



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA

**RELACIÓN ENTRE LAS MÉTRICAS DEL PAISAJE Y LA DIVERSIDAD DE
PECES Y CORALES EN EL ARRECIFE DE ENMEDIO DEL SISTEMA
ARRECIFAL VERACRUZANO, SUROESTE DEL GOLFO DE MÉXICO.**

TESIS

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS**

**PRESENTA:
BIÓL. VICTOR HUGO ROJAS RAMIREZ**

TUTOR PRINCIPAL:
DR. HORACIO PÉREZ ESPAÑA
UNIVERSIDAD VERACRUZANA
INSTITUTO DE CIENCIAS MARINAS Y PESQUERÍAS

COMITÉ TUTOR:
DR. JAVIER BELLO PINEDA, UV, ICIMAP.
DR. JOAQUÍN RODRIGO GARZA PÉREZ, UMDI-SISAL, F. CIENCIAS, UNAM.
DR. LORENZO ÁLVAREZ FILIP, ICMYL UNIDAD PUERTO MORELOS
DR. GUILLERMO HORTA PUGA, FES-I, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, ENERO, 2020.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGIA

**RELACIÓN ENTRE LAS MÉTRICAS DEL PAISAJE Y LA DIVERSIDAD DE
PECES Y CORALES EN EL ARRECIFE DE ENMEDIO DEL SISTEMA
ARRECIFAL VERACRUZANO, SUROESTE DEL GOLFO DE MÉXICO.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS
(BIOLOGÍA MARINA)

PRESENTA:
BIÓL. VÍCTOR HUGO ROJAS RAMÍREZ

DIRECTOR DE TESIS
DR. HORACIO PÉREZ ESPAÑA
UNIVERSIDAD VERACRUZANA
INSTITUTO DE CIENCIAS MARINAS Y PESQUERÍAS

COMITÉ TUTOR:
DR. JAVIER BELLO PINEDA, UV, ICIMAP.
DR. JOAQUÍN RODRIGO GARZA PÉREZ, UMDI-SISAL, F. CIENCIAS, UNAM.
DR. LORENZO ÁLVAREZ FILIP, ICMYL UNIDAD PUERTO MORELOS
DR. GUILLERMO HORTA PUGA, FES-I, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, ENERO 2020

AGRADECIMIENTOS

Al Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología por permitirme estudiar en tan excelente instituto y todas las facilidades otorgadas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por haberme otorgado la beca con número (CVU/Becario): 562619/299903, con la cual pude realizar mis estudios de maestría.

A mi director de tesis Dr. Horacio Pérez España por todos sus apoyos, comentarios y asesorías durante el desarrollo de este trabajo.

A los miembros de mi comité que estuvo integrado por Dr. Javier Bello Pineda, Dr. Joaquín Rodrigo Garza Pérez, Dr. Lorenzo Álvarez Filip Y Dr. Guillermo Horta Puga, a cada uno de ellos le agradezco infinitamente todos los conocimientos aportados, asesorías y apoyo académico a esta investigación.

Al Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías de la Universidad Veracruzana por proporcionarme y otorgarme todas las herramientas, apoyos, para la realización de esta investigación.

Al Laboratorio de Percepción Remota y SIG del CINVESTAV-IPN Unidad Mérida. A la Dra. María de los Ángeles Liceaga Correa encargada del laboratorio por prestarnos el software para los datos obtenidos del sonar de barrido lateral y el perfilador sísmico utilizados en este estudio. A Luis A. Rincón Sandoval y Eduardo Cuevas por su apoyo.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABLAS	V
RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
INTRODUCCIÓN	1
Arrecifes de coral	1
Uso de la percepción remota en arrecifes de coral	2
Ecología del paisaje arrecifal	3
Relación entre el hábitat y la diversidad	4
ANTECEDENTES	6
JUSTIFICACIÓN	10
HIPÓTESIS	11
OBJETIVO GENERAL	11
Objetivos particulares	11
MATERIAL Y MÉTODO	12
ÁREA DE ESTUDIO	12
Golfo de México	12
Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV)	12
Arrecife De Enmedio	14
Caracterización del paisaje	15
Puntos de muestreo	17
Censos visuales de peces	18
Diversidad de peces	19
Cobertura de coral	19

Diversidad de corales.....	19
Métrica del paisaje.....	19
Rugosidad topográfica.....	21
Análisis estadísticos.....	21
RESULTADOS	22
Caracterización del paisaje	22
Componentes bentónicos	30
Métricas del paisaje	35
Rugosidad topográfica.....	38
Curvas de acumulación.....	39
Índices ecológicos de peces.....	41
Análisis estadísticos.....	47
Índices ecológicos de corales.....	49
Análisis estadísticos.....	54
Correlación entre métricas del paisaje-diversidad de peces y corales.	55
DISCUSIÓN	56
CONCLUSIONES	65
RECOMENDACIONES.....	65
LITERATURA CITADA	66
ANEXOS	76
Anexo 1. Comparación de imágenes digitales de fondo y perfiles sísmicos.....	76
Anexo 2. Mosaicos digitales de cada zona.	83

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. PARQUE NACIONAL SISTEMA ARRECIFAL VERACRUZANO (PNSAV) (MAPA TOMADO DE DOF, 2012).	14
FIGURA 2. VISTA AÉREA DE SUR A NORTE, DEL ARRECIFE DE ENMEDIO.	15
FIGURA 3. IMAGEN DE LOS TRANSECTOS DISPUESTOS PERPENDICULARMENTE A LA PENDIENTE EN EL ARRECIFE DE ENMEDIO.	16
FIGURA 4. CENSO VISUAL DE IDENTIFICACIÓN DE PECES, CON AYUDA DE UN TRANSECTO DE BANDA. TOMADA DE SANCHEZ-RODRIGUEZ (2014).	18
FIGURA 5. A) MAPA DE TRANSECTOS DONDE SE REALIZARON PERFILES DE FONDO, A Y B MUESTRAN UN TRANSECTO DIRECCIÓN NORTE Y B) PERFIL DE FONDO MARINO DEL TRANSECTO A-B.	22
FIGURA 6. PERFIL DEL FONDO ARRECIFAL DONDE SE RECONOCIERON TRES TIPOS DE FONDO COMO: FONDO MARINO, SUBFONDO MARINO Y ECOS MÚLTIPLES.	23
FIGURA 7. PERFIL DE FONDO DONDE SE IDENTIFICÓ EL SUSTRATO CONSOLIDADO Y NO CONSOLIDADO POR LA SEÑAL ACÚSTICA.	23
FIGURA 8. EJEMPLO DE LOS PERFILES DE FONDO DE LAS DIFERENTES ZONAS IDENTIFICANDO LOS DIFERENTES SUSTRATOS, A) ZONA ESTE, B) ZONA OESTE, C) ZONA SUR Y D) ZONA NORTE.	24
FIGURA 9. MAPA BATIMÉTRICO A PARTIR DE LAS AMPLITUDES SÍSMICAS GENERADAS POR EL PERFILADOR SÍSMICO.	25
FIGURA 10. MAPA DIGITAL DE ELEVACIÓN DEL ARRECIFE ENMEDIO, A) VISTA DE SURESTE, B) VISTA SUROESTE.	26
FIGURA 11. COMPARACIÓN DE IMÁGENES GENERADAS CON EL PERFILADOR SÍSMICO (A) Y EL SONAR DE BARRIDO LATERAL (B). FLECHAS ROJAS = SUSTRATO NO CONSOLIDADO; FLECHAS NEGRAS = SUSTRATO CONSOLIDADO.	27
FIGURA 12. MOSAICO DE IMÁGENES DIGITALES DEL SONAR DE BARRIDO LATERAL DE LA ZONA NORTE.	28
FIGURA 13. MOSAICO DE IMÁGENES DIGITALES DE LA ZONA OESTE.	28
FIGURA 14. MAPA AUTOMATIZADO DE CINCO CLASES ACÚSTICAS.	29
FIGURA 15. PORCENTAJE DE COBERTURA DE COMPONENTES BENTÓNICOS PARA CADA ZONA.	31
FIGURA 16. PORCENTAJE DE COBERTURA DE COMPONENTES BENTÓNICOS PARA LAS DOS PROFUNDIDADES.	31
FIGURA 17. DENDOGRAMA MOSTRANDO EL AGRUPAMIENTO DE SIMILITUD DEL SUSTRATO CONSOLIDADO.	32
FIGURA 18. GRÁFICA DE ESCALAMIENTO MULTIDIMENSIONAL NO MÉTRICO (N-MDS) MOSTRANDO UN PATRÓN DE AGRUPAMIENTO DE LAS SUBCLASES EN FUNCIÓN DE LOS COMPONENTES BENTÓNICOS.	33

FIGURA 19. MOSAICO CON IMÁGENES DIGITALES DEL SBL AJUSTADAS AL MAPA AUTOMATIZADO DE CLASES ACÚSTICAS, PARA FACILITAR LA INTERPRETACIÓN VAYA A LA FIGURA 12.....	34
FIGURA 20. MAPA CON UN CORTE A LA ISÓBATA DE 10 M.....	35
FIGURA 21. ÍNDICE DE COMPLEJIDAD DEL HÁBITAT PARA CADA ZONA DEL ARRECIFE DE ENMEDIO.	38
FIGURA 22. CURVAS DE ACUMULACIÓN DE ESPECIES (SOBS) DE LAS CUATRO ZONAS EN EL ARRECIFE DE ENMEDIO, AJUSTADOS A LOS DATOS DE PECES.	39
FIGURA 23. CURVAS DE ACUMULACIÓN DE ESPECIES DE LAS CUATRO ZONAS EN EL ARRECIFE DE ENMEDIO, AJUSTADOS A LOS DATOS DE CORALES.	40
FIGURA 24. ABUNDANCIA POR FAMILIA EN EL ARRECIFE DE ENMEDIO.....	41
FIGURA 25. ABUNDANCIA TOTAL POR ESPECIE EN EL ARRECIFE DE ENMEDIO.....	42
FIGURA 26. ABUNDANCIA PROMEDIO POR ZONAS EN EL ARRECIFE DE ENMEDIO.	43
FIGURA 27. RIQUEZA DE ESPECIES PROMEDIO POR ZONA EN DEL ARRECIFE DE ENMEDIO.	43
FIGURA 28. GRAFICA DE LA ABUNDANCIA TOTAL POR PROFUNDIDAD EN CADA ZONA DEL ARRECIFE DE ENMEDIO.	46
FIGURA 29. RIQUEZA DE ESPECIES POR PROFUNDIDAD EN CADA ZONA DE ENMEDIO.	46
FIGURA 30. NO SE DISTINGUE UN PATRÓN DE AGRUPAMIENTO DE PECES ENTRE ZONAS.....	48
FIGURA 31. GRÁFICA DE ESCALAMIENTO MULTIDIMENCIONAL (MDS) MOSTRANDO UN PATRÓN DE AGRUPAMIENTO POR PROFUNDIDAD.	48
FIGURA 32. PORCENTAJE DE ABUNDANCIA RELATIVA POR FAMILIA EN EL ARRECIFE DE ENMEDIO.	49
FIGURA 33. ABUNDANCIA RELATIVA POR ESPECIE EN EL ARRECIFE DE ENMEDIO.....	50
FIGURA 34. ABUNDANCIA RELATIVA POR ZONA DENTRO EN EL ARRECIFE DE ENMEDIO.....	50
FIGURA 35. RIQUEZA ESPECIFICA EN CADA ZONA DEL ARRECIFE DE ENMEDIO.	51
FIGURA 36. ABUNDANCIA RELATIVA POR PROFUNDIDAD EN LAS ZONAS DEL ARRECIFE DE ENMEDIO.	52
FIGURA 37. RIQUEZA ESPECÍFICA POR PROFUNDIDAD EN CADA ZONA DEL ARRECIFE DE ENMEDIO.	53
FIGURA 38. GRÁFICA DE ESCALAMIENTO MULTIDIMENCIONAL (MDS) DONDE NO SE OBSERVA UN PATRÓN DE AGRUPAMIENTO.	54
FIGURA 39. GRÁFICA DE ESCALAMIENTO MULTIDIMENCIONAL (MDS) DE CORALES DONDE SE DISTINGUE UNA SEPARACIÓN.	54

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. DESCRIPCIÓN DE CADA UNA DE LAS MÉTRICAS DEL PAISAJE QUE SE UTILIZARON PARA EL ANÁLISIS EN EL ARRECIFE DE ENMEDIO.....	20
TABLA 2. PORCENTAJE DE LA COBERTURA DE CADA COMPONENTE BENTÓNICO.	30
TABLA 3. VALORES DE LAS MÉTRICAS DEL PAISAJE (UNIDADES), POR CLASE EN EL ARRECIFE DE ENMEDIO	36
TABLA 4. VALORES DE LAS MÉTRICAS DEL PAISAJE POR CLASE Y ZONA EN EL ARRECIFE DE ENMEDIO.	37
TABLA 5. VALORES DE LAS MÉTRICAS DEL PAISAJE POR CLASE Y PROFUNDIDAD EN EL ARRECIFE DE ENMEDIO.	37
TABLA 6. CLASIFICACIÓN DEL VALOR DE COMPLEJIDAD.	38
TABLA 7. RIQUEZA ESTIMADA CON CHAO1 AJUSTADOS A LOS DATOS DE PECES.	39
TABLA 8. RIQUEZA ESTIMADA CON CHAO2 AJUSTADOS A LOS DATOS DE CORALES.	40
TABLA 9. REGISTRO DE LA PRESENCIA DE ESPECIES EN EL ARRECIFE DE ENMEDIO POR ZONAS.	44
TABLA 10. VALORES DE LOS ÍNDICES ECOLÓGICOS POR ZONA EN EL ARRECIFE DE ENMEDIO.	47
TABLA 11. PRESENCIA DE ESPECIES POR ZONA EN EL ARRECIFE DE ENMEDIO.	51
TABLA 12. VALORES DE LOS ÍNDICES DE DIVERSIDAD EN CADA ZONA DEL ARRECIFE DE ENMEDIO.	53
TABLA 13. RESULTADO DEL BIO-ENV ENTRE LAS MATRICES DE MÉTRICA DE PAISAJE Y DE PECES. CA = ÁREA DE LA CLASE, NP = NÚMERO DE PARCHES, LPI = ÍNDICE DEL PARCHÉ MÁS GRANDE.	55
TABLA 14. RESULTADO DEL BIO-ENV ENTRE LAS MATRICES DE MÉTRICA DE PAISAJE Y BIOLÓGICAS DE CORALES, CA = ÁREA DE LA CLASE, NP = NÚMERO DE PARCHES, LPI = ÍNDICE DEL PARCHÉ MÁS GRANDE, SHAPE = ÍNDICE DE LA FORMA Y PROX = PROXIMIDAD.	55

RESUMEN

Se sabe que la estructura de la comunidad de peces puede estar influenciada por la complejidad topográfica del sustrato. En el presente estudio se determinó la relación entre los hábitats bentónicos y la diversidad biológica de peces y corales en la pendiente arrecifal del arrecife De Enmedio, Sistema Arrecifal Veracruzano. El análisis del fondo se realizó con un sonar de barrido lateral con una frecuencia de 455 kHz de dos haces y un perfilador sísmicos Stratabox de 10kHz. Se caracterizaron los hábitats bentónicos, el tamaño de los parches y la configuración de los hábitats. Se obtuvo un mapa de clasificación no supervisada de cinco clases. Se realizaron visitas a cada una de las clases identificadas y se tomaron fotografías para caracterizarlas. Mediante un análisis aglomerativo jerárquico (SIMPER) se estimaron los principales componentes de cada clase, los cuales, fueron: arena, coral vivo, roca coralina, pedacería y algas. Para conocer la comunidad de peces y corales se realizaron censos visuales y fotográficos en transectos de 10 m se reportaron 22 especies de corales, la especie *Orbicella faveolata* fue la que presentó una mayor abundancia. En cuanto a los peces, se reportó un total 66 especies, *Coryphopterus personatus/hyalinus*, fue la especie más abundante. La zona Este presentó una mayor complejidad topográfica, esto se relaciona con una baja riqueza y baja abundancia de corales. La zona Oeste mostró una baja complejidad con una alta riqueza y abundancia de peces-corales. Por lo que a menor complejidad topográfica mayor riqueza-abundancia para las profundidades someras. La diversidad de hábitats y su configuración espacial, determinan la conectividad entre ellas, lo cual tiene influencia sobre la abundancia de peces-corales. Este trabajo permite comprobar parcialmente la relación entre la complejidad estructural y la riqueza de peces, aunque al analizarlo a mayor detalle se puede ver que existen excepciones.

