and resilience to extreme events, such as hurricanes, are a direct function of these hydrodynamic processes. These processes, as well as other factors that influence them, such as erosion and sedimentation or changes in global temperature, greatly influence the coral ecosystem. Hydrodynamics, on the other hand, is vital for reproduction and genetic diversity; They influence the dispersal of larvae and gametes.

Keywords: Hydrodynamics, Morphology, Conservation.

Introducción

Los arrecifes de coral son como las selvas tropicales del mar y son ecosistemas marinos intrincados y diversos que son esenciales para la salud de los océanos. Los corales formadores de arrecifes están influenciados por factores bióticos y abióticos que impactan su estructura, función y resiliencia. La calidad del agua, la salinidad, la luz solar y otros factores abióticos son importantes, mientras que los factores bióticos incluyen depredadores, competidores y simbiosis. Los arrecifes de coral son sensibles a los cambios ambientales y a la actividad humana, y la interacción entre estos factores hace que los arrecifes de coral sean muy sensibles.

La dinámica de fluidos es una rama de la física que se centra en el movimiento de líquidos y brinda una perspectiva única sobre las interacciones físico-bioquímicas en los arrecifes de coral. Los arrecifes no sólo están formados por las corrientes oceánicas, las olas y las mareas, sino también por factores bióticos como nutrientes, dispersión de larvas y sedimentación. El crecimiento, la reproducción y la resiliencia del arrecife frente a eventos extremos como los huracanes están directamente relacionados con los procesos hidrodinámicos que afectan su morfología.

Esta revisión examinará los diversos efectos de la hidrodinámica sobre la estructura y función de los arrecifes de coral. El estudio analizará las interacciones de los corales con otras criaturas marinas, la erosión, la sedimentación, la contaminación y el cambio climático. Se centrará en la importancia de comprender y gestionar estos ecosistemas vulnerables, que son fundamentales para la vida silvestre marina, la protección costera y la preservación de la vida silvestre marina.

Método y materiales

Se realizó una revisión exhaustiva literario y bibliográfico que examinó la influencia de los factores bióticos y abióticos en los arrecifes de coral y la influencia de la hidrodinámica en su morfología. Los arrecifes de coral están influenciados por una variedad de factores biológicos, depredadores, competidores y simbioses, y factores abióticos, como la temperatura, la salinidad, la luz y la calidad del suelo, según la información recopilada de una variedad de artículos y revistas científicas. La sustancia que se está discutiendo es el agua. Los arrecifes están formados por procesos naturales que transportan larvas y obtienen nutrientes, y el movimiento de las corrientes oceánicas, olas y mareas afectan a los arrecifes, provocando que sean moldeados por procesos naturales que permiten el transporte de larvas y la adquisición de nutrientes, mientras que las variaciones en la intensidad y dirección de estas fuerzas pueden intensificar la sedimentación y la erosión. El aumento del nivel del mar y el calentamiento del agua exacerban los efectos del cambio climático en la estructura y estabilidad de los arrecifes.

Resultados y discusión.

Los arrecifes de coral se ven afectados por una serie de factores bióticos y abióticos. Los factores biológicos incluyen la presencia de depredadores, competidores y simbioses, mientras que los factores abióticos incluyen la temperatura del agua, la salinidad, la luz y la calidad del agua. Estos factores interactúan para determinar la salud y la productividad de los arrecifes de coral. Varios factores bióticos y abióticos influyen en la formación y desarrollo de los arrecifes de coral.

En cuanto a los factores abióticos, la temperatura del agua es el más importante. Los arrecifes de coral crecen en aguas cálidas entre 20 y 30 grados centígrados. Por debajo de los 18 grados, los corales comienzan a desvanecerse y pueden morir. La luz del sol es otro factor importante, ya que los corales necesitan luz para la fotosíntesis y para obtener los nutrientes

que necesitan para crecer. El pH del agua también es un factor abiótico importante para los arrecifes de coral. Si el pH del agua es demasiado bajo, los corales no pueden formar esqueletos, lo que provoca que se debiliten e incluso mueran. La salinidad del agua es otro factor importante porque los corales necesitan agua con cierta salinidad para sobrevivir (Montero, s.f).

Otro factor abiótico que afecta el desarrollo de los arrecifes de coral es la calidad del agua. Los corales necesitan agua limpia y clara para crecer y desarrollarse adecuadamente. Los sedimentos, la contaminación y la sobrepesca pueden afectar negativamente la calidad del agua, por lo que una de las fuentes de vida más importantes para los arrecifes de coral son los organismos que viven en ellos. Los corales, las algas y los peces son los más importantes (Montero, s.f).

Los corales, por ejemplo, forman arrecifes de coral que, a su vez, proporcionan refugio y alimento a muchas especies. En el caso de las algas, son las principales productoras de oxígeno y nutrientes que permiten la supervivencia de otros organismos. Los peces son los principales depredadores y son responsables de mantener el equilibrio del ecosistema. Además, la biodiversidad de los arrecifes de coral es vital para su salud. La presencia de muchas especies diferentes garantiza una mayor estabilidad y resistencia a posibles cambios ambientales. La pérdida de una especie puede provocar varios efectos negativos en el ecosistema, como la proliferación de algas, que pueden provocar la asfixia y la muerte de los corales (EPA, 2024)

Interacciones biológicas.

Las comunidades de arrecifes de coral tienen muchas interacciones bióticas que afectan la salud y el estado físico de los corales, incluida la competencia, la herbívora y la depredación. Debido a que el principal recurso limitante de los arrecifes de coral es el espacio físico, y debido a que los corales son organismos sésiles, compiten con muchos otros organismos bentónicos,

incluidos otros corales, algas, esponjas, corales acuáticos (o de fuego) y corales blandos. A medida que las perturbaciones en los arrecifes de coral han aumentado en las últimas décadas, la competencia entre corales y algas se ha vuelto cada vez más común. Poblaciones sanas y diversas de herbívoros son esenciales para regular la competencia entre corales y algas. En particular, los peces herbívoros desempeñan un papel importante en la resiliencia de los arrecifes de coral al dejar espacio para el reclutamiento de corales y reducir la presión sobre las colonias de coral existentes (The Nature Conservancy, 2016).

Los organismos que se alimentan de corales se llaman coralívoros y se alimentan de tejido, moco y esqueleto de coral. Incluye casi todos los taxones de peces e invertebrados, incluidos peces, caracoles, gusanos y cangrejos. El daño al tejido o esqueleto del coral requiere tiempo y energía para que el coral se regenere y se recupere, lo que resulta en un crecimiento más lento del coral.

Interacciones físicas.

Las interacciones físicas en los arrecifes de coral son variadas y continuas. La estructura de los arrecifes de coral sigue siendo influenciada por las olas, las corrientes y la sedimentación, que producen corales de diversas formas y tamaños. La distribución de los organismos también es influenciada por estas fuerzas físicas; algunos prefieren aguas tranquilas, mientras que otros prefieren zonas abiertas. Además, la supervivencia de los corales depende de las interacciones físicas con otros organismos. Por ejemplo, los corales compiten por la luz y el espacio, y las tormentas pueden dañar significativamente las colonias de coral. El cambio climático está empeorando las interacciones físicas en estos ecosistemas, según la investigación realizada en los últimos años sobre los arrecifes de coral. Los esqueletos de los corales se ven menos resistentes a las olas y las tormentas cuando la temperatura y la acidificación de los océanos aumentan. La distribución de los organismos y la producción de sedimentos de los arrecifes de coral también pueden verse afectadas por el aumento del nivel del mar.

Impacto de la Hidrodinámica en la Morfología del Arrecife de Coral.

Hidrodinámica. Se centra principalmente en fluidos incompresibles, es decir, líquidos; Para ello se toman en cuenta factores como la velocidad, la presión, el flujo y el costo. (Perdigón, 2024). Las fuerzas naturales, en particular las corrientes marinas, las olas y las mareas, crean los arrecifes de coral, que son jardines submarinos verdes. Además de trasladar larvas y nutrientes esenciales al arrecife, estos movimientos del agua alteran su estructura y forma. La erosión y la deposición de los arrecifes se aceleran debido a las fluctuaciones en la fuerza y dirección de las corrientes, así como el aumento de eventos extremos como los huracanes; estudios recientes (2019-2024) han demostrado que esto altera significativamente su morfología.

El aumento del nivel del mar cambia los patrones de las olas y las corrientes costeras, lo que a su vez afecta la distribución de los sedimentos y la estabilidad de las estructuras coralinas. Además, el estrés por calor causado por el calentamiento del agua de mar debilita los esqueletos de coral, haciéndolos más vulnerables a la erosión de las olas. El calentamiento excesivo del agua obliga a los corales a excretar las coloridas algas que les proporcionan alimento. A medida que continúen las temperaturas cálidas, los corales morirán y los arrecifes se degradarán. Algunos estudios científicos demuestran que esta epidemia afecta a todas las especies de coral (Oceana Europe,s.f).

Interacción entre Corales y Otros Organismos Marinos.

Las fuerzas hidrodinámicas tienen un impacto significativo en la competencia por el espacio entre los corales y los otros organismos marinos, como las algas y los hongos. Las corrientes fuertes traen consigo las especies de coral más fuertes y resistentes, mientras que las corrientes más suaves fomentan el crecimiento de algas que compitan con los corales por la luz y los nutrientes vitales y adquieran la mayoría de las veces. Además, las fuerzas hidrodinámicas son esenciales para la relación simbiótica entre corales y zooxantelas. En

particular, el flujo de agua adecuado facilita el suministro de gases y nutrientes entre los organismos, favoreciendo la fotosíntesis y el crecimiento del coral. Sin embargo, la cantidad excesiva o insuficiente de flujo puede dañar estas relaciones y perjudicar la salud y la estructura del arrecife.

Erosión y Sedimentación en Arrecifes de Coral.

Erosión. La erosión es un factor que daña a los corales, se refiere al proceso mediante el cual los factores naturales desplazan el suelo y las rocas, influenciados por el agua, el viento y el hielo. Los sedimentos cubren los arrecifes y los asfixian, al igual que la luz solar que necesitan las zooxantelas (alga simbiótica del coral) para fotosintetizarse.

La erosión del suelo provoca sedimentación, lo que provoca el deterioro de los arrecifes de coral. Todos los corales pueden soportar una cierta cantidad de sedimentación. Sus tentáculos se mueven para barrer partículas no comestibles y tragar la comida que atrapa (Esteves Amador y de León, 2019).

Estos sedimentos pueden encerrar arrecifes de coral en grandes plataformas de sedimentos alejadas del arrecife y formar importantes reservorios de sedimentos. Además, los sedimentos también están suspendidos en la columna de agua encima y cerca del arrecife, así como en el bento del propio arrecife; estas dos áreas también forman depósitos de sedimentos. Estos embalses están estrechamente vinculados por una serie de procesos físicos y biológicos que mueven sedimentos entre ellos.

Además, el aumento del aporte de sedimentos a los arrecifes de coral puede tener un efecto dominó en todo el sistema de arrecifes, afectando a los organismos pelágicos y bentónicos y a procesos clave que a su vez afectan el funcionamiento del ecosistema de los arrecifes.