Palabras clave: hábitat, comunidad, complejidad topográfica, sonar y sustrato.

ABSTRACT

It is known that the structure of the fish community can be influenced by the topographic complexity of the substrate. In the present study, the relationship between benthic habitats and the biological diversity of fish and corals in the reef slope of the De Enmedio reef, Veracruz Reef System was determined. The background analysis was carried out with a side scan sonar with a frequency of 455 kHz of two beams and a 10kHz Stratabox seismic profiler. The benthic habitats, the size of the patches and the configuration of the habitats were characterized. An unsupervised classification map of five classes was obtained. Visits were made to each of the identified classes and photographs were taken to characterize them. Through a hierarchical agglomeration analysis (SIMPER), the main components of each class were estimated, which were: sand, living coral, coral rock, rubble and algae. In order to know the community of fish and corals, visual and photographic censuses were taken in transects of 10 m, 22 species of corals were reported, the *Orbicella faveolata* species was the one that presented the greatest abundance. Regarding the fish, a total of 66 species was reported, *Coryphopterus personatus / hyalinus*, was the most abundant species. The East zone presented a greater topographic complexity, this is related to a low richness and low abundance of corals. The western zone showed a low complexity with a high richness and abundance of coral fish. As far as less topographic complexity greater richness-abundance for shallow depths. The diversity of habitats and their spatial configuration determine the connectivity between them, which influences the abundance of coral fish. This work allows us to partially verify the relationship between structural complexity and fish richness, although when analyzing it in greater detail it can be seen that there are exceptions.

Keywords: habitat, community, topographic complexity, sonar and substrate.

INTRODUCCIÓN

Arrecifes de coral

Los arrecifes de coral son ecosistemas marinos bentónicos de gran complejidad arquitectónica (Connell, 1978). Se encuentran entre los sitios con mayor productividad y abundancia de especies en la Tierra (Xu y Zhao, 2014), brindándole a la sociedad un sinnúmero de bienes (Ortiz-Lozano *et al.*, 2013) y de servicios de importancia ambiental, económica y social (Delgadillo-Garzón y Zapata-Ramírez, 2009).

Los arrecifes de coral están compuestos principalmente de esqueletos de carbonato de calcio (CaCO_3) (Nybakken, 2005), secretados en mayor proporción por los corales escleractineos, siendo los principales organismos formadores de arrecifes de coral (Messmer *et al.*, 2011) y en menor cantidad por otros organismos tales como moluscos, algas calcáreas y esponjas. Como resultado de condiciones hidrológicas y geológicas, los arrecifes se presentan en diferentes tamaños y formas, son ecosistemas de gran madurez, caracterizados en su conjunto por una enorme heterogeneidad, en donde el espacio es dividido y utilizado por organismos con propiedades y requerimientos diferentes (Quintana y Molina, 1991).

En la actualidad, los arrecifes de coral del mundo se distribuyen principalmente en dos regiones: Atlántico-Caribe e Indo-Pacífico; estos ecosistemas se desarrollan en aguas someras y su existencia se restringe a latitudes bajas, entre los 30° Norte y los 30° Sur (Olivares y Severeyn, 2000), desarrollándose en aguas tropicales (Tunnell, 2007), con temperaturas de entre 20 y 30 °C (Xu y Zhao, 2014), de alta transparencia, con recambio constante que favorece la concentración elevada de oxígeno, bajas concentraciones de nutrientes y donde la carga de transporte de sedimentos es baja (Chávez-Hidalgo, 2009).

En México se presentan en tres diferentes áreas: en las costas del golfo de México, península de Yucatán y el océano Pacífico (Rogel, 2000). Sin embargo, en las últimas décadas, las comunidades de arrecifes de coral han experimentado

profundos cambios a escala global, según lo publicados en la red de monitoreo de arrecifes de coral (GCRMN por sus siglas en inglés) en el 2008, muchos ecologistas han expresado su preocupación por la disminución mundial en la cobertura de coral debido al cambio climático (Jones *et al.*, 2004) y a perturbaciones antropogénicas (Enochs y Manzello, 2012). Se ha estimado la pérdida del 19 % de la superficie original de los arrecifes de coral (Wilkinson 2008).

A nivel mundial, existe una conciencia creciente acerca de la importancia de la diversidad biológica, condición y valor de estos ecosistemas (Bello-Pineda *et al.*, 2005). Se han establecido áreas marinas protegidas (AMP) como una estrategia para su protección, uso sostenible y el desarrollo de los arrecifes de coral en muchas partes del mundo (Bello-Pineda, 2004). En México, al suroeste del golfo de México, se encuentra el PNSAV que fue decretado como Parque Nacional Marino (DOF, 1992); sin embargo, las estrategias integrales para proteger la biodiversidad marina, también requieren una comprensión de como las especies responden a la degradación de sus hábitats (Jones *et al.*, 2004).

Uso de la percepción remota en arrecifes de coral

Ante la problemática que enfrentan estos ecosistemas, el surgimiento y desarrollo de nuevas tecnologías como la percepción remota (PR) proporcionan un nuevo camino para el monitoreo de los arrecifes de coral a una escala regional (Hamel y Andréfouët, 2010). El funcionamiento de estas técnicas ha mejorado de forma eficaz la observación y monitoreo de los arrecifes de coral poco profundos en todo el mundo, así como la caracterización de las diferencias estructurales de los arrecifes (Andréfouët *et al.*, 2003), para evaluar las variaciones batimétricas (Walker, *et al.*, 2009), los hábitats bentónicos y para proporcionar nuevas estadísticas espaciales (Mellin *et al.*, 2009).

La percepción remota permite mapear sistemáticamente grandes extensiones de los arrecifes de poca profundidad (0-25 m de profundidad) (Andréfouët *et al.*, 2008) y mediante la interpretación visual de las imágenes generadas, permite el cálculo de métricas de la topografía del fondo marino en múltiples escalas espaciales en los

Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Walker, *et al.*, 2009). Existen diferentes productos de percepción remota, como imágenes satelitales que tienen múltiples bandas que penetran el agua en ambientes marinos (Green *et al.*, 2000), tal es el caso de las aportadas por los satélites Landsat, SPOT, IKONOS y las imágenes aéreas CASI, que ofrecen diferentes grados de precisión, resolución y características espectrales (Garza-Pérez *et al.*, 2004). Otro tipo de tecnologías de percepción remota como la fotografía aérea, sensores hiperespectrales, sonar y perfiladores, alcanzan también descripciones detalladas de los hábitats (Kutser *et al.*, 2003).

En México se han aplicado diversas técnicas de mapeo arrecifal, principalmente de tipo pasivo, como son: el sensor hiperespectral aerotransportado CASI (*Compact Airborne Spectrographic Imager*), los sensores satelitales Landsat TM (*Landsat Thematic Mapper*) y los sensores remotos activos (escáner de barrido lateral) (Candelaria-Silva *et al.*, 2006). Para la incorporación de un sistema de clasificación de los arrecifes de coral mediante percepción remota, se establecen dos aspectos: zonas geomorfológicas y tipos de hábitats (Mumby y Harborne, 1999). El número de hábitats identificados depende principalmente de los sensores, la resolución de los datos (resolución espectral, resolución espacial y resolución temporal), así como de las condiciones ambientales (profundidad del agua, transparencia del agua).

Ecología del paisaje arrecifal

La disciplina de la ecología del paisaje se ocupa de las interacciones e intercambios a través de grandes áreas y relaciona la estructura de un área con su función (Grober-Dunsmore, 2005). El término paisaje se utiliza para describir cualquier área terrestre espacialmente heterogénea en términos de características de la estructura, la función y el cambio (Arias-González *et al.*, 2006). La estructura del paisaje está dada por su composición y configuración espacial. La configuración del paisaje describe el arreglo espacial o fisionomía de cada cobertura (e.g. número de fragmentos, distancia media entre fragmentos).

fragmentos, distancia media entre fragmentos) (Arroyo-Rodríguez y Fahrig, 2014)

La estructura del paisaje se ha cuantificado mediante un número de métricas incluyendo índices compuestos (la diversidad de hábitats), medidas de configuración (el tamaño del parche) y el contexto (tamaño, disposición espacial y la composición de los alrededores de los parches) (Grober-Dunsmore *et al.*, 2005).

Los hábitats dentro del arrecife de coral son definidos según el investigador y a menudo se mezcla la geomorfología, con la cobertura biótica y sustrato irregular (Bastian, 2001). A menudo el hábitat se define exclusivamente en función de los atributos ecológicos (cobertura biótica) y las clases geomorfológicas asociadas se asignan a cada clase de hábitat (Pungetti, 2012). También hay poca uniformidad en las escalas o uso de clasificación de hábitat llevando a la confusión en la interpretación lo cual dificulta comparaciones directas entre estudios (Berkström *et al.*, 2013). Los arrecifes de coral presentan un complejo mosaico de hábitats (coral vivo, pastos marinos, coral muerto, arena), son por tanto, ideales en el enfoque de la ecología del paisaje (Christensen *et al.*, 2003). Los tamaños y disposición espacial de estos parches pueden ejercer una fuerte influencia sobre los movimientos de muchos organismos, los cuales, a su vez pueden afectar los patrones de abundancia y de distribución de los organismos, con consecuencias importantes para la dinámica de la población y de la comunidad (Grober-Dunsmore *et al.*, 2007). El estudio de los ecosistemas requiere no sólo reconocer los tipos de hábitats esenciales, sino entender los vínculos funcionales entre los hábitats y la diversidad.

Relación entre el hábitat y la diversidad

Las métricas a escala de paisaje se han empleado tradicionalmente en el estudio de los sistemas terrestres (Castilla *et al.*, 2009; Mas *et al.*, 2010; Argañaraz y Estraiagas, 2014) y recientemente se han aplicado para el estudio de los ecosistemas arrecifales para comprender mejor las relaciones diversidad-hábitat (Viehman *et al.*, 2009; Hamylton y Spencer 2011; Chefaoui, 2014).

Un principio fundamental en la ecología asume que las variables abióticas y bióticas influyen en la distribución de todos los organismos, incluyendo peces marinos (Walker *et al.* 2009). Las variables abióticas como la temperatura, la salinidad, la

profundidad, la complejidad topográfica y los procesos ecológicos (el reclutamiento, la competencia, la disponibilidad de alimentos y la depredación) juegan un papel en la determinación de la distribución y abundancia de peces (e.g. Bell y Galzin, 1984; Roberts y Ormond, 1987; Chabanet, *et al.* 1997; Delgadillo-Garzón y Zapata-Ramírez, 2009; Messmer, *et al.*, 2011). También en estos ambientes, los corales se han tenido que ir adaptando a las diferentes condiciones ambientales y antropogénicas mediante la variación en la morfología del coral. Los corales de vida libre, los delicadamente ramificados y los corales foliosos tienden a ser más comunes en ambientes con baja energía; en tanto los corales masivos, los incrustantes y los ramificados robustos tienden a ser más comunes en ambientes con alta energía. Debido a las adaptaciones combinadas de las especies de coral, estas tienden a preferir diferentes ambientes arrecifales que influyen en su crecimiento, alimentación y reproducción (Budd *et al.*, 2006).

La relación entre el hábitat y la diversidad de peces muestra que la estructura de la comunidad de peces puede estar influenciada por la complejidad física del sustrato (Bell y Galzin, 1984), la cobertura de coral vivo y la complejidad topográfica del hábitat (Messmer *et al.*, 2011); estos últimos parecen tener una importante influencia en la abundancia, distribución y la diversidad de los peces (Friendlander *et al.*, 2003).

Las perturbaciones pueden reducir la diversidad y alterar la estructura comunitaria mediante la eliminación de especies (Syms y Jones, 2000). Sin embargo, se desconoce el impacto de los fenómenos meteorológicos, por ejemplo los nortes y ciclones, que provocan la ruptura y deposición de corales, todos estos factores provocan una alteración sobre las poblaciones de peces (Jones *et al.*, 2004). Para el caso del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano muchas perturbaciones antropogénicas, pueden traer complicaciones en la comunidad de peces y corales (Chavez-Tunnel, 2010).

ANTECEDENTES

La literatura sobre las investigaciones en el Parque Nacional Arrecifal Veracruzano PNSAV comprende numerosos trabajos de ecología, monitoreo, sistemática, taxonómica, sustentabilidad y geomorfología. Uno de los primeros trabajos en esta zona, que describió los rasgos fisiográficos de los arrecifes veracruzanos y sus poblaciones de macroinvertebrados bentónicos, fue el de Quintana y Molina (1991), quien reconoció seis regiones fisiográficas: cayo arrecifal, zona intermareal, laguna arrecifal, barrera, talud y plataforma arenosa profunda. Un año después Lara *et al.* (1992), describieron los patrones de zonación y organización de las comunidades de escleractinios en los arrecifes de coral del PNSAV y presentaron un modelo de zonificación para los arrecifes que consta de cuatro zonas: talud arrecifal, cresta arrecifal, laguna arrecifal y pendiente de sotavento; cada zona la dividieron en subzonas.

Recientemente se han realizado trabajos sobre la relación de las geoformas y la biodiversidad. Tunell *et al.*, (2007) mencionan la zonación y ecología de los arrecifes de la plataforma veracruzana, donde identificaron zonas distintivas: cortes arrecifales, pozas azules y pilares coralinos en el arrecife De Enmedio. Pérez-España y Vargas (2008) caracterizaron las lagunas arrecifales mediante sensores remotos activos, identificando cinco grandes categorías de sustrato. Lozano (2009), ubicó parches de octocorales, las cuales tienen preferencia por canales y sitios de resguardo, mostrando ser sitios con una heterogeneidad de sustratos que ciertas especies prefieren. Por ejemplo *Pseudoplexaura porosa* tiene preferencia de asentamiento sobre pedacería de coral muerto de la especie de *Acropora cervicornis*. Aguilera (2012), obtuvo la caracterización estructural y dinámica de paisajes en lagunas arrecifales en el PNSAV, con la combinación de diversos productos de percepción remota (imágenes satelitales SPOT, fotografía y videos aéreos) resultando en cuatro hábitats: sustrato desnudo, pasto marino, parches coralinos y pendiente arrecifal.

En comunidades arrecifales los mapas se han empleado con propósitos ecológicos y se han constituido como una valiosa herramienta metodológica para adquirir

información relevante respecto a las características de los arrecifes, tales como la estructura y morfología general, abundancia y patrones de distribución de las diferentes clases de hábitat dentro de los arrecifes, como Dustan *et al.* (2001), Andréfouët *et al.* (2003), Palandro *et al.* (2008), Mumby *et al.* (2008), Mellin *et al.* (2009), Hamel y Andréfouët (2010), Eyre y Maher (2011), Xu y Zaho (2014), haciendo uso de los sensores remotos de alta resolución tales como IKONOS, LANDSAT y fotografías aéreas.

En el Caribe mexicano se han llevado a cabo trabajos con modelado espacial y percepción remota en arrecifes de coral, como el de Garza-Pérez *et al.* (2004), quienes realizaron la predicción espacial del arrecife Akumal, con modelos aditivos generalizados (GAM por sus singlas en inglés), imágenes satelitales de alta resolución IKONOS y modelos topográficos digitales de arrecifes (DTM por sus singlas en inglés) encontrando ocho hábitats. Bello *et al.* (2005 a) utilizaron Sistemas de Información Geográfica (SIG) para combinar imágenes Landsat TM, fotografía aérea, video aéreo y un modelo batimétrico digital, con el cual evaluaron y mapearon hábitats sumergidos en el arrecife Alacranes, Yucatán, México, para producir áreas de entrenamiento para la clasificación supervisada de imágenes Landsat TM.

El mismo año Bello *et al.* (2005 b), realizaron un análisis espacial de los hábitats sumergidos incorporando la evaluación de la langosta (*Panulirus argus*) en el arrecife Alacranes, Yucatán, México, utilizando una imagen de satélite Landsat TM. Arias-Gonzales *et al.* (2011), describieron y explicaron los patrones de diversidad de peces y de corales en el sector norte del Sistema Arrecifal Mesoamericano y demostraron que las características del paisaje difieren sustancial y sistemáticamente a lo largo del sitio de estudio. Del norte hacia el sur hay un claro incremento en el área del arrecife, la cobertura de coral, la complejidad del hábitat y la amplitud de la plataforma del arrecife. Un año después Arias-González *et al.* (2012) presentaron una predicción espacial integrada a los sistemas de información geográfica con imágenes satelitales (LANDSAT 7 ETM+) y modelos digitales batimétricos para la clasificación de los hábitats según los valores de diversidad de

peces del arrecife Banco chinchorro. Andréfouët *et al.* (2003) combinó los sistemas de clasificación, como las estructuras geomorfológicas de los arrecifes (frente arrecifal, piso arrecifal, cresta arrecifal, arrecife posterior y laguna) y categorizó los diferentes tipos de hábitats (corales, algas y arena) en diferentes subclases. También hay un creciente desarrollo en trabajos con tecnologías acústicas para monitorear diferentes ambientes. Por ejemplo, Cuevas *et al.* (2013), quienes evaluaron la morfología y las características sedimentológicas de las dunas sumergidas en la costa de Yucatán con un perfilador sismológico y obtuvieron perfiles del subfondo, registraron altura y longitud de onda de las dunas. Alfaro-Gómez (2017) utilizó dos tipos de sensores acústicos (sonar de barrido lateral y perfilador sísmico) con los cuales caracterizó las pendientes, determinó los tipos de fondo de siete clases acústicas y la complejidad geomorfológica de las pendientes arrecifales y su grado de consolidación mediante perfiles de fondo del arrecife Verde.

Varios estudios se han enfocado en la relación entre las variables del sustrato y la diversidad de las comunidades de peces en los arrecifes de coral. Autores como Luckhurst y Luckhurst (1978); Bell y Galzin (1984); Sano *et al.* (1984); Roberts y Ormond (1987); Chabanet *et al.* (1997); Friedlander y Parrish (1998); Lecchini *et al.* (2003); Walker *et al.* (2009); Wilson *et al.* (2010); Messmer *et al.* (2011), encontraron una relación positiva entre la complejidad estructural del sustrato y la riqueza o diversidad de especies de peces. Esta relación compleja entre hábitat-diversidad de peces ha sido analizada también por Syms y Jones (2000), quienes examinaron los efectos de perturbación del hábitat en la estructura de ensamblaje de peces, ocupando pequeños parches del arrecife. Friedlander *et al.* (2003) evaluaron la relación entre comunidades de peces y su hábitat asociado.

Grober-Dunsmore *et al.* en el 2004 y 2008 analizaron las relaciones entre la estructura del paisaje y la estructura de la comunidad de peces; encontraron una relación positiva entre grupos específicos de peces y el hábitat. Arias-González *et al.* (2006) probaron la relación entre la función (biomasa y estructura trófica de las comunidades de peces) y la estructura (hábitat); encontraron que la pérdida de la

estructura del hábitat y la complejidad causada por los impactos antropogénicos o naturales, podría reducir la riqueza y la biomasa de la comunidad de peces.

En los trabajos revisados, se observó que existe relación entre la complejidad del hábitat y la diversidad biológica, no obstante, la ecología del paisaje en arrecifes de coral ha recibido poca atención. En consecuencia, en el 2001 Turner y colaboradores encontraron que el tamaño de los parches y la configuración del hábitat, influyen en el ensamblaje, la conectividad y la dinámica de poblaciones. Grober-Dunsmore *et al.* (2008), utilizaron las métricas del paisaje (diversidad de los parches, riqueza de los parches, diversidad del hábitat, riqueza del hábitat y área del hábitat) y métricas del parche (tamaño del parche, tamaño del arrecife) para relacionar la estructura del hábitat con la diversidad de peces. En México no se le ha dado mucha atención a la ecología del paisaje en arrecifes de coral, uno de los primeros trabajos fue el de Arias-González *et al.* (2006), quienes utilizaron el término paisaje arrecifal para describir elementos espaciales discretos con estructura morfológica y biológica que permiten explorar la complejidad de interacciones entre la estructura física (hábitats) y las comunidades biológicas que ahí se desarrollan.

JUSTIFICACIÓN

Las recientes investigaciones sobre los arrecifes de coral, se han centrado en entender una variedad de procesos naturales, los cuales dan información de la biota, la diversidad del lugar, la condición de hábitats particulares y cambios en el ambiente. En el Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano (PNSAV) se han realizado trabajos relacionados con la biodiversidad y la relación estrecha entre la diversidad y el hábitat; sin embargo, son escasos los que tratan la métrica del paisaje, la relación entre la métrica y la diversidad dentro del PNSAV. También se han ayudado de los sensores remotos ópticos para el mapeo de los arrecifes de coral, siendo esta una herramienta muy útil dentro del PNSAV. Siendo la penetración de luz el principal componente de este tipo de sensores, sin embargo, la mayor parte del Golfo de México está influenciada por los aportes terrígenos de los ríos aledaños y la penetración de la luz es limitada. Por esta razón en este trabajo se utilizó un sensor remoto acústico (sonar). Por otro lado, es necesario el estudio de las formas del relieve de los arrecifes, ya que permite definir las diferentes zonaciones, tanto de la planicie arrecifal como de los taludes, dándonos un panorama actual de la geografía de los arrecifes y explicar la posible influencia sobre la diversidad biológica. Con los sensores remotos es posible cubrir una mayor área que con los métodos tradicionales como capturas y censos visuales. En el presente estudio se aportó un mejor panorama de las formas del arrecife y se conoció la relación espacial entre la biota y el hábitat, obteniendo así un conocimiento más integrado de su biología y morfología. Este tipo de trabajos buscan patrones a pequeña escala, complementan el enfoque actual a escala regional, que se está dando en el estudio de los arrecifes a nivel mundial y que sirve como base para explorar otras áreas a las que por su profundidad no es posible llegar con buzos y que son importantes tanto por su biodiversidad como por los servicios que prestan.

HIPÓTESIS

Si la configuración espacial del paisaje tiene una influencia sobre los procesos que determinan la distribución y abundancia de las especies de peces y corales; y la fragmentación hace que las especies que ocupan nichos extensos no puedan mantener una población uniforme; entonces una alta fragmentación del paisaje arrecifal (reducción del hábitat, incremento en el número de parches, decremento en el tamaño de parches) tendrá un efecto negativo en la diversidad de peces y corales en el arrecife De Enmedio.

OBJETIVO GENERAL

Determinar la relación entre las métricas del paisaje y la diversidad de peces y corales en la pendiente arrecifal del arrecife De Enmedio, Sistema Arrecifal Veracruzano.

Objetivos particulares

- Identificar los distintos paisajes en la pendiente arrecifal del arrecife De Enmedio con ayuda de percepción remota activa.
- Obtener las métricas de las unidades del paisaje en el arrecife De Enmedio.
- Conocer la diversidad y abundancia de las especies de peces y corales presentes en los diferentes paisajes en el arrecife De Enmedio.
- Analizar la relación entre las métricas de paisaje y la diversidad en el arrecife De Enmedio.

MATERIAL Y MÉTODO

ÁREA DE ESTUDIO

Golfo de México

El Golfo de México, ubicado en la zona subtropical, es una cuenca semicerrada que se comunica con el mar Caribe y el océano Atlántico a través del canal de Yucatán y del estrecho de Florida, respectivamente (Monreal-Gómez *et al.*, 2004).

En gran parte de la plataforma continental del Golfo de México la condición para el desarrollo de arrecifes coralinos no es adecuado; de hecho, de los aproximadamente 360,000 km² de superficie que tiene la parte somera (< 50 m de profundidad) de la plataforma continental del golfo, menos del 1% está cubierta por arrecifes coralinos (Jordán-Dahlgren, 2004).

En el sur del Golfo de México se reconoce la existencia de 46 arrecifes de coral. De éstos, 31 se encuentran sobre la plataforma de Veracruz, ubicados al suroeste del golfo frente a las costas del estado de Veracruz; los otros 15 corresponden a los arrecifes del Banco de Campeche al sureste del Golfo (Tunnell *et al.*, 2007).

Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV)

Dentro de las costas de Veracruz se encuentran tres regiones bien definidas con diferentes grados de desarrollo coralino como el Sistema Arrecifal Lobo-Tuxpan, el Sistema Arrecifal Veracruzano y los Arrecifes de los Tuxtlas.

El SAV se ubica en el polígono delimitado entre las coordenadas 19°15'27.11" 96°12'01.00" N y 19°02'24.00" 95°58'08.52" W (DOF, 2012), constituido por arrecifes de plataformas emergentes y costeros (Tunell *et al.*, 2007). Su formación corresponde exclusivamente al Holoceno, con una esclerofauna relativamente poco diversa, pero que ha prosperado exitosamente a pesar de desarrollarse en un ambiente de alta sedimentación terrígena, provocado por la presencia de numerosos efluentes, como son los Ríos Jamapa, Papaloapan y La Antigua (Pérez-España y Vargas-Hernández, 2008; Horta-Puga y Tello-Musi, 2009.).

El PNSAV fue decretado como Parque Marino Nacional el 24 de agosto de 1992 (DOF, 1992) y el 29 de noviembre del 2012 en el diario oficial de la federación se decretó la modificación de los límites del PNSAV (Fig.1), donde mencionan 28 formaciones arrecifales (DOF, 2012). Está dividido en dos grupos geográficamente separados, el primer grupo ubicado frente a las costas del municipio de Boca del Río y poblado Antón Lizardo, comprende los arrecifes Galleguilla, Anegada de Adentro, Blanquilla, Galega, Pájaros, Mersey, Verde, Bajo Paducah, Sacrificios, Hornos, Ingeniero, Punta Brava y Punta Gorda (DOF, 2012), todos dentro de la isobata de 37 m (Vargas-Hernández *et al.*, 1993). El segundo grupo se localiza frente a las costas del municipio de Alvarado y comprenden 15 arrecifes: Anegada de Afuera, Topatillo, Santiaguillo, Anegadilla, Cabezo, De Enmedio, Rizo, Periferico, Chopas, Sargazo, Punta Coyol, La Palma, Polo, Blanca, y Gote (DOF, 2012), todos ellos por arriba de la isobata de los 48 m (Vargas-Hernández *et al.*, 1993; Tunell *et al.*, 2007).

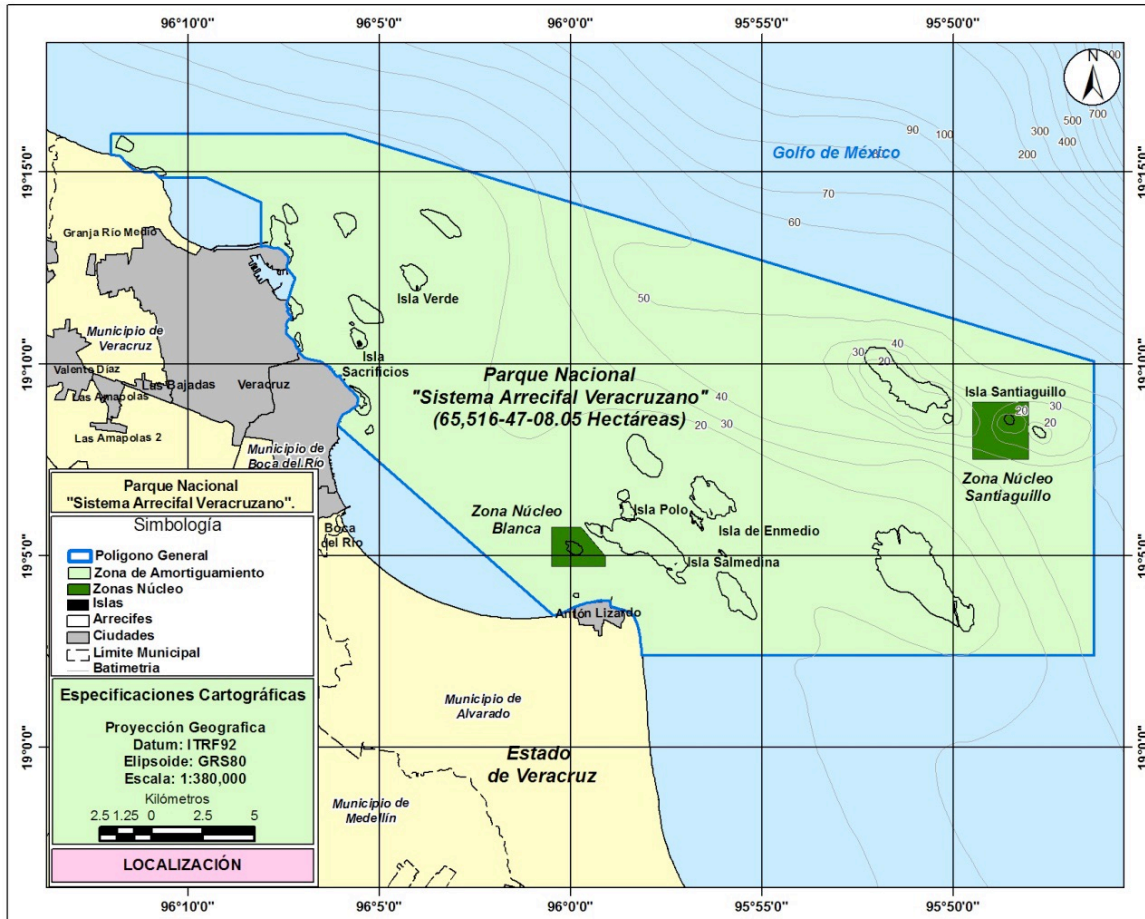


Figura 1. Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano (PNSAV) (mapa tomado de DOF, 2012).

Arrecife De Enmedio.

Este estudio se realizó en el arrecife De Enmedio (Fig.2), el cual es un arrecife de tipo plataforma emergente que se encuentra entre la latitud $19^{\circ}06'21''$ N y longitud $95^{\circ}56'18''$ W, a 7 km al Este de la población pesquera de Antón Lizardo, Veracruz. La forma es casi oval, con su eje más largo dirigido NW-SE. Tiene una longitud de 2.2 km y una anchura de 1.8 km, con un perfil geomorfológico bien definido: laguna arrecifal, cresta y la pendiente arrecifal. La pendiente de barlovento se extiende a una profundidad máxima de 25 m en tanto la de sotavento se extiende a una profundidad de 22 m, presenta canales naturales tanto en la parte Norte como al Sureste del arrecife y un canal dragado en la parte sur del mismo (Vargas-Hernández *et al.*, 1993). Presenta un cayo emergido al sur del arrecife, con una

longitud de 250 m por 93 m de ancho y está formado por sedimentos calcáreos derivados del arrecife (Tunell *et al.*, 2007).



Figura 2. Vista aérea de sur a norte, del arrecife De Enmedio.

Caracterización del paisaje

Se realizaron 62 transectos equidistantes con 100 metros de separación, con 1 km de longitud aproximadamente cada transecto, para la zona Norte del arrecife se llevaron a cabo 13 transectos, 17 transectos para la zona Oeste, en la zona Sur 10 transectos y la zona Este 22 transectos, dispuestos perpendicularmente a la pendiente arrecifal (Fig.3).

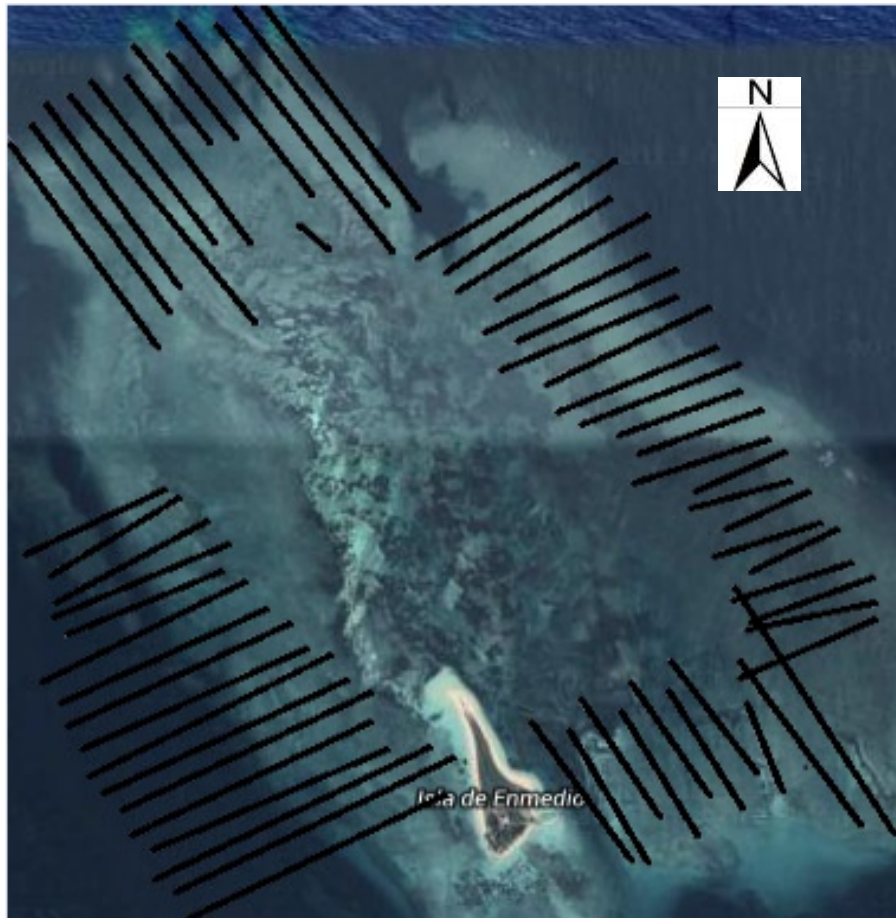


Figura 3. Imagen de los transectos dispuestos perpendicularmente a la pendiente en el arrecife De Enmedio.