Esta comprensión parece particularmente importante dado que los arrecifes de coral del Antropoceno enfrentan múltiples amenazas y pueden alterar las interacciones arrecife/sedimento. Algunos ejemplos incluyen una mayor entrada de sedimentos terrígenos, el blanqueamiento de corales inducido por el clima que reduce la complejidad estructural de los arrecifes de coral, ciclones más intensos y la sobrepesca de importantes especies de peces que causa bioerosión.

Influencia de la contaminación de los Asentamientos humanos sobre los Arrecifes de Coral.

La actividad que causa tanta contaminación son los desechos humanos arrojados desde los barcos. Por otro lado, las emisiones de sustancias inflamables como los vertederos y los combustibles son fuentes importantes de contaminación. Los daños causados por el fondeo y empuje de embarcaciones marinas se pueden observar en los arrecifes de coral, provocando daños permanentes en estas estructuras, principalmente en las zonas de pesca (Montero, 2022). El daño a los tejidos reproductivos de estos corales debido al combustible también afecta a las zooxantelas, ya que estas zooxantelas no producen nuevos corales cuando están deprimidas, lo que hace que el arrecife sea extremadamente menos resistente y los obliga a trasladarse a otros arrecifes.

Turbulencia y Captura de Nutrientes por Corales y otros Organismos.

Los arrecifes de coral son uno de los ecosistemas más diversos de la Tierra. Desempeñan un papel importante en la protección de las costas contra los daños causados por las olas, proporcionan zonas de reproducción para muchas especies de peces marinos y son una importante fuente de alimento en los países en desarrollo. Además, los arrecifes de coral son reactores biogeoquímicos y el alto metabolismo de las comunidades bentónicas transforma y recicla carbono, nitrógeno y otros nutrientes de la cadena alimentaria marina. Las interacciones químicas y físicas entre los arrecifes de coral y el agua de mar circundante están

controladas por el flujo: a gran escala con mareas, corrientes de mesoescala y olas, y a pequeña escala con turbulencia.

El forzamiento oceánico determina los patrones de circulación regional y el transporte horizontal de masas de agua de diferentes propiedades a los arrecifes de coral, controla las condiciones ambientales y la distribución de las larvas de los arrecifes de coral y, por lo tanto, determina la distribución biogeográfica de los arrecifes de coral. Sin embargo, la mezcla turbulenta controla el acoplamiento vertical entre el lecho y el agua suprayacente, lo que determina el transporte vertical de calor, alimentos, contaminantes, patógenos, larvas y nutrientes

Absorción de nutrientes en los corales.

Muchos animales forman relaciones nutricionales simbióticas con microorganismos que son esenciales para su supervivencia. Los corales simbióticos se encuentran entre los pocos animales que pueden prosperar en condiciones de escasez de nutrientes debido a su asociación con dinoflagelados del género *Symbiodinium*. Los yodos simbioses son autótrofos que transfieren la mayor parte del carbono (C) obtenido a través de la fotosíntesis y otros nutrientes esenciales como el nitrógeno (N) y el fósforo (P) absorbidos de fuentes inorgánicas al huésped para sus necesidades energéticas. para el medio ambiente o reciclado de residuos de coral. Por otro lado, los corales huéspedes también son heterótrofos y se alimentan de una variedad de organismos que van desde bacterias hasta grandes zoopláctones. La simbiosis coral-dinoflagelados es un sistema altamente sensible y cada vez más vulnerable a las perturbaciones humanas.

En particular, el aumento de las temperaturas de la superficie del mar está asociado con la alteración de los simbioses, lo que resulta en la pérdida de simbioses (blanqueamiento de los corales) y reducciones significativas en la asimilación autótrofa de nutrientes.

Acoplamiento bentónico-pelágico, con énfasis en la turbulencia.

La utilidad del enfoque del mesocosmos radica en su capacidad para explorar y probar mecanismos y establecer relaciones causales. Se ha demostrado que las fuerzas físicas, como la mezcla en ecosistemas experimentales, son importantes en los estudios de meso ecosistemas, y se recomienda cuantificar e informar sobre la mezcla.

La Tabla 1 proporciona ejemplos de los sistemas mesopelágicos presentados en esta revisión, sus ventajas y desventajas, y las funciones de sus sistemas pelágicos, bentónicos o bentónico-pelágicos:

Tabla 1.

Ejemplos de los sistemas mesopelágicos.

Mesocosmos	Pros	Contras
Mesocosmos	Intentos de estudiar los efectos de la mezcla sobre el fitoplancton	Mezcla con disco, burbujas de aire, sistema airlift, sin mezcla.
Mesocosmos bentónico-pelágico	Sedimentos	No se midieron la tensión de mezcla ni la tensión de corte. El entorno de deposición artificial afectó las variables.
Pequeño tanque aislado	Sedimentos, mezcla de WC realista.	Luz limitada. Esfuerzo cortante inferior poco realista. Fondo y WC no bien acoplados.

***Tanque grande aislado,
mezcla excesiva de WC***

La suspensión se puede lograr aumentando la velocidad de agitación.

La tasa de disipación de energía es **demasiado alta**, lo que puede provocar una agregación o desagregación alterada. El fondo y el agua de mar no están bien acoplados.
-Efectos en el ecosistema.

Nota. Adaptado de “Mesocosm approaches to the examination of benthic–pelagic coupling, with emphasis on turbulence,” por Porter, E. T., & Cornwell, J. C. (2023).

Lo nuevo de esta revisión es que sintetiza conexiones bentónico-pelágicas en mesocosmos con foco en la turbulencia, proporciona una visión general de las instalaciones utilizadas a lo largo del tiempo y cómo se estudian los organismos bentónicos en condiciones continuas, así como las posibilidades de mezcla de agua salada. Además, esta revisión proporciona orientación sobre futuros avances científicos y se dedica una sección completa a aplicaciones futuras.