En cada transecto se tomaron datos acústicos con ayuda del perfilador sismológico (PS) (Stratabox, SyQwest, Inc.) tipo chirp (10 kHz), instrumento portable de bajo poder y alta resolución que permite el análisis de los sedimentos del subfondo con un poder de penetración de hasta 40 m dentro del sedimento y un sonar de barrido lateral (SBL) con una frecuencia de 455 kHz con dos haces, cada uno emite una señal acústica con un alcance de hasta 100 m de longitud sobre el fondo marino, obteniendo una imagen acústica bidimensional del fondo marino, con presencia y distribución de tipos de fondo o componentes bióticos. Los equipos se instalaron sobre una embarcación con motor fuera de borda y se operaron a una velocidad máxima de 12 km/h dependiendo de la profundidad, la embarcación no ingresó a profundidades menores a 2 m.

Una vez obtenidos los datos de los sensores remotos acústicos, se procedió al procesamiento de los datos. Para el perfilador sísmológico, a partir del programa SeisSee se toman los datos del perfil de subfondo a partir de cada archivo SEG-Y: número de trazos del perfil, coordenada inicial y coordenada final en UTM se generó una base de datos en hoja de Excel. Posteriormente se importaron los archivos SEG-Y al programa Kingdom Suite versión 8.7 (IHS Inc. 2012) para la obtención de perfiles de subfondo, mapa de amplitudes sísmicas y un modelo de elevación digital. Posteriormente se procesaron los datos del SBL en el software Starfish Scanline, el cual convierte los archivos a un formato XTF para ser incorporados al programa QTC Swathview, donde los datos son procesados para crear mapas automatizados de clases acústicas. Durante el proceso se realizó una limpieza de las imágenes tanto de los bordes de la columna de agua, como de la interferencia acústica, que son obstrucciones en el haz acústico reflejado en energía sonora incidente (conocida como retrodispersión). El mapa generado con las diferentes clases acústicas se exportó al software QTC SWATHVIEW (Quester Tangent Corporation), con el cual hizo una interpolación de los datos para generar mapas de clasificación no supervisada. Los mapas automatizados de clases acústicas fueron integrados en el programa ARGIS para ser georeferenciados y el manejo de los mapas. Una vez generados estos mapas se realizó un corte a la isóbata de 10 m y de 20 m, para obtener dos mapas con diferentes profundidades. Posteriormente se realizó una verificación visual en campo de los hábitats (coral vivo, pastos marinos, coral muerto, arena) para describir cada una de las clases acústicas obtenidas y en su caso renombrarlas o unir las, con ello se creó una clasificación supervisada que fue la que se utilizó para realizar las métricas del paisaje.

Puntos de muestreo

Se realizaron un total de 50 puntos de muestreo, 15 en la zona Norte, 10 zona Este, 19 zona Oeste y 6 zona Sur; los puntos de muestreo fueron seleccionados de los mapas de clasificación no supervisada según su clase, generados del software QTC SWATHVIEW (Quester Tangent Corporation), de dicho mapa, al estar georeferenciado en el programa ARGIS, se tomaban las coordenadas del punto

dentro de la clase a verificar y con ayuda de un GPS se localizaban en campo los puntos de muestreo. En cada punto de muestreo dado por la clase acústica se registraron los hábitats (coral vivo, pastos marinos, coral muerto, arena), peces y complejidad topográfica con el método de la cadena de acuerdo con Risk (1972) y modificado por Aranson y Swanson (1997). Posteriormente se realizaron puntos de verificación, para corroborar la validación de las clases obtenidas, los cuales fueron nombrados como check points, se llevaron a cabo 13 para la zona Norte, 16 para la zona Oeste, para la zona sur 14 y para la zona Este dos puntos de verificación. Los puntos de muestreo se dividieron en dos profundidades menores a 10 m (somero) y mayores a 10 m (profundo).

Censos visuales de peces

Para conocer la diversidad de peces se realizaron censos visuales con ayuda de equipo SCUBA. En los 50 puntos de muestreo obtenidos del mapa de clasificación no supervisada se realizaron tres transectos de banda de 10 x 4 m en tres direcciones a partir del punto de inicio (derecha, izquierda y frente) (Fig. 4), debido a que el área de las clases no era lo suficientemente extensa y se podría estar invadiendo otro tipo de clase. El buzo equipado con tabla de acrílico y lápiz, registró la especie, la abundancia y talla aproximada de los individuos.

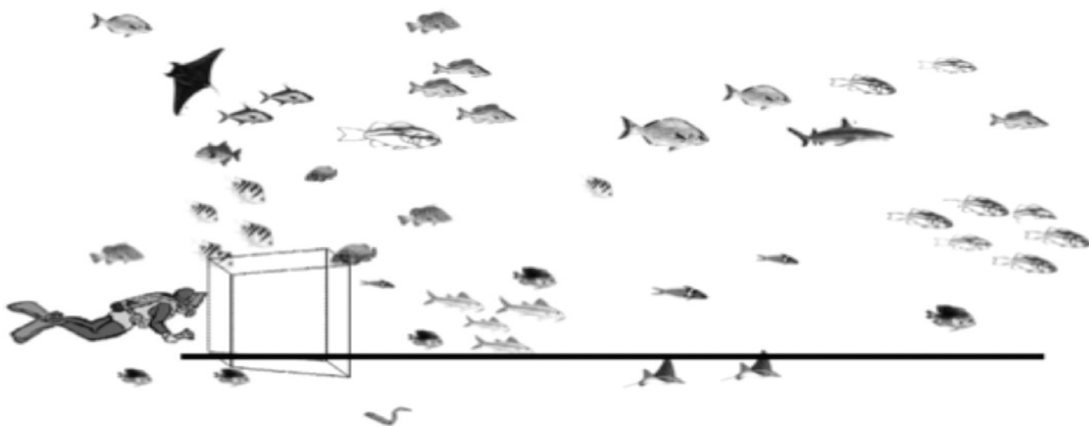


Figura 4. Censo visual de identificación de peces, con ayuda de un transecto de banda. Tomada de Sanchez-Rodriguez (2014).

Diversidad de peces

Para caracterizar la estructura comunitaria de los peces se utilizaron los siguientes índices que permiten entender la dinámica estructural del ecosistema: abundancia, riqueza específica propuesta por Margalef (1969), diversidad con el índice de Shannon, equidad o uniformidad con el índice de Pielou (1966) (Ludwing & Reynolds 1988).

Cobertura de coral

Se tomaron fotografías con ayuda de una estructura que mantuvo la cámara perpendicular al fondo y a una distancia fija, se realizaron tres transectos de 10 m en tres diferentes direcciones (derecha, izquierda y frente) a partir del punto de inicio. Se tomaron 20 fotos por transecto para la obtención de la cobertura coralina. El análisis de las fotografías se realizó mediante el software CoArrCP (Coberturas Arrecifales por Conteo de Puntos) Versión 1.01 (Vargas-Hernández, 2004), el cual utiliza la técnica de conteo de puntos, generando 10 puntos aleatorios, los cuales describen a nivel de especie en el caso de los corales y a nivel de grandes grupos morfofuncionales (arena, coral muerto, roca coralina y padecería de coral) el resto del sustrato.

Diversidad de corales

Para determinar la diversidad de corales de los corales se utilizaron los siguientes índices que permiten cuantificar la biodiversidad de un habitat: cobertura coralina, riqueza específica con el índice de Margalef (1969), diversidad con el índice de Shannon, equidad o uniformidad con el índice de Pielou (1966) (Ludwing & Reynolds 1988).

Métrica del paisaje

Utilizando el programa IDRISI Selva Versión 17 se estandarizó la resolución de los mapas, a las imágenes resultantes se les aplicó un filtro de medianas con un *Kernel* de 3X3 con la finalidad de homogeneizar la imagen y evitar sobreestimaciones de

las métricas de paisaje debido a pixeles aislados de los diferentes tipos de paisajes. Utilizando el programa FRAGSTATS se calcularon métricas del paisaje que han sido y son unos instrumentos ampliamente utilizados en el análisis y estudio de la estructura, función y cambio en los paisajes (Benavente, 2010). Desde un enfoque ecológico, el estudio de la estructura del paisaje, así como de sus propiedades de composición (tipos de elementos que forman parte del paisaje) y configuración (disposición espacial de dichos elementos) ha sido uno de los objetos de estudio de la ecología del paisaje como ciencia (Turner, 2001). En la Tabla 1 se muestran un conjunto de métricas de análisis espacial las cuales aportaron información acerca de la fragmentación, forma y diversidad de paisajes.

Tabla 1. Descripción de cada una de las métricas del paisaje que se utilizaron para el análisis en el arrecife De Enmedio.

Escala	Métricas (unidades)	Descripción
Métricas de área	CA (ha) Área de la clase	Estadística de distribución de los parches de una clase. Es igual a la suma del área de parches de la clase multiplicada por la abundancia proporcional de los parches, a través de todos los parches correspondientes a un tipo de paisaje.
	LPI (%) Índice del parche más grande	Representa el valor del parche de mayor tamaño en la clase. Se acerca a cero cuando el parche más grande de una determinada clase es muy pequeño; es igual a 100 cuando el paisaje consiste en un solo parche de una determinada clase.
Densidad del parche, tamaño del parche.	NP (#) Numero de parches	Es una medida de la fragmentación de una clase y/o paisaje, es decir el número de parches que tiene una clase de paisaje o el paisaje total.
Índice de formas	SHAPE Índice de la forma	Indica la relación área-perímetro de la sumatoria de los bordes en los parches de clase dada. Cuando el valor de este índice es igual a 1 indica que es más regular y parecido a la forma estándar y, cuando el valor del índice de forma es mayor a 1 indica que el parche es más irregular.
Aislamiento/ Proximidad	PROX Proximidad	Mide el grado de aislamiento entre parches dentro de un radio específico al parche focal. Es igual a 0 cuando un parche no tiene vecinos del mismo tipo en un radio de búsqueda especificado; el valor aumenta cuando existen vecinos del mismo tipo en ese radio de búsqueda.

Rugosidad topográfica

La complejidad del hábitat se estimó con el método de la cadena de acuerdo con Risk (1972) y Aranson y Swanson (1997), se calculó para cada transecto. La complejidad (C) se estimó de acuerdo a la ecuación 1:

$$C = 1 - (D/L) \qquad \text{Ecuación 1}$$

Donde;

D = es la longitud alcanzada por la cadena en el sustrato

L = es el largo de la cadena

Siendo cero (0) completamente plano y uno (1) máxima complejidad topográfica.

Análisis estadísticos

Para el análisis de las relaciones entre los diferentes paisajes y la diversidad de peces y corales, se utilizaron dos métodos estadísticos multivariados; 1) el escalamiento multidimensional (*MDS*), el cual representa un espacio geométrico de pocas dimensiones, las similitudes que existentes entre un conjunto de objetos, muestras o sitios, en este caso será la composición cuantitativa de las especies peces-corales y hábitats y 2) la relación entre las métricas del paisaje y la diversidad fueron estimados por medio del análisis de Bio-Env (Clarke y Ainsworth, 1993), el cual maximiza la correlación de una serie matrices de similitud según las variables bióticas (Bray-Curtis) y abióticas (Distancia Euclidiana), el coeficiente más alto de todas las posibles combinaciones, indica que esa relación es la variable que revela una asociación con el patrón biológico (Clarke y Warwick, 2001), usando el coeficiente de Spearman, mediante el software PRIMER 6 version 6.1.6..

RESULTADOS

Caracterización del paisaje

A partir de los 62 transectos perpendiculares a la pendiente arrecifal con la ayuda del perfilador sísmico, se obtuvieron perfiles de fondo marino (Fig.5), donde a través de una interpretación se reconocen tres tipos de fondo: 1) fondo marino (representación gráfica del fondo del mar), 2) subfondo marino (línea de sondeo de acumulación de sedimento no consolidado) y 3) ecos múltiples (multiplicidad de reflexiones en ambos sentidos entre el fondo marino y la superficie) (Fig.6).

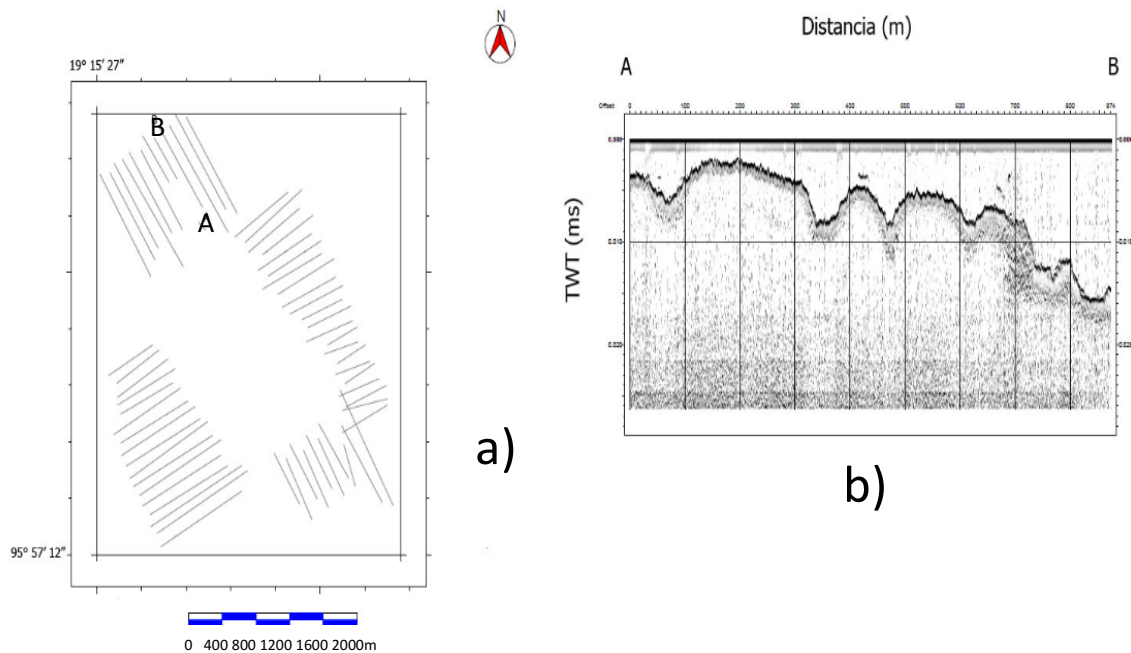


Figura 5. a) Mapa de transectos donde se realizaron perfiles de fondo, A y B muestran un transecto dirección norte y b) perfil de fondo marino del transecto A-B.

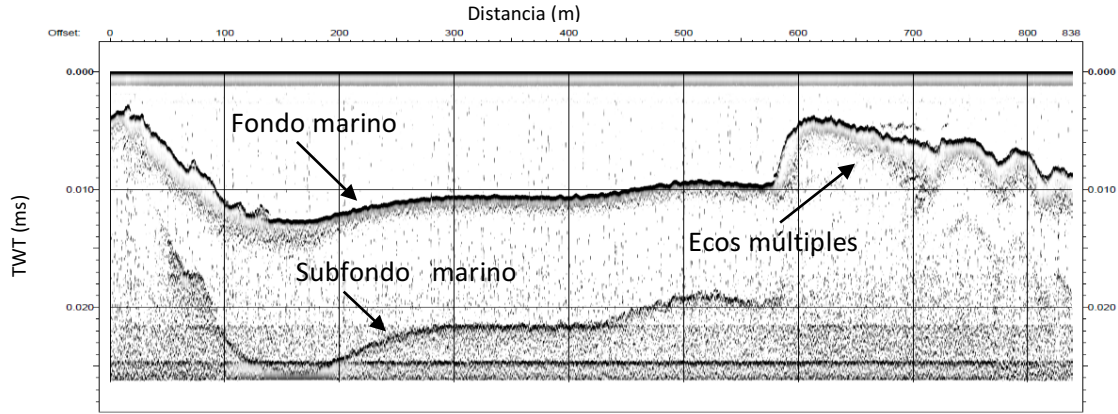


Figura 6. Perfil del fondo arrecifal donde se reconocieron tres tipos de fondo como: Fondo marino, Subfondo marino y Ecos Múltiples.

Dentro de cada uno de los perfiles de fondo podemos observar la distancia del transecto y el TWT (two way time, por sus siglas en ingles) midiendo la profundidad de una interfaz entre dos materiales con diferentes impedancias acústicas, distinguiéndose dos tipos de sustrato: sustrato consolidado (roca) y no consolidado (arena) (Fig. 7). Se identificaron estos dos tipos de fondo debido a que parte de la señal acústica penetró en el lecho marino y se reflejó cuando se encontró con un límite entre dos capas que tienen una impedancia acústica diferente.

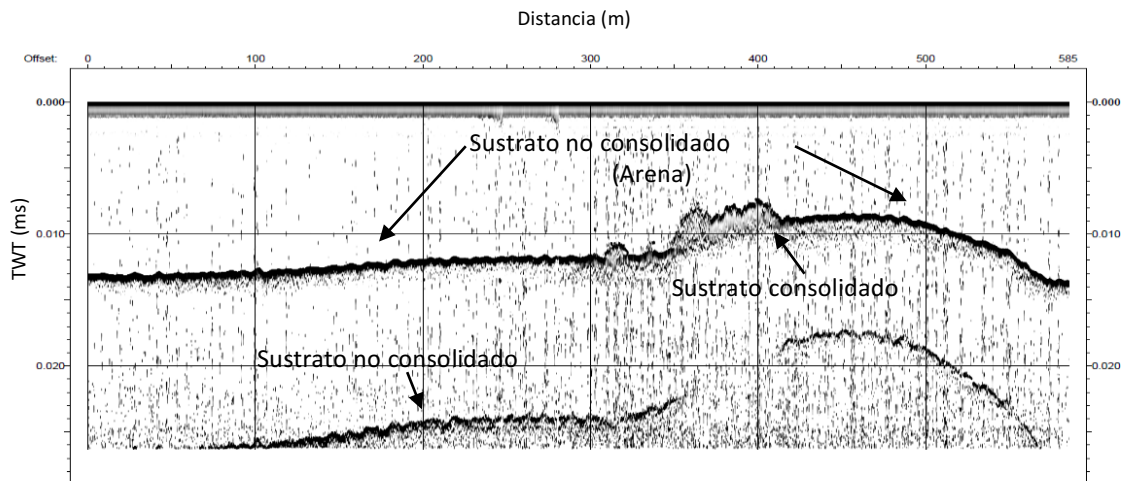


Figura 7. Perfil de fondo donde se identificó el sustrato consolidado y no consolidado por la señal acústica.

Para diferentes zonas del arrecife podemos observar condiciones distintas. La zona Este (Fig.8A) y Norte (Fig. 8D) muestran sustrato consolidado, la zona Oeste muestra zonas heterogéneas de los dos sustratos observados (Fig.8B) y en la zona Sur los perfiles muestran grandes extensiones de sustrato no consolidado (Fig.8C).

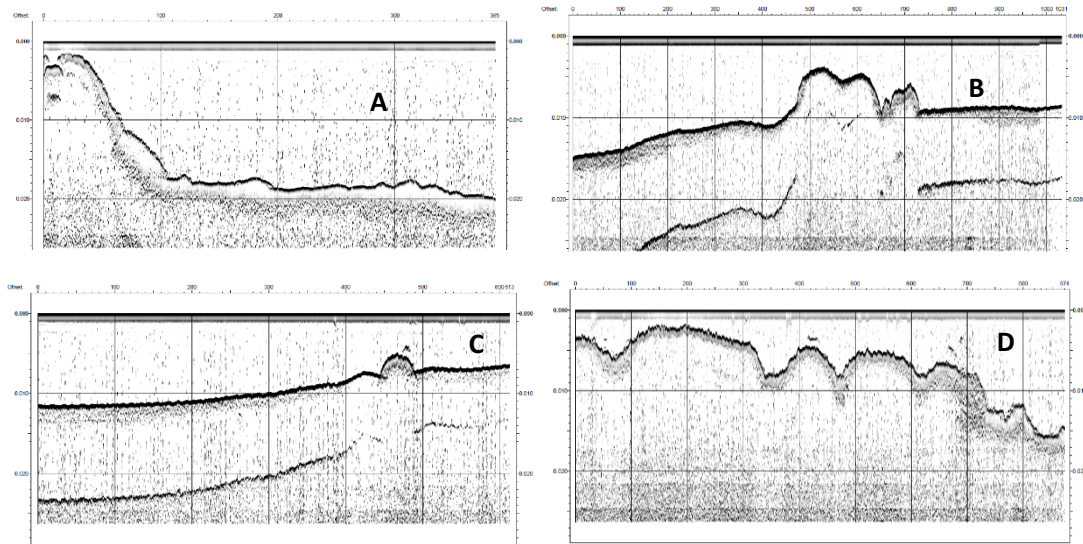


Figura 8. Ejemplo de los perfiles de fondo de las diferentes zonas identificando los diferentes sustratos, A) zona Este, B) zona Oeste, C) zona Sur y D) zona Norte.

Los relieves presentes en los perfiles del fondo conducen a inferir características morfológicas y los patrones de complejidad topográfica, dando como resultado tres tipos de relieve para el arrecife De Enmedio: relieve irregular, cambios abruptos de pendiente y planicies. Lo cual para la zona Norte se observa un relieve irregular (Fig.8D), la zona Este presenta una morfología de cambios abruptos de pendiente (Fig.8A), en la zona Sur se encontraron grandes planicies con montículos rocosos (Fig.8C) y la zona Oeste mostro dos morfologías relieve irregular y planicies (Fig.8B). Las zonas Norte y Oeste muestran una mayor complejidad del hábitat, debido al relieve que presentan los perfiles, por lo que las zonas Sur y Este son las de menor complejidad.

Con la información generada en el perfilador sísmico (PS) se obtuvieron mapas de amplitudes sísmicas, que derivaron en mapas batimétricos, encontrando desde zonas someras (naranja-amarillo) a zonas profundas (violeta-azul marino) (Fig.9). En general se puede distinguir que en el arrecife De Enmedio en la zona Oeste se encuentran las zonas más profundas en tanto las zonas Norte y Este presentan zonas someras más extensas. Se distingue un canal de baja profundidad paralelo al eje mayor del arrecife en la zona Este.

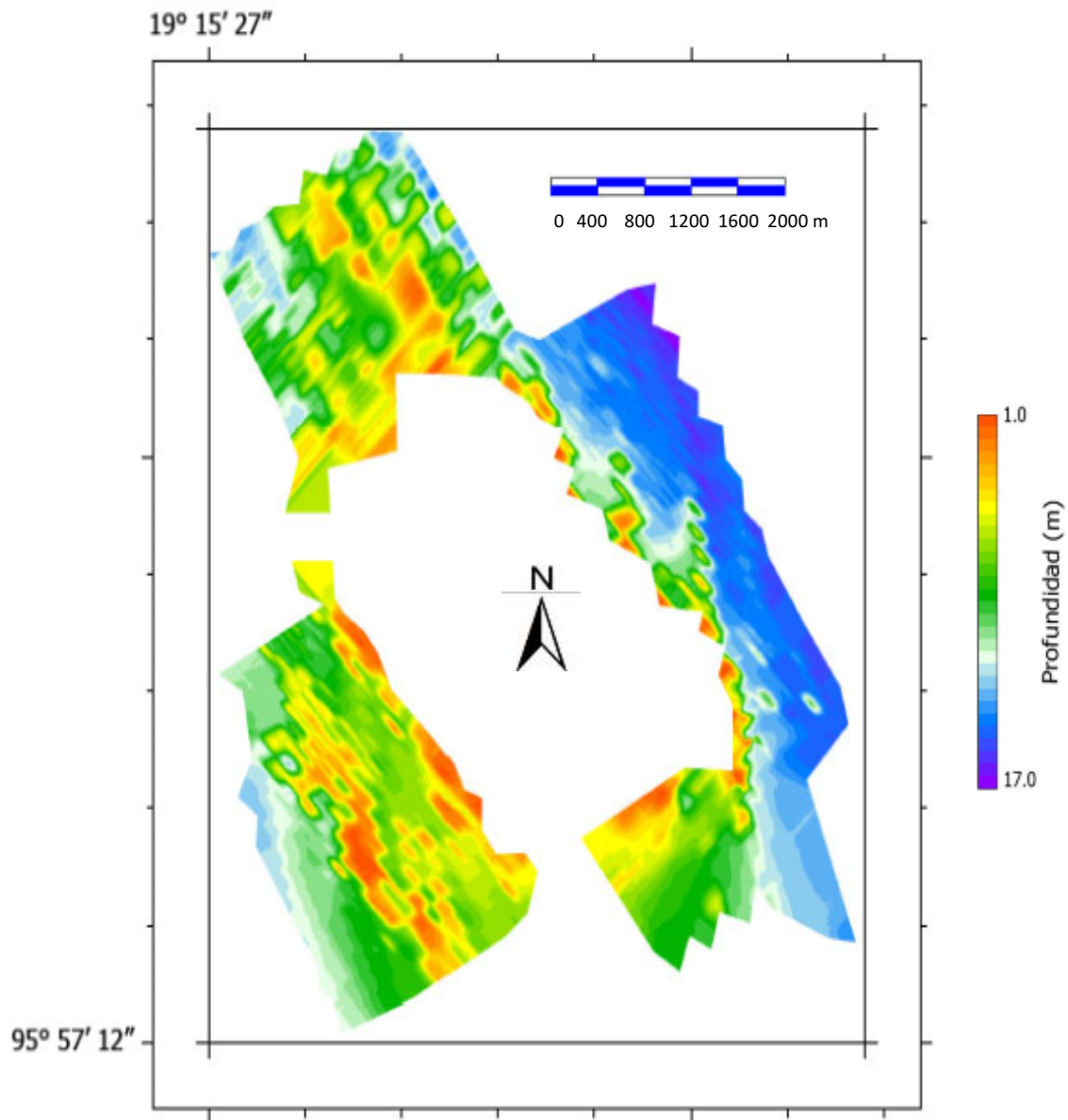


Figura 9. Mapa batimétrico a partir de las amplitudes sísmicas generadas por el perfilador sísmico.

Los mapas digitales de elevación (Fig.10), nos dan una representación tridimensional de los datos generados por el PS. Estos mapas nos permiten caracterizar el relieve y los elementos presentes en el arrecife, reflejan características morfológicas simples como la pendiente y orientación, y permiten distinguir diferentes tipos de relieve. En la figura se observa que la pendiente de sotavento (Este) es menos pronunciada que la pendiente de barlovento (Oeste).

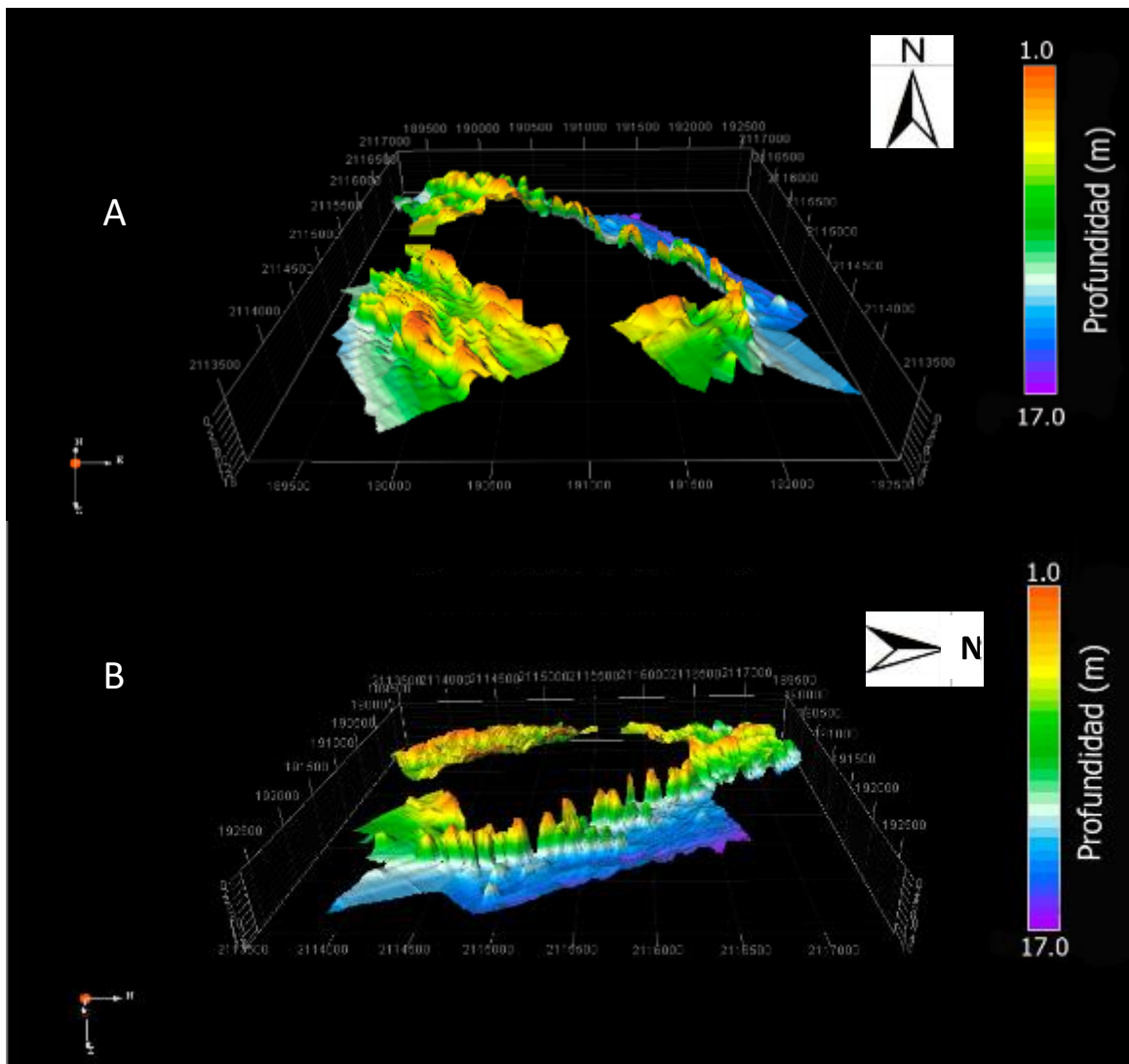


Figura 10. Mapa digital de elevación del arrecife Enmedio, A) vista de sureste, B) vista suroeste.

La zona Norte se caracteriza por ser más irregular, con más colinas y valles, en la zona Oeste se observan dos cordilleras bien definidas con bajo relieve y una pendiente somera, en la zona Sur se observa una gran planicie con algunas elevaciones hacia el Este, en barlovento o zona Este se distingue una pendiente pronunciada con alto relieve.

Una vez realizada la caracterización arrecifal con el perfilador sísmico, se llevó a cabo el análisis de los datos generados por el sonar de barrido lateral (SBL) con el cual se generaron imágenes digitales del fondo marino. Se obtuvieron un total de 62 imágenes de cada transecto. Se observó la existencia de dos tipos de estructuras en las imágenes digitales: lisas y rugosas. Con esto se realizó una comparación entre los perfiles sísmicos (Fig.11A) y las imágenes digitales del sonar (Fig.11B). Se encontró que las zonas de sustrato no consolidado y sustrato consolidado de los perfiles sísmicos concuerdan con las zonas lisas y rugosas de la imagen digital del SBL, renombrando la zona lisa en sustrato no consolidado y la zona rugosa en sustrato consolidado (Anexo 1).