Impactos de la contaminación por nitrógeno en los corales.

Las actividades humanas desde la Revolución Industrial contribuyeron al rápido aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero. El aumento de las temperaturas de la superficie del mar conduce a mayores tasas de blanqueamiento de los corales, que es la expulsión masiva de simbiontes fototróficos (dinoflagelados pertenecientes a la familia Symbiodinium) por parte del coral huésped (Coral Reef Alliance, 2024).

Blanqueo térmico de los corales.

El blanqueo térmico es una respuesta al estrés térmico. Desde el evento global de blanqueamiento masivo de corales de 1983, el primer evento de blanqueamiento masivo asociado con el aumento de las temperaturas de la superficie del mar, la frecuencia y gravedad de los eventos de blanqueamiento masivo han aumentado significativamente.

Dinámica de Fluidos y Dispersión de Larvas, Gametos en Arrecifes de Coral.

Los arrecifes de coral son conocidos como selvas marinas este nombre se la da por su inmensa biodiversidad de planta y animales marinos. Similar a las selvas terrestres estos ecosistemas del mar están formados por organismos pequeños llamados corales estos seres son el hogar de muchos organismos marinos. Su papel en la diversidad global es imprescindible y se manifiesta en varios aspectos como:

- Protección costera.
- Fuente de alimentos.
- Viveros marinos.
- Puntos clave de biodiversidad.

Los corales son invertebrados marinos con las capacidades de formar esqueletos duros de carbonato de calcio (CaCO_3) y, en conjunto con una alta biodiversidad de invertebrados y vertebrados asociados a ellos, forman uno de los ecosistemas más diversos y complejos del planeta. Los sistemas de vida naturales como los corales, pasto marino, manglares etc. son parte fundamental de para que las funciones de un ecosistema estén en equilibrio.

A pesar de ser un pilar para mantener el equilibrio vital en nuestro planeta hemos oído hablar muy poco sobre estos sistemas vitales y su importancia, esta ignorancia colectiva nos a llevado destruir y degradar estas zonas sin conocer la consecuencia que tendrán estas acciones en la costa habitada por nosotros y en el océano del que dependemos directa e indirectamente.

En el caso específico de los corales estos son imprescindibles para conservación de especies. Según el (PNUMA) los arrecifes de coral desempeñan un papel muy importante en los ecosistemas marinos. los corales ofrecen protección a las algas y estas a su vez suministran nutrientes y oxígeno a los corales. Esta simbiosis es fundamental para la formación de arrecifes coralinos, estructuras calcáreas que se desarrollan a lo largo del tiempo a medida que los corales crecen, se dividen y forman colonias (Vásquez y Armas, 2024).

Además, son un refugio para diferentes tipos de especies que desovan sus huevos en esas enormes selvas de cnidarios para proteger su descendencia de depredadores, corrientes marinas etc. Y un lugar seguro para la dispersión de larvas para las larvas y gametos de diferentes especies marinas.

Dispersión.

Al decir dispersión nos estamos refiriendo a las distribuciones de larvas y gametos en el mar esta dispersión se puede ver afectada por cambios oceanográficos como: “La temperatura, el pH, la salinidad, el oxígeno, la radiación ultravioleta, y la turbidez, afectará la supervivencia de las larvas y alterará su comportamiento” (Bashevkin y otros, 2020) Si la distancia de la dispersión es menor puede ser que las poblaciones tengan una mejor diversidad genética. En el caso de las larvas su adaptación es mayor cuando su entorno es el más inadecuado.

La dispersión ayuda a mejorar el intercambio genético entre especies, con diversos resultados incluido el límite de rango de especies y potencia la adaptación local. Es especialmente importante en el contexto del cambio climático, ya que, la adaptación y los cambios de rango pueden resultar esenciales para la persistencia.

Gametos y larvas coralinas.

Los corales tienen una forma única de reproducirse ya que los pueden hacer por desove, reproducción sexual o reproducción asexual. Cuando las condiciones climáticas son las

adecuadas, se produce un evento muy interesante llamado desove. En un periodo de días o semanas, distintas especies de corales liberan células reproductoras masculinas y femeninas en el agua, estas células se les conocen como gametos.

Los gametos se fusionan y fecundan, por lo cual hace que se formen larvas de coral, estas larvas de coral flotan durante varios días o semanas hasta encontrar un lugar solido como piedras u otros corales para adherirse. Como se mencionó anteriormente la forma en la que se dispersan las larvas es muy importante ya que estos garantizan una diversidad genética fuerte, en el caso de los corales tienen una mayor probabilidad de repoblar arrecifes cercanos.

Además del desove los corales tienen diferentes tipos de reproducción como la crianza del coral produce larvas internamente esto hace que tengan más probabilidades de asentarse, luego una vez estén desarrolladas las libera en el mar. Por último, está la reproducción asexual que permite al coral clonarse y fragmentarse para volver a adherirse a otra superficie. Esta forma de reproducción es muy útil, esta modalidad les permite adaptarse a zonas donde los fenómenos meteorológicos son muy volátiles como en el golfo de México en el que son muy comunes los huracanes. En este habitat podemos encontrar especies como corales pétreos que se reproducen de esta forma.

Supervivencia de los gametos coralinos.

Lógicamente, no todos los corales sobreviven cuando se dispersan, y los gametos de los corales suelen ser alimento de diversos tipos de peces, crustáceos, moluscos, etc.