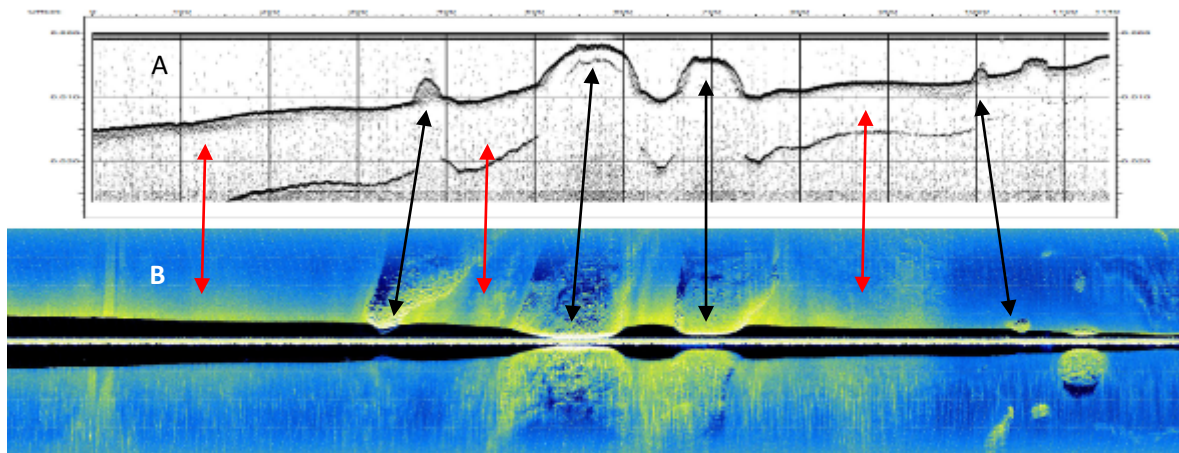


Figura 11. Comparación de imágenes generadas con el perfilador sísmico (A) y el sonar de barrido lateral (B). Flechas rojas = sustrato no consolidado; flechas negras = sustrato consolidado.

Las imágenes digitales del SBL de cada zona se unieron para formar un mosaico del paisaje (Fig.12).

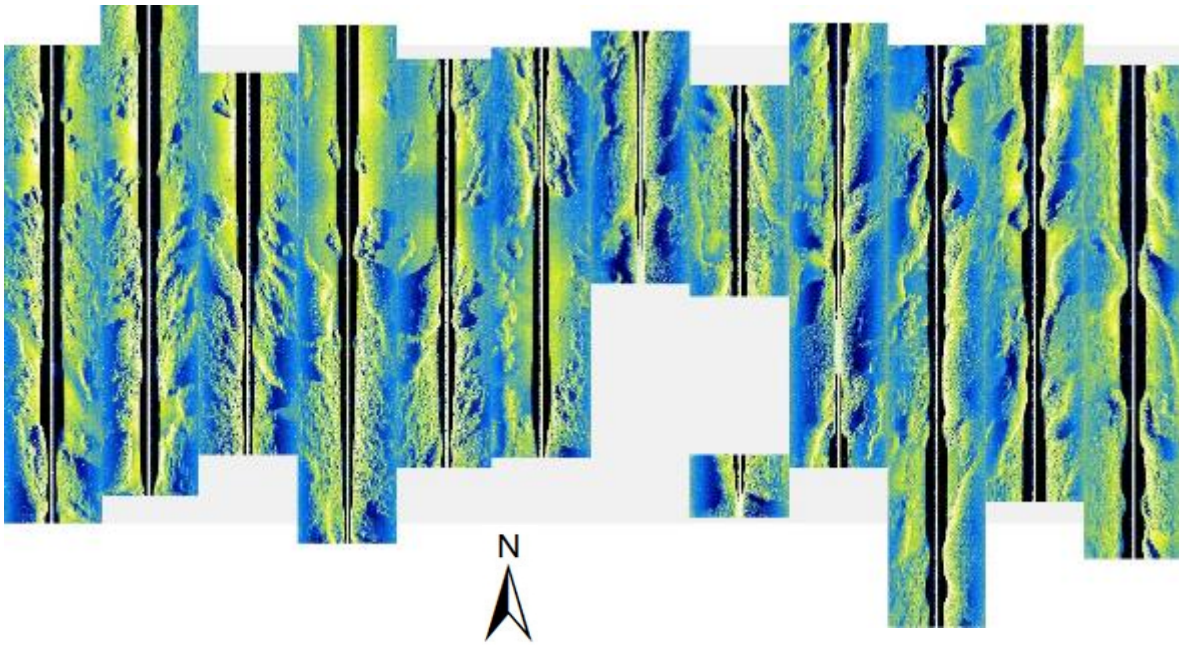


Figura 12. Mosaico de imágenes digitales del sonar de barrido lateral de la zona Norte.

En el mosaico de la zona Oeste se puede diferenciar como una cordillera de sustrato consolidado cruza toda la zona Oeste dejando a sus costados zonas de sustrato no consolidado, con algunos pequeños parches (Fig.13) (Anexo 2).

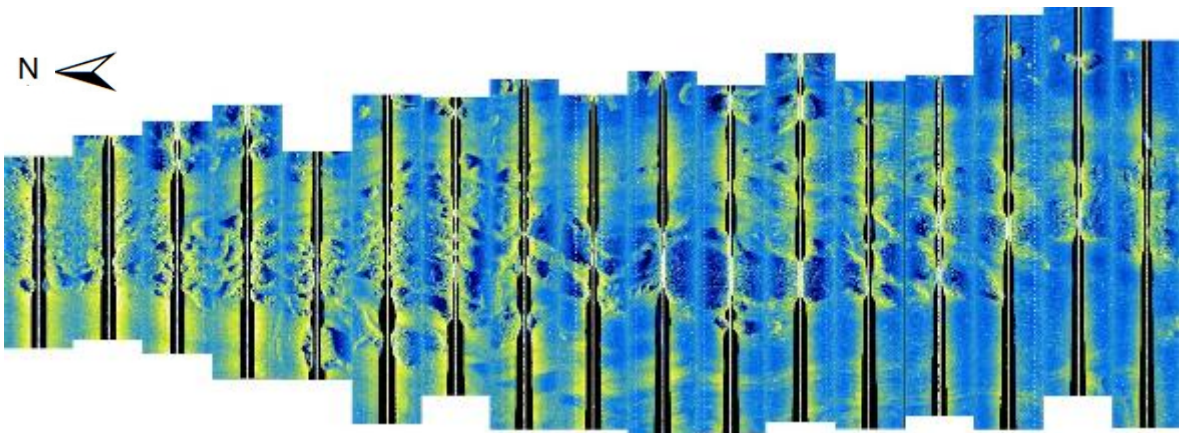


Figura 13. Mosaico de imágenes digitales de la zona Oeste.

Se generaron mapas automatizados de clases acústicas a partir de los datos del SBL, se obtuvo una clasificación no supervisada con cinco clases acústicas, las cuales fueron nombradas clase 1, clase 2, clase 3, clase 4 y clase 5 (Fig.14).

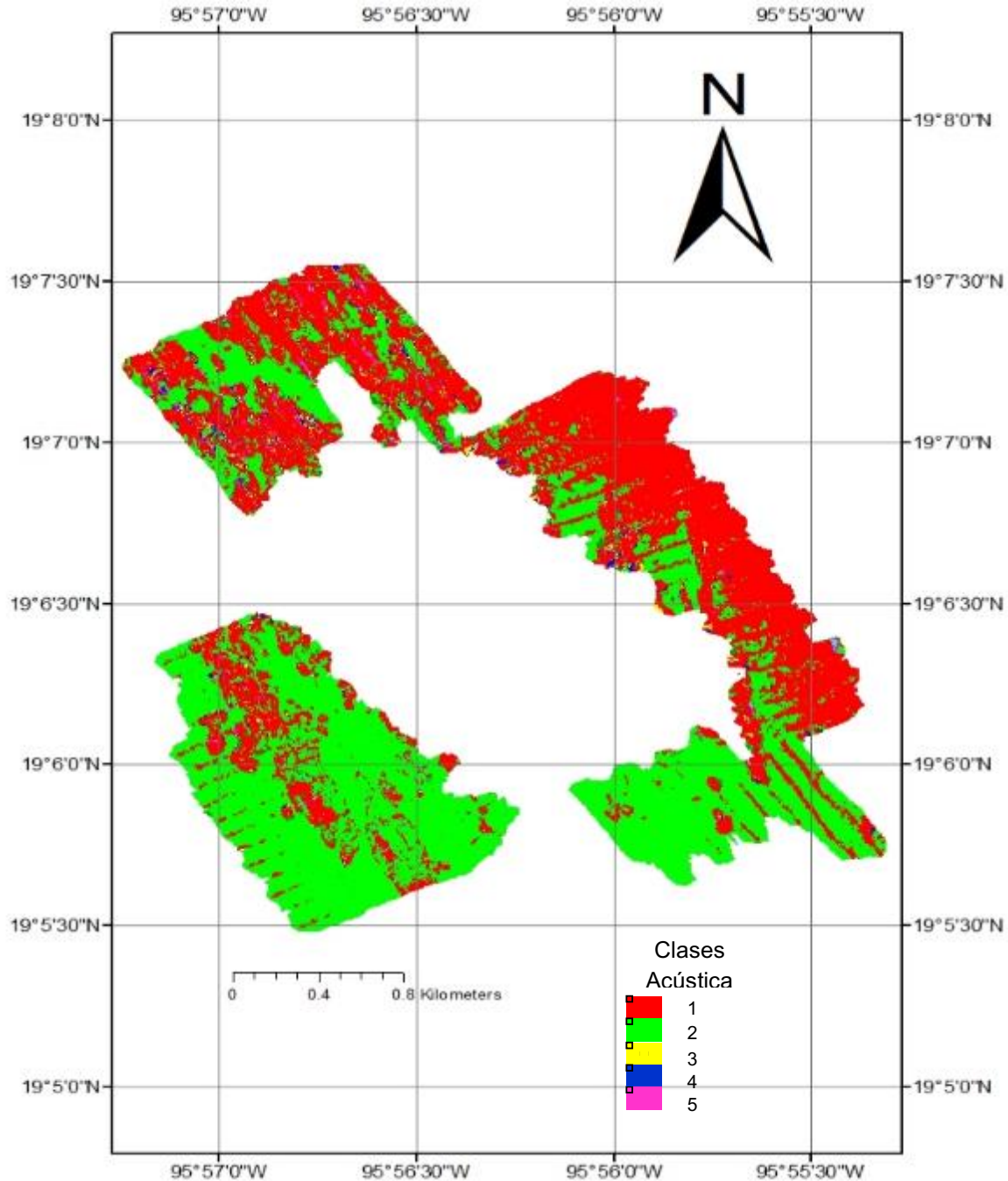


Figura 14. Mapa automatizado de cinco clases acústicas.

Las clases con mayor cobertura fueron la clase 1 y 2, las cuales representan el 89% del área total (Fig.16). Como resultado de los muestreos en cada una de las clases, se realizó una clasificación supervisada, donde, en la clase 2 el componente bentónico dominante fue en su totalidad arena; por otro lado, la clase 1 estuvo caracterizada por cuatro componentes bentónicos: coral vivo, roca coralina, pedacería de coral y alga coralina. Las clases 3, 4 y 5 mostraron el mismo tipo de

componentes bentónicos que la clase 1, integrándolas a la clase 1 y se renombraron la clase 1 como sustrato consolidado y clase 2 como sustrato no consolidado.

Componentes bentónicos

Se obtuvieron los componentes bentónicos del arrecife del sustrato consolidado (clase 1), de las diferentes zonas y de las diferentes profundidades con ayuda del programa CoArrCP, en el cual se identificaron cinco componentes bentónicos: Coral Vivo, Roca Coralina, Pedacería de Coral, Arena y Alga coralina. La cobertura total de Coral vivo en el arrecife De Enmedio fue de 16.01%, mientras que la cobertura de Roca Coralina fue de 76.49% (Tabla 2).

Tabla 2. Porcentaje de la cobertura de cada componente bentónico.

Roca coralina	Coral vivo	Pedacería de coral	Arena	Alga coralina
76.49%	16.01%	4.61%	2.66%	0.23%

El valor más alto de cobertura de Coral Vivo se obtuvo en la zona Oeste, con 23.36%, seguida de la zona Norte y Este con 15.17% y 13.64%, respectivamente (Fig. 15). La zona Sur fue la de menor cobertura coralina con 6.19%. En cuanto a la roca coralina, todas las zonas sobrepasan el 60% de cobertura, siendo la zona Este la de mayor cobertura con 91.19%. El componente pedacería de coral solo se encontró en las zonas Norte y Oeste, mientras que el componente arena no se encontró en la zona sur.

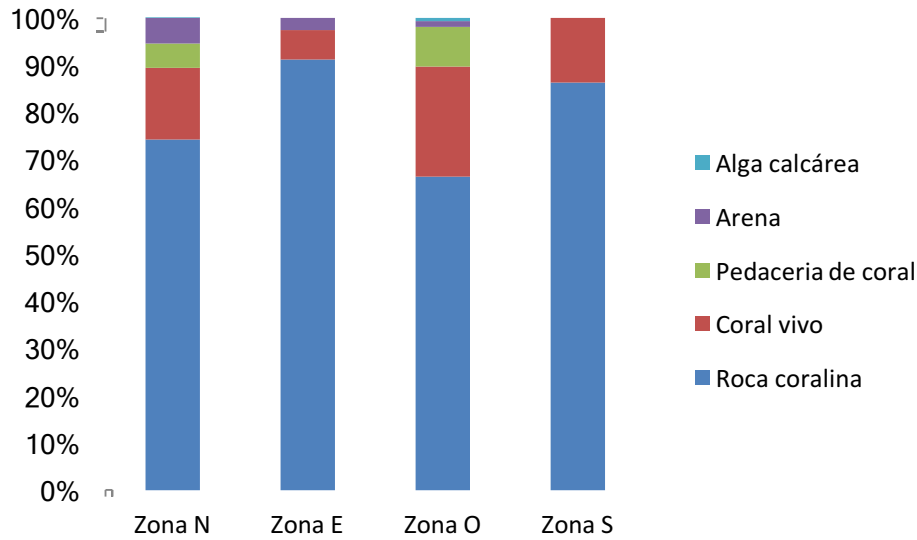


Figura 15. Porcentaje de cobertura de componentes bentónicos para cada zona.

Dentro del parámetro de la profundidad se encontró que la cobertura coralina fue muy similar a < 10 m (16.08%) y > 10 m (16.15%); para el resto de los componentes el comportamiento fue similar (Fig. 16).

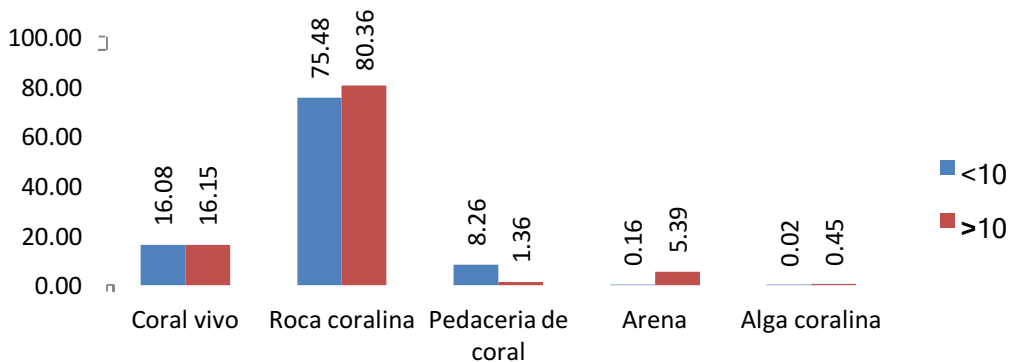


Figura 16. Porcentaje de cobertura de componentes bentónicos para las dos profundidades.

Una vez obtenidos los componentes bentónicos, se llevó a cabo un análisis de similitud entre transectos de las cuatro zonas. En los resultados obtenidos podemos observar cuatro grupos (Fig. 17), nombrados Subclase A, Subclase B, Subclase C y Subclase D.

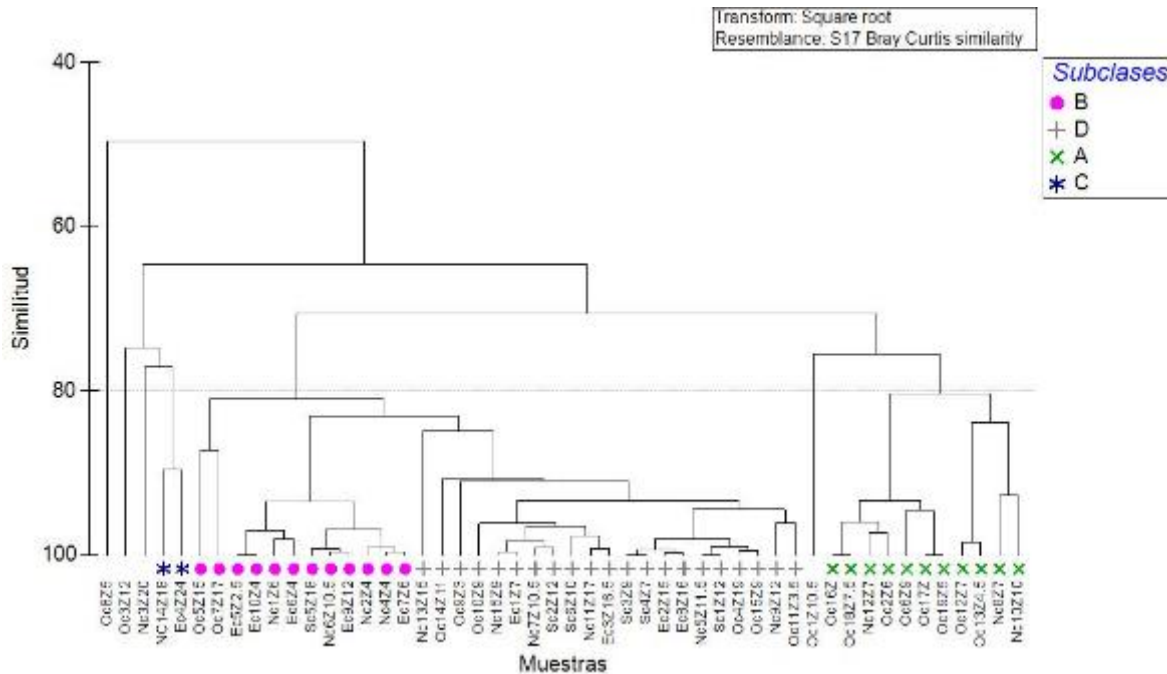


Figura 17. Dendrograma mostrando el agrupamiento de similitud del sustrato consolidado.

Posteriormente se llevó a cabo un análisis SIMPER que analizó la contribución de cada componente bentónico a las diferentes subclases:

En la subclase A, que en su mayoría son muestras de la zona Oeste, los componentes con mayor contribución fueron coral vivo y padecería de coral.

En la subclase B, que en mayoría se encuentran en las zonas Norte y Este, el componente roca coralina contribuyó con un 93%.

En la subclase C los componentes con mayor contribución fueron roca coralina y arena y se distribuyen principalmente en las zonas Norte y Este.

La subclase D, distribuida principalmente en las zonas Norte y Este, los componentes con mayor contribución fueron roca coralina y coral vivo.

En el diagrama de ordenación n-MDS (Fig. 18) se observan las subclases A y C bien separadas, mientras las subclases B y D están mezcladas; esto se puede deber a que los componentes que conforman la subclase B es roca coralina en un 93% y en la subclase D la roca coralina contribuye con un 70%.

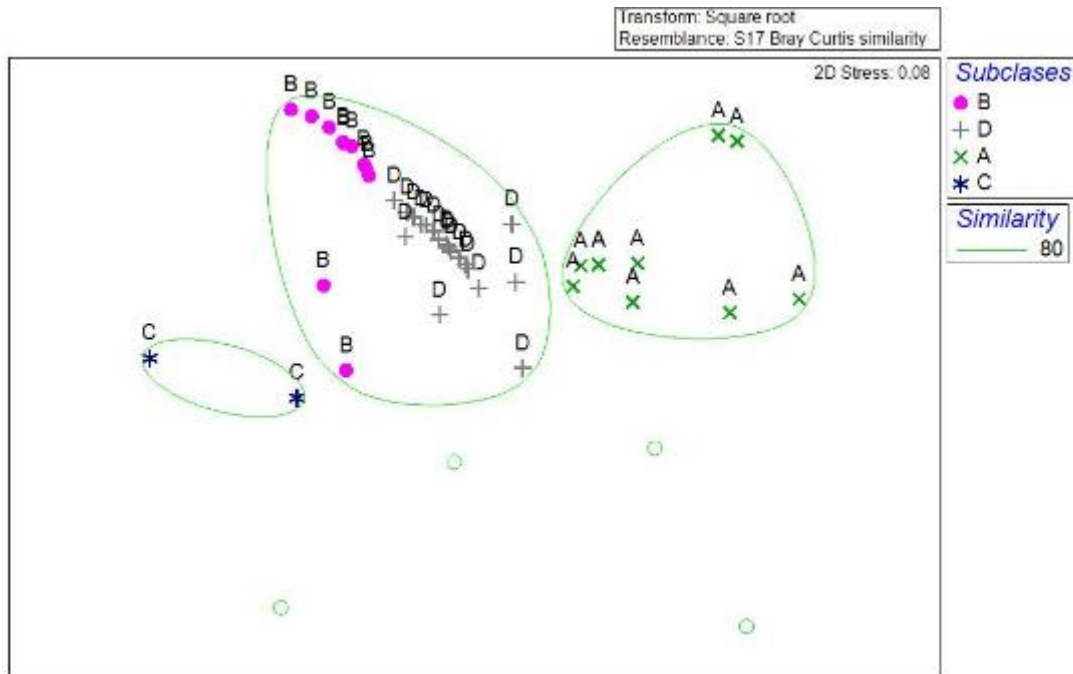


Figura 18. Gráfica de escalamiento multidimensional no métrico (n-MDS) mostrando un patrón de agrupamiento de las subclasses en función de los componentes bentónicos.

Con la finalidad de una fotointerpretación y corroborar las características de los hábitats bentónicos que se encuentran dentro del arrecife se realizaron mosaicos con las imágenes del sonar de barrido lateral (SBL), observando que las partes más rugosas o con alguna sombra coincidía al superponerlo en el mapa automatizado de clases acústicas (Fig.19). El sustrato consolidado se caracterizó por cinco componentes bentónicos como coral vivo, roca coralina, padecería de coral y alga calcárea, coincide con los mapas del SBL en donde se identificó sustrato consolidado. En el sustrato no consolidado el principal componente fue arena, lo cual concuerda con los sitios en los mapas del SBL siendo las partes más lisas de los mapas.

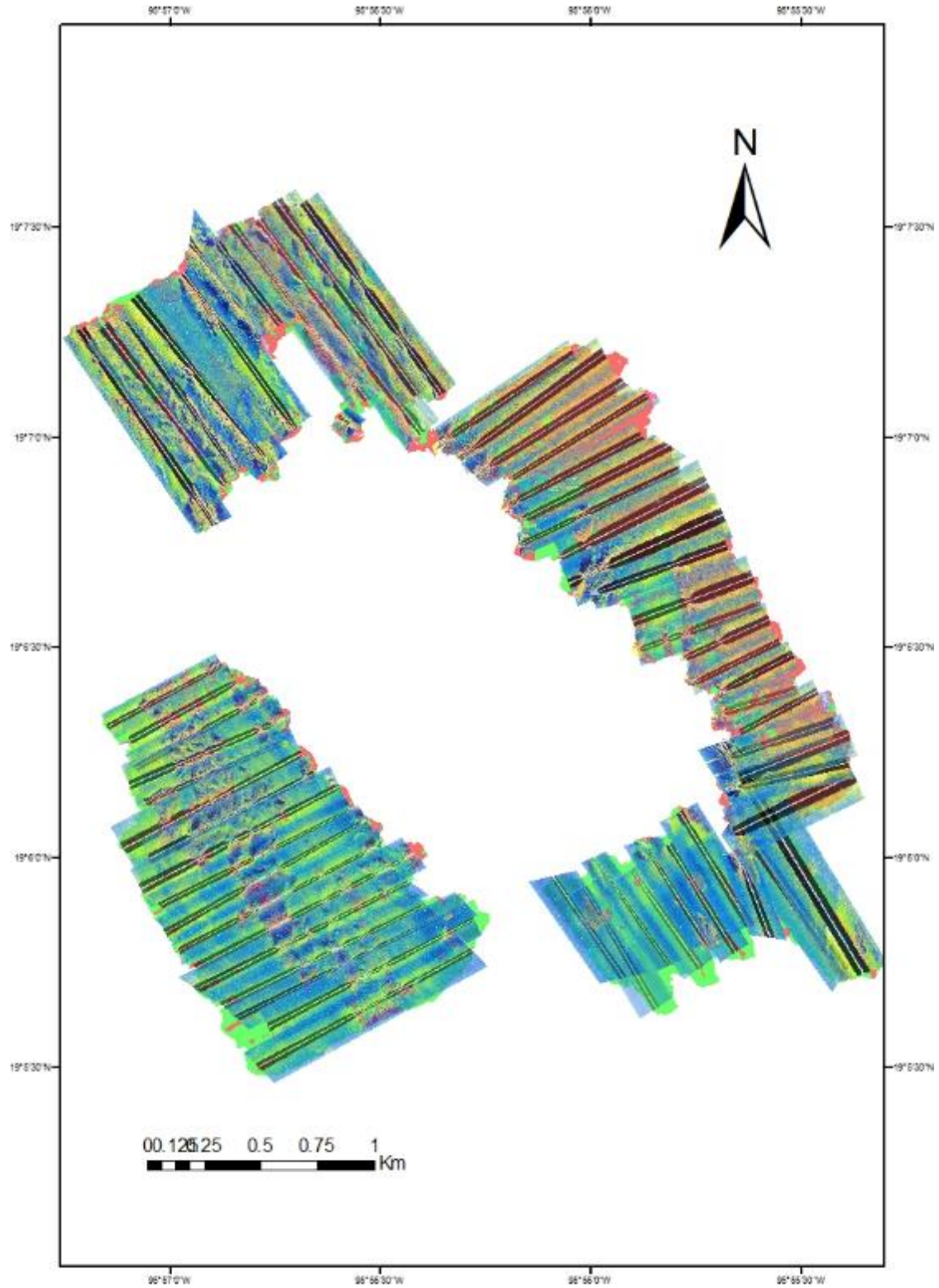


Figura 19. Mosaico con imágenes digitales del SBL ajustadas al mapa automatizado de clases acústicas.

Métricas del paisaje

En el mapa automatizado de clases acústicas se realizó un corte a la isóbata de 10 m y 20 m, los cuales sirvieron para realizar las métricas del paisaje a las dos profundidades (Fig. 20). A partir del cálculo de los índices de las métricas seleccionadas, las cuales se centran en características como dimensión, número de fragmentos, distancia y conectividad que conforman el área de estudio, se llevaron a cabo los cálculos para el paisaje, clase, zona y profundidad, con ello fue posible identificar los cambios dentro del arrecife Enmedio.

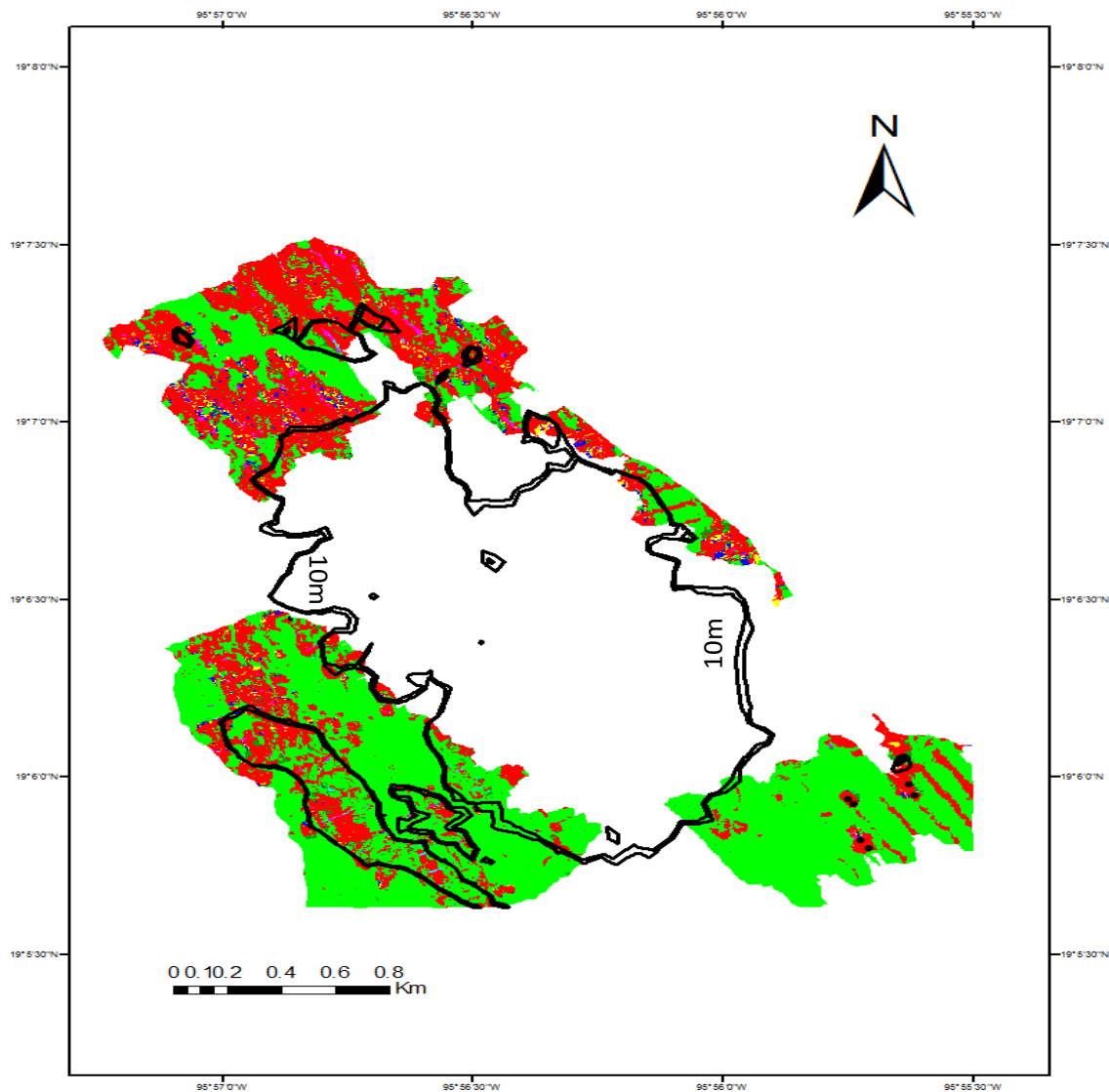


Figura 20. Mapa con un corte a la isóbata de 10 m.

El área total del arrecife es de 308 ha, dentro de esta se determinaron los datos numéricos a nivel clase, los cuales indicaron que el sustrato no consolidado (arena) obtuvo una mayor área con 194.89 ha (Tabla 3). La clase consolidada posee un área de 107.81 ha, 473 parches (NP), un LPI pequeño y de una forma irregular, representa un paisaje altamente fragmentado.

Tabla 3. Valores de las métricas del paisaje (unidades), por clase en el arrecife De Enmedio

Clase	CA (ha) Área de la clase	NP (#) Numero de parches	LPI (%) Índice del parche más grande	SHAPE Índice de la forma	PROX Proximidad
No consolidado	194.89	479	44	26	3445
Consolidado	107.81	473	15	29	1166

En cada una de las zonas existieron diferencias entre las dos clases reportadas. En el caso de la zona Norte se observó que el sustrato consolidado tiene una mayor área (61 ha) (Tabla 4) y un menor número de parches (110), los cuales nos indican que no es una clase tan fragmentada y con el índice de proximidad nos arroja una cercanía entre dichos parches, con una forma irregular y de tamaño grande.

En la zona Oeste el sustrato no consolidado obtuvo la mayor área con 97.41 ha, mayor índice de parche más grande, mayor índice de forma y mayor proximidad; el sustrato consolidado presentó el mayor número de parches. Estos resultados indican que el paisaje del sustrato consolidado está altamente fragmentado, con parches de tamaño pequeño y forma irregular. En la zona Sur el comportamiento fue muy similar.

Tabla 4. Valores de las métricas del paisaje por clase y zona en el arrecife De Enmedio.