Además, su supervivencia también se ve afectada por condiciones climáticas como los cambios de temperatura. Actualmente existe otro problema que afecta a los corales y su reproducción. Esto se debe a la falta de herbívoros debido a la pesca deliberada, así como al crecimiento excesivo de algas causado por un exceso de nutrientes y bacterias que promueven el crecimiento de algas.

Dinámica de fluidos.

La dinámica de fluidos es una rama importante de la física y la ingeniería es la mecánica de fluidos, estudia cómo se comportan los fluidos (líquidos y gases) tanto en reposo como en movimiento. La materia se utiliza ampliamente en campos como la ingeniería civil, la ingeniería mecánica, la aviación, la meteorología y la medicina. se examinará los conceptos fundamentales de la dinámica de fluidos, su historia, fundamentos, ecuaciones. La mecánica de fluidos tiene varios años de historia. La comprensión de los fluidos mejoró entre los primeros científicos como Arquímedes, en su obra Sobre los cuerpos flotantes.

Antecedentes de las dinámicas de fluidos.

La dinámica de fluidos tiene una historia muy extensa que se remonta a la antigüedad. Los primeros científicos como Arquímedes, realizaron aportes muy importantes para comprender mejor a los fluidos. Arquímedes en su obra sobre los cuerpos flotantes formulo el principio que lleva su nombre que describe la fuerza de la flotación que actúan sobre un objeto sumergido en un fluido. El principio de Arquímedes se refiere a la fuerza de flotación que se produce cuando un objeto se sumerge total o parcialmente en un líquido. La presión del fluido proporciona una fuerza que actúa sobre un objeto perpendicular a su superficie. En otras palabras, la presión en la parte inferior actúa hacia arriba, mientras que la presión en la parte superior actúa hacia abajo lateralmente, creando fuerzas dirigidas hacia el cuerpo (Moebs, Ling, y Sanny, 2021). Este principio físico es fundamental en la hidrostática, una subrama de la mecánica de fluidos que se encarga de estudiar los fluidos en reposo.

La investigación de la dinámica de fluidos continuo en los siglos XVII y XVII con las aportaciones de los científicos Blaise pascal y Daniel Bernoulli formulo la ley que lleva su nombre, por su parte pascal hizo lo mismo. La teoría de pascal estableció que la presión en un fluido de se transmite de manera uniforme en todas las direcciones. Por su parte Bernoulli el

principio de Bernoulli estableció que la velocidad de un fluido con su presión y energía potencial, y es fundamental en la dinámica de fluidos.

Principios fundamentales. Los principios fundamentales en la dinámica de los fluidos pueden separar en dos secciones la estática de fluidos y la dinámica de fluidos. La estática de fluidos se encarga de los fluidos en reposo mientras que la dinámica de fluidos estudia los fluidos en movimiento.

Ecuaciones clave. Aparte del principio de Bernoulli y la ecuación de la continuidad, otras ecuaciones claves en las mecánicas de fluidos incluye la ecuación de Navier-Stokes. Esta ecuación describe el movimiento de los fluidos describe el movimiento de los fluidos viscosos y son fundamentales en la dinámica de fluidos.

Resiliencia de Arrecifes de Coral ante el Cambio Climático: Perspectivas desde la Dinámica de Fluidos.

Para empezar, debemos de definir que es la dinámica de los fluidos y sus principios: La dinámica de fluidos estudia los fluidos en movimiento y es una de las ramas más complejas de la mecánica. Aunque cada gota de fluido cumple con las leyes del movimiento de Newton las ecuaciones que describen el movimiento del fluido pueden ser extremadamente complejas. Dentro de sus principios tenemos la mecánica de fluidos y las ecuaciones de Navier-Stokes.

Mecánica de Fluidos.

La mecánica de fluidos La mecánica de fluidos, como su nombre lo indica, es un área de la mecánica orientada a estudiar a los fluidos. Para lograr su objetivo, utiliza los principios de la mecánica clásica (Noguera, s. f.). En ambientes marinos se enfoca en el estudio del comportamiento del agua en océanos, mares y otras masas de agua.

Las ecuaciones de Navier-Stokes describen el movimiento de los fluidos, incluyendo la influencia de la viscosidad y la presión. Matemáticamente esta ecuación se expresa como:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 u + f$$

En ambientes marinos las ecuaciones de Navier-Stokes, se aplican para modelar fenómenos como las corrientes oceánicas, las olas y la dispersión de contaminantes. Estas ecuaciones nos permiten entender cómo se mueve el agua y cómo interactúan con su entorno.

Arrecifes de coral.

Los arrecifes son estructuras submarinas construidas por corales. Los corales son animales marinos que viven en simbiosis con las algas y construyen su propio esqueleto de carbonato de calcio. Es un hábitat donde abundan multitud de especies animales y vegetales.

Los arrecifes de corales tienen un alto valor biológico debido a su biodiversidad, además de absorber la energía de las olas y ayudar a la erosión de los bordes costeros, ayudan también a proveer los diversos servicios ambientales al hombre. Por una parte, tenemos que, sostienen directamente la pesquería de tipo artesanal, y por otra parte están las diferentes actividades turísticas recreativas, contribuyendo de manera activa al sustento de las personas que habitan las zonas costeras (Rodríguez, y otros, 2022).

Amenazas que enfrentan los Arrecifes de Corales.

Cambios climáticos.

El cambio climático se refiere a cualquier cambio en el clima con el tiempo, debido a la variabilidad natural del sistema climático o como resultado de actividades humanas, actividades como la agricultura, la tala de árboles, la construcción de carreteras, la cría de animales, pueden producir contaminante como sedimentos, fertilizantes y pesticidas que llegan al océano cuando llueve. Los sedimentos depositados en los arrecifes pueden asfixiar a los corales e interferir con su capacidad para alimentarse, crecer y reproducirse. También ocurre la escorrentía que es cuando hay más agua de la que la tierra puede absorber, principalmente causada por el agua de lluvia. Cuando estas aguas llegan cerca del entorno de la costa, causan un daño significativo

a los arrecifes de coral y a otras formas de vida marina. De la misma manera que la sedimentación, la escorrentía bloquea la luz proveniente del sol que los arrecifes necesitan para sobrevivir. Otro efecto del cambio climático es la elevación del nivel del mar, ya que si el mar se eleva demasiado rápido los corales no podrían resistir y morirían. Las variaciones de la temperatura también afectan ya que podrían modificar el clima en las regiones tropicales, aumentando la frecuencia de lluvias, huracanes y tifones, en consecuencia, causan una mayor destrucción en los arrecifes de corales.

Acidificación oceánica.

La acidificación de océanos es el conjunto de reacciones químicas que se producen debido a la absorción de CO₂ dentro del agua. Esto causa un incremento significativo en la cantidad de iones de hidrógeno. Al mismo tiempo, se produce un gran aumento en la acidez del agua, mientras que el número de iones de carbono se reduce de forma considerable (Rodríguez, 2021).

Los efectos de la acidificación oceánica están muy extendidos y van a variar de un animal a otro y de un sistema a otro. Albright (2024) afirma que “Para los corales, un organismo que estudio, la acidificación de los océanos repercute en el crecimiento (calcificación) y la reproducción. Se trata de un problema particular porque cuando una especie o una población se ve perjudicada o dañada, por ejemplo, durante un episodio de blanqueamiento de corales, la reproducción y el crecimiento son dos de los procesos de recuperación más importantes para reconstruir la población” (p. 113).

Blanqueamiento del coral.

El blanqueamiento del coral ocurre cuando los corales se estresan por factores como el aumento de la temperatura del agua o la contaminación. Como resultado, expulsan algas simbióticas microscópicas llamadas zooxantelas, que residen dentro de sus tejidos, y, como resultado, su apariencia exterior se aclara. (ONU, 2020)

Existen también otras causas notables del blanqueamiento de corales, además del cambio climático. En un estudio, el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF, por sus siglas en inglés), expone a las siguientes tres variables como causas relevantes en la generación de la problemática en cuestión:

- Contaminación
- Exceso de luz solar
- Mareas extremadamente bajas

Para la vida silvestre, además, el blanqueamiento de corales podría provocar la extinción de varias especies. Pues estas, al no poderse adaptar a otro hábitat, morirán (Milo, 2023).

Aplicaciones de la Dinámica de Fluidos en la Conservación de Arrecifes.

La dinámica de los fluidos en el estudio de los arrecifes de corales se centra en comprender cómo las corrientes oceánicas, las olas y otros movimientos del agua afectan estos ecosistemas.

Nutrientes y gases. Las corrientes oceánicas y las turbulencias facilitan el intercambio de gases y nutrientes, son vitales para la salud de los corales. En este contexto, la dinámica de los fluidos ayuda a modelar cómo los cambios en las corrientes afectan este intercambio, que es muy importante en condiciones de estrés y acidificación.

Impacto de las Olas y Tormentas. La dinámica de fluidos nos permite predecir los patrones de daño y ayudan a identificar áreas prioritarias para la protección y la restauración de arrecifes.

Restauración de corales.

Método de la jardinería. Es el más común y consta de grupos de pequeños tanques en los que se procesan pequeños cultivos de corales de varias especies, donde existen condiciones óptimas para su desarrollo, donde crecen hasta un límite aceptable para la siembra. Se retiran de las piscinas y se transportan mar adentro para su uso en áreas donde se necesitan. Gracias

al sistema de varios cultivos separados, se puede determinar con relativa facilidad el tipo de coral que se quiere cultivar. También es un sistema más o menos escalable según las necesidades de la región (Brito & Matos, s. f.).

Método de la cuerda. Las colonias de coral se instalan en el mar mediante cuerdas submarinas, donde se controla su crecimiento en condiciones naturales. Se les alimenta cuando es necesario y esto permite retroalimentación a la fauna marina para aprender más sobre la condición de los corales en crecimiento (Brito & Matos, s. f.).

Investigaciones.

Hay estudios en el Laboratorio Experimental de Arrecifes (NOAA) que permite estudiar la resiliencia de los corales a través de mecanismos moleculares. Los investigadores están analizando cómo ciertos genotipos de coral son más capaces de resistir el estrés por calor y cómo las fluctuaciones diarias del pH afectan su crecimiento. Los estudios han demostrado que las temperaturas elevadas hacen que los corales se blanqueen, mientras que la acidificación oceánica reduce la capacidad de los corales para construir sus esqueletos y acelera la tasa de deterioro de los corales por los organismos de bioerodificación (Sarkis, 2017).

En el mismo laboratorio, se estudia también cómo los efectos del cambio climático afectan a las especies de coral que son esenciales para la formación de arrecifes. Utilizan el brazo robótico de código abierto para estudiar estas interacciones. Al final, el estudio descubrió una mayor probabilidad de transmisión de enfermedades y mortalidad entre los fragmentos de coral expuestos a temperaturas más bajas en comparación con los expuestos a temperaturas más altas (Comunicaciones del AOML, 2024).

La dinámica de fluidos, que utiliza las ecuaciones de Navier-Stokes, es crucial para comprender fenómenos marinos como las corrientes y las olas. Entendimos de que los arrecifes de coral son cruciales para la biodiversidad y los servicios ambientales, pero corren el riesgo de

ser asfixiados por el aumento del nivel del mar, la sedimentación y la escorrentía causadas por el cambio climático. El CO_2 se absorbe y los corales se blanquean debido al estrés térmico y la contaminación y eso los vuelve ácidos y también afecta su crecimiento y reproducción. El modelado de nutrientes y gases vitales de los corales mediante dinámica de fluidos brinda información sobre los patrones de daño y las estrategias de conservación. Investigamos las formas más conocidas de cultivar corales que son la jardinería, restauración y uso de cuerdas submarinas, en condiciones controladas. Los corales pueden soportar el estrés térmico y el pH afecta su crecimiento, una investigación del laboratorio experimental de arrecifes (NOAA) muestra que el cambio climático tiene un efecto en la formación de arrecifes.

Conclusiones.

Los arrecifes de coral están influenciados por una combinación de factores bióticos y abióticos, depredadores y competidores, y factores bióticos como la calidad del agua, la temperatura, la salinidad y el pH. La distribución y disponibilidad de estos factores están directamente relacionadas con la formación y desarrollo de los arrecifes, y la dinámica de fluidos es un factor clave.

Los arrecifes de coral dependen en gran medida de las corrientes, olas y mareas oceánicas. La morfología del arrecife está influenciada por los movimientos del agua, que no sólo transportan nutrientes y larvas, sino que también afectan la capacidad del arrecife para resistir eventos climáticos extremos y cambios ambientales.

La sedimentación y la contaminación asfixian a los corales e impiden la luz que las algas simbióticas necesitan para la fotosíntesis y los asfixian. La recuperación del arrecife se ve obstaculizada por la aceleración de la erosión y la sedimentación provocadas por las actividades humanas y los graves fenómenos climáticos.

Los arrecifes dependen de los corales y las algas, y de los herbívoros que limitan el crecimiento de las algas, y el equilibrio de los arrecifes depende de la competencia de los

corales y las algas. La capacidad del arrecife para resistir los cambios ambientales y el estrés está influenciada por perturbaciones que interrumpen estas interacciones.

El calentamiento global y el aumento del nivel del mar cambian la distribución de sedimentos y nutrientes y cambian los patrones de corrientes y olas. La estructura del arrecife se ve debilitada por estos cambios, lo que también debilita los esqueletos de los corales y los hace más susceptibles a la erosión y a las condiciones climáticas extremas.

La dinámica de fluidos es el estudio del impacto de los movimientos del agua en la estructura de los arrecifes, la dispersión de las larvas y la calidad del agua. Invertir en investigación de arrecifes y esfuerzos de conservación para crear estrategias efectivas que minimicen los efectos dañinos y mejoren la resiliencia de estos ecosistemas críticos.

Referencias bibliográficas

- Albright (2024). ¡Los Océanos!
https://ssec.si.edu/sites/default/files/other/globalgoals/espanol/Ocean_Part3_SP.pdf.
- Armas Fajardo, M. A., & Vasquez Vera, M. L. (2024). Evaluación de la influencia por contaminantes antropogénicos en el agua en la reserva de corales de la comuna Los Ciriales. Universidad Politécnica Salesiana Sede María Auxiliadora.
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/27503/1/UPS-GT004995.pdf>.
- Barraza, J. E. (2023). Bleaching events of the coral *Porites lobata* (2006-2022) and restoration activities at Ramsar site “Complejo Los Cóbano”, El Salvador. *Biología Tropical*, 71(S1). Universidad de Costa Rica. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/rbt/article/view/54739>.
- Bashevkin, S., Connor D. Dibble, Robert P. Dunn, Jordan A. Hollarsmith, Gabriel Ng, Erin V. Satterthwaite, Steven G. Morgan. (2020) Larval dispersal in a changing ocean with an emphasis on upwelling regions. *Ecological Society of America*.
<https://doi.org/10.1002/ecs2.3015>.
- Brito, R., & Matos, S. (s. f.). Restauración de los Arrecifes de Coral.
- Comunicaciones del AOML. (2024). Investigación de los efectos del cambio climático en los corales constructores de arrecifes mediante brazos robóticos. Laboratorio Oceanográfico y Meteorológico del Atlántico de NOAA.
<https://www.aoml.noaa.gov/es/advance-coral-research-using-robotic/>.
- Coral Reef Alliance. (2024). Los Principales Problemas de Calidad del Agua que Afectan Hoy a los Arrecifes de Coral. Coral Reef Alliance. <https://coral.org/es/blog/los-principales-problemas-de-calidad-del-agua-que-afectan-hoy-a-los-arrecifes-de-coral/#:~:text=Estos%20contaminantes%20pueden%20tener%20efectos,de%20otros%20factores%20de%20estr%C3%A9s>.
- Curtis, H., & Barnes, N. S. (2008). *Biología* (7ª ed.). Panamericana
-

- Davis, K. A., Pawlak, G., & Monismith, S. G. (2021). Turbulence and coral reefs. *Annual Review of Marine Science*, 13(1), 343–373. <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-marine-042120-071823>.
- Demarchi, M. (2017). Estructura genética poblacional de diversas especies de Ascidiias (Tunicata, Ascidiacea) en dos sistemas polares: Islas Shetland del Sur (Antártida) y Kongsfjord, Spitsbergen (Ártico). Repositorio Digital UNC. <http://hdl.handle.net/11086/5531>.
- EPA. (2024). Amenazas para los arrecifes de coral. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. <https://espanol.epa.gov/espanol/amenazas-para-los-arrecifes-de-coral>.
- Esteves Amador, R., & de León, C. M. (2019). La amenaza de los sedimentos en los arrecifes de coral. *Revista Marejada*, 17(1). <https://issuu.com/seagrantpr/docs/prsg-marejada-vol17num1/s/13389174>.
- Ezzat, L., Maguer, J.-F., Grover, R., Rottier, C., Tremblay, P., & Ferrier-Pagès, C. (2019). Nutrient starvation impairs the trophic plasticity of reef-building corals under ocean warming. *Functional Ecology*, 33(4), 643–653. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13285>.
- Fansa Fernández, D. (2021). Impacto del blanqueamiento en la salud de los arrecifes de coral en el Caribe Sur de Costa Rica. Universidad de Cádiz. <http://hdl.handle.net/10498/25094>.
- Gómez-Cubillos, C., Gómez-Cubillos, C., Sanjuan-Muñoz, A., & Zea, S. (2019). Interacciones de corales masivos con céspedes algales y otros organismos en arrecifes del Parque Nacional Natural Tayrona. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andrés”. <https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/bitstream/handle/20.500.12010/8632/9195.pdf>.
-

- Milo, A. (2023). Blanqueamiento de corales, el fenómeno que está alterando la dinámica de los ecosistemas marinos. National Geographic. <https://www.ngenespanol.com/naturaleza/que-es-el-blanqueamiento-de-corales-y-que-lo-provoca/>.
- Moebs, W., Ling, S. J., & Sanny, J. (2021). Física universitaria volumen 1. OpenStax. <https://openstax.org/books/f%C3%ADsica-universitaria-volumen-1/pages/14-4-principio-de-arquimedes-y-flotabilidad>.
- Montero Fortunato, E. (2022). La pesca de organismos marinos ornamentales y su impacto en los arrecifes de coral.
- Montero, S. (s.f). Factores bióticos y abióticos de los arrecifes de coral. Colombia Verde. <https://colombiaverde.com.co/geografia/hidrografia/factores-bioticos-y-abioticos-de-los-arrecifes-de-coral/#:~:text=Los%20arrecifes%20de%20coral%20son%20influenciados%20por%20una,salinidad%2C%20la%20luz%20y%20la%20calidad%20del%20agua>.
- Muñiz Irigoyen, C. G., & Gío Argáez, R. (2016). Conservación y restauración en arrecifes de coral. Ciencias, 120-121, 60-71. <https://www.revistacienciasunam.com/es/202-revistas/revista-ciencias-120-121/1998-conservaci%C3%B3n-y-restauraci%C3%B3n-en-arrecifes-de-coral.html>.
- Noguera, I. B. (2020). Mecánica de fluidos: Definición y aplicaciones. Ingeniería Química Reviews. <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/12/mecanica-de-fluidos-definicion-aplicaciones.html>.
- ONU. (2020). La resiliencia de los arrecifes de coral es clave para protegerlos del cambio climático. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/la-resiliencia-de-los-arrecifes-de-coral-es-clave-para-protegerlos#:~:text=Reportaje%20Ocean%20%26%20Coasts->
-

,La%20resiliencia%20de%20los%20arrecifes%20de%20coral%20es%20clave%20para,la%20integridad%20de%20los%20ecosistemas.

Oceana Europe. (s.f) El calentamiento global provoca la desaparición de corales y playas.

[https://europe.oceana.org/es/el-calentamiento-global-provoca-la-desaparicion-de-](https://europe.oceana.org/es/el-calentamiento-global-provoca-la-desaparicion-de-corales-y-)
corales-y-

%20playas/#:~:text=El%20excesivo%20calentamiento%20del%20agua,todas%20las%
20especies%20de%20corales

Porter, E. T., & Cornwell, J. C. (2023). Mesocosm approaches to the examination of benthic–pelagic coupling, with emphasis on turbulence. *Limnology and Oceanography*.
<https://doi.org/10.1002/lno.12425>.

Rodríguez, G. (2021). La acidificación de los océanos, un enorme reto para los ecosistemas: ¿cómo podemos detenerla? *Bioguía*. https://www.bioguia.com/ambiente/se-produce-acidificacion-oceanos_92738485.html.

Rodríguez, R., Valcárcel Abud, A., Bello De Lillo, Y. P., Evangelista Pérez, D. Y., Báez Taveras, D. B., & Matos Mercedes, J. (2022). Importancia de los viveros de coral y su impacto socioeconómico. *Revista de humanidades y ciencias sociales*, 68(1), 78-91.

Sarkis, S. (2017). Investigadores exploran la resistencia de los corales en el nuevo laboratorio experimental de arrecifes. *Laboratorio Oceanográfico y Meteorológico del Atlántico de NOAA*. <https://www.aoml.noaa.gov/es/researchers-explore-coral-resiliency-in-new-erl/>.

Schlaefel, J. A., Tebbett, S. B., & Bellwood, D. R. (2021). The study of sediments on coral reefs: A hydrodynamic perspective. *Marine Pollution Bulletin*, 169(112580), 112580.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112580>.

Secaira, F y Acevedo, C. (2017). Importancia de los arrecifes y dunas en la protección de la costa. *Serie técnica. El papel de los sistemas naturales en la dinámica costera en el caribe mexicano y el impacto de las actividades humanas en su condición actual*. The

Nature Conservancy, México. <https://reefresilience.org/wp-content/uploads/The-Importance-of-Reef-and-Dune-in-the-Protection-of-the-Coast-Spanish.pdf>.

The Nature Conservancy.(2016). Ecología de los arrecifes de coral.Reefresilience. <https://reefresilience.org/es/coral-reef-ecology/>.

Zhao, H., Yuan, M., Stokal, M., Wu, H. C., Liu, X., Murk, A., Kroeze, C., & Osinga, R. (2021). Impacts of nitrogen pollution on corals in the context of global climate change and potential strategies to conserve coral reefs. The Science of the Total Environment, 774(145017), 145017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145017>.