Zona	Clase	CA (ha) Área de la clase	NP (#) Numero de parches	LPI (%) Índice del parche más grande	SHAPE Índice de la forma	PROX Proximidad
Norte	No consolidado	36.61	302	4.85	5.23	133.36
	Consolidado	61.00	110	10.01	12.08	903.75
Oeste	No consolidado	97.41	110	12.56	10.19	1436.30
	Consolidado	29.35	260	2.36	7.13	138.95
Sur	No consolidado	54.80	28	24.17	5.84	1843.93
	Consolidado	8.69	67	1.06	4.29	20.86
Este	No consolidado	6.07	39	1.97	4.39	31.89
	Consolidado	8.77	36	1.81	5.95	102.04

En cuanto a la profundidad, se encontró que la profundidad > 10 m obtuvo un área con 236.93 ha y fue la profundidad con más superficie; la profundidad < 10 m obtuvo un área de 65.76 ha. Para la profundidad > 10 m los valores del sustrato consolidado en cuanto a número de parches (296), índice del parche más grande (pequeños) y la proximidad, indican que es un paisaje altamente fragmentado (Tabla 5).

Tabla 5. Valores de las métricas del paisaje por clase y profundidad en el arrecife De Enmedio.

Profundidad	Clase	CA (ha) Área de la clase	NP (#) Numero de parches	LPI (%) Índice del parche más grande	SHAPE Índice de la forma	PROX Proximidad
<10	No consolidado	40.15	127	4.88	10.18	373.00
	Consolidado	25.62	177	3.22	10.47	188.86
>10	No consolidado	154.74	352	38.67	15.47	3072.48
	Consolidado	82.19	296	12.02	18.98	976.74

Rugosidad topográfica

Se llevó a cabo una clasificación en intervalos del valor de la complejidad como lo muestra la Tabla 6, las clasificaciones se dieron según los patrones de la forma del relieve, donde “baja complejidad” estuvo conformada por planicies con pequeñas elevaciones rocosas, “moderada complejidad” por relieves irregulares con pequeñas grietas y “alta complejidad” por cambios abruptos de pendiente con grandes grietas.

Tabla 6. Clasificación del valor de complejidad.

Baja complejidad	Moderada complejidad	Alta complejidad
0 a 0.33	0.34 a 0.66	0.67 a 1

El arrecife De Enmedio tuvo una complejidad del 0.37, lo que indica que tiene una moderada complejidad. Dentro de las zonas del arrecife se observaron cambios en cuanto a la complejidad del hábitat. Las zonas Norte, Este y Sur presentaron valores de 0.4 a 0.42, por lo que son áreas con moderada complejidad. La zona Oeste, con un valor de 0.30, mostro una baja complejidad (Fig.21).

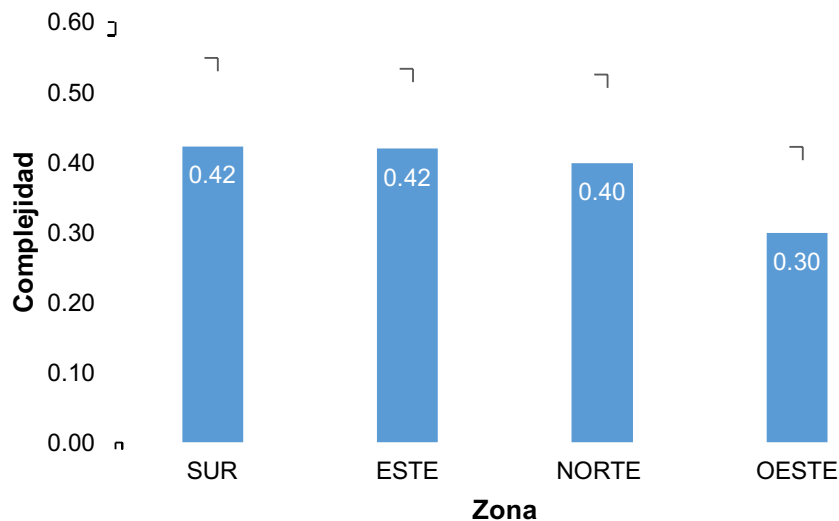


Figura 21. Índice de complejidad del hábitat para cada zona del arrecife De Enmedio.

Curvas de acumulación

Debido al esfuerzo de muestreo en las diferentes zonas se realizaron curvas de acumulación, dando como resultado que con el muestreo realizado se logró un inventario de ~ 87 % de la riqueza específica estimada para el arrecife De Enmedio ajustados a los datos de peces con el estimador no paramétrico Chao1 (Tabla 7 y Fig. 22).

Tabla 7. Riqueza estimada con Chao1 ajustados a los datos de peces.

	Sobs	Chao1	% de riqueza estimada
Norte	44	48	91 %
Oeste	58	74	78 %
Este	41	45	91 %
Sur	35	39	89 %

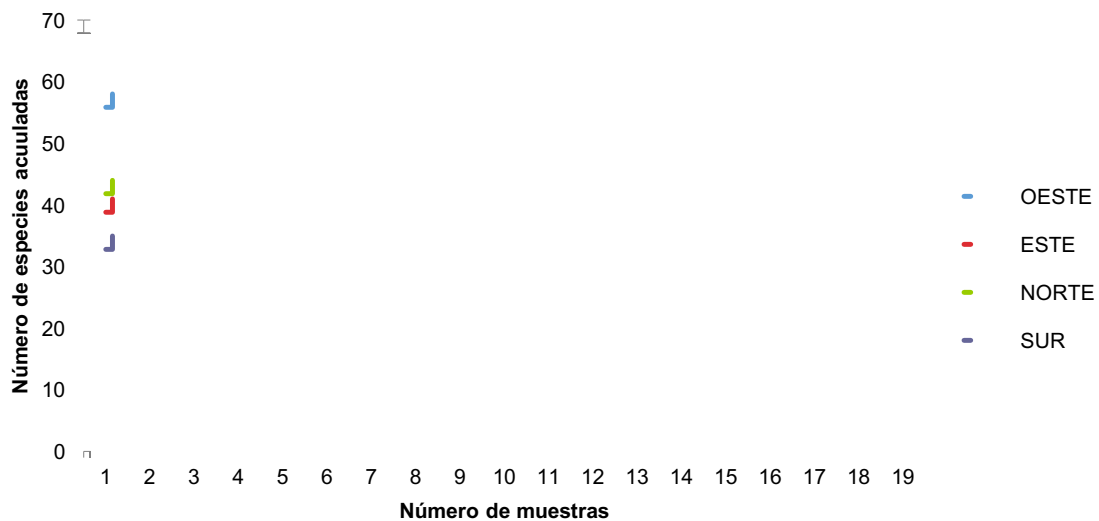


Figura 22. Curvas de acumulación de especies (Sobs) de las cuatro Zonas en el arrecife De Enmedio, ajustados a los datos de peces.

Con el esfuerzo de muestreo realizado se logró un inventario de ~ 92 % de la riqueza específica estimada para el arrecife De Enmedio ajustados a los datos de coral, fue con el estimador no paramétrico Chao2 (Tabla 8 y Fig. 23).

Tabla 8. Riqueza estimada con Chao2 ajustados a los datos de corales.

	Sobs	Chao2	% de riqueza estimada
Norte	15	17	88 %
Oeste	18	19	95 %
Este	11	13	85 %
Sur	12	12	100 %

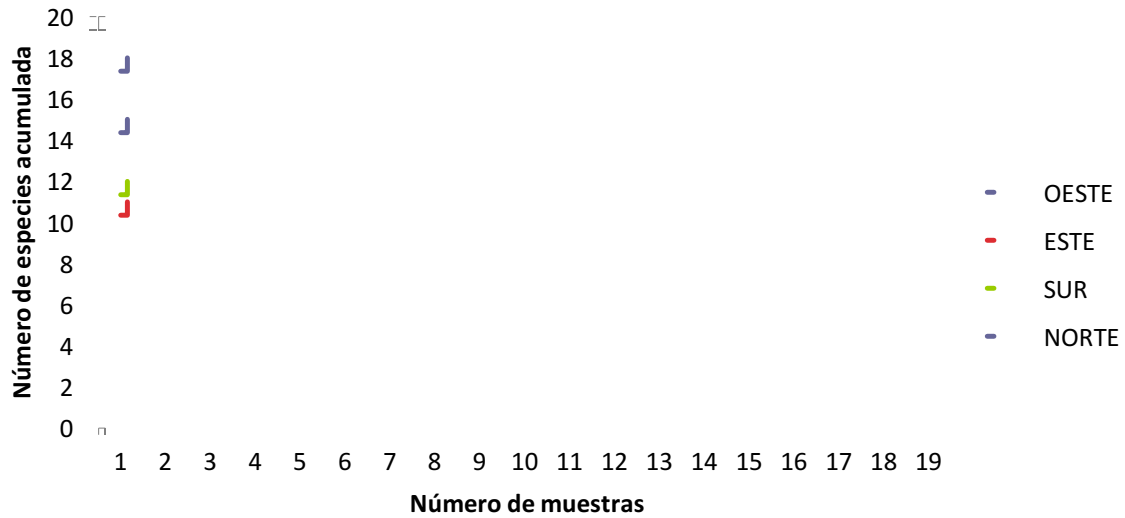


Figura 23. Curvas de acumulación de especies de las cuatro Zonas en el arrecife De Enmedio, ajustados a los datos de corales.

Índices ecológicos de peces

En el análisis de peces se encontró una abundancia total de 22,130 individuos, correspondientes a 23 familias, 45 géneros y 69 especies. La familia con mayor abundancia fue Gobiidae, con una abundancia total de 12,586 organismos, seguida de Pomacentridae con 5,276 y Labridae con 3,039 (Fig. 24).

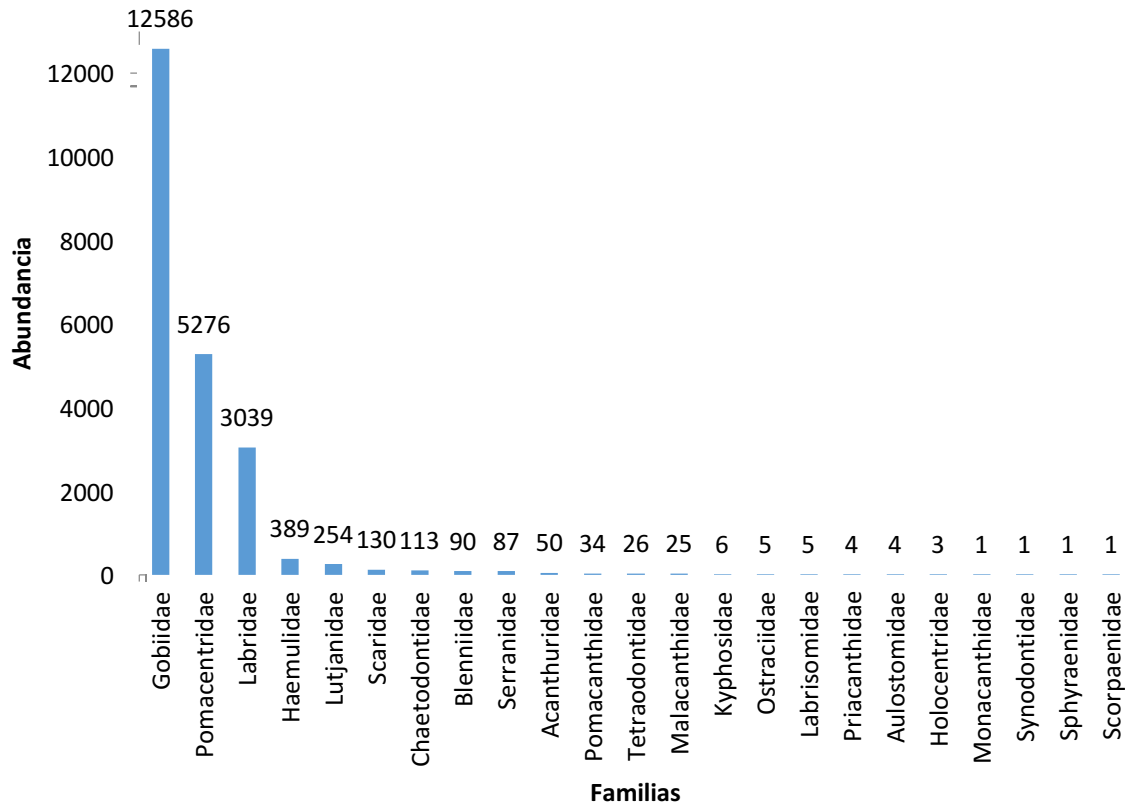


Figura 24. Abundancia por familia en el arrecife De Enmedio.

Las especies con mayor abundancia fueron: *Coryphopterus personatus/hyalinus* con 11,132 individuos que representan el 50.3%, seguido por *Chromis multilineata* con 2,726 individuos (12.3%), *Halichoeres burekae* con 2,322 individuos (10.5%), *Elacatinus jarocho* con 1,318 individuos (6%), *Abudefduf saxatilis* con 1,013 individuos (4.6%), juntas representan el 83.6% de la abundancia total, mientras que el resto de las especies registraron valores de abundancia inferiores a 1000 individuos (Fig.25).

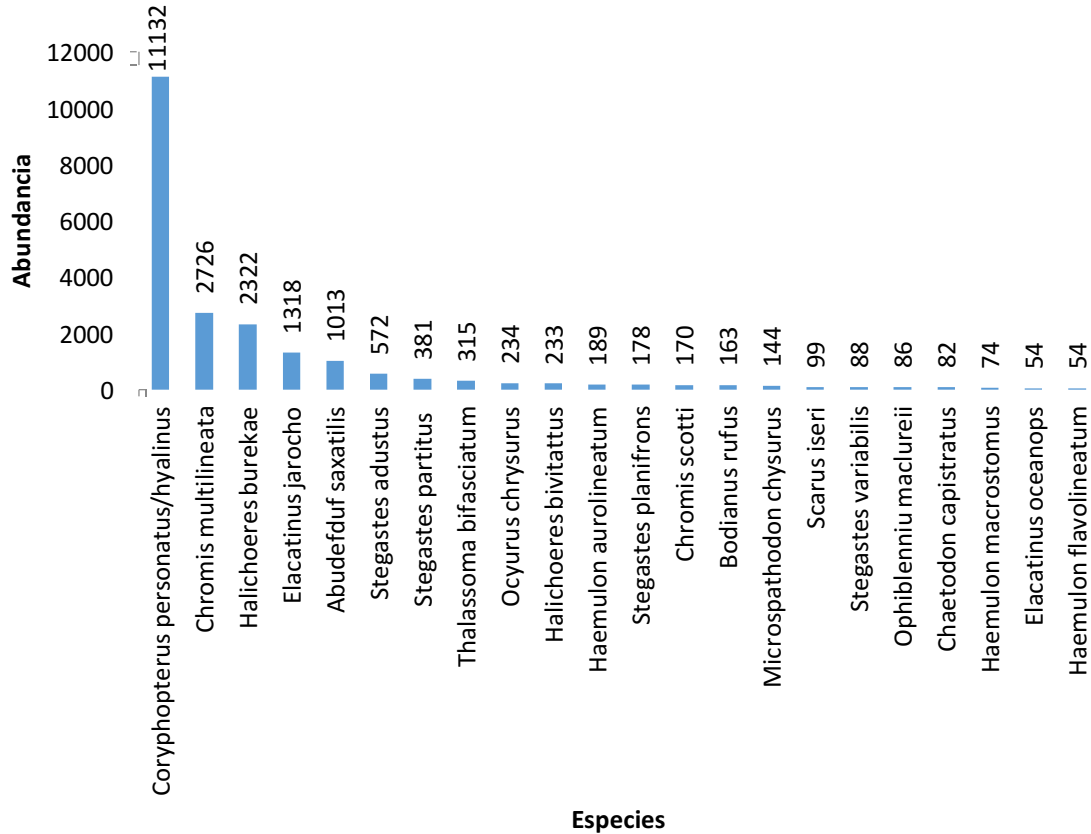


Figura 25. Abundancia total por especie en el arrecife de Enmedio.

En cuanto a las zonas, se encontró que la zona con mayor abundancia promedio es Oeste con 571 individuos y de menor abundancia la zona Sur con 356 individuos (Fig. 26). Respecto a la riqueza de especies los valores promedios más altos se presentan en zona Oeste con 17 especies, seguido de las zonas Este y Sur con 16 especies respectivamente. La zona con menor riqueza de especies promedio fue el Norte con 15 especies (Fig. 27). Cabe destacar que la zona Oeste cuenta con la mayor abundancia y riqueza.

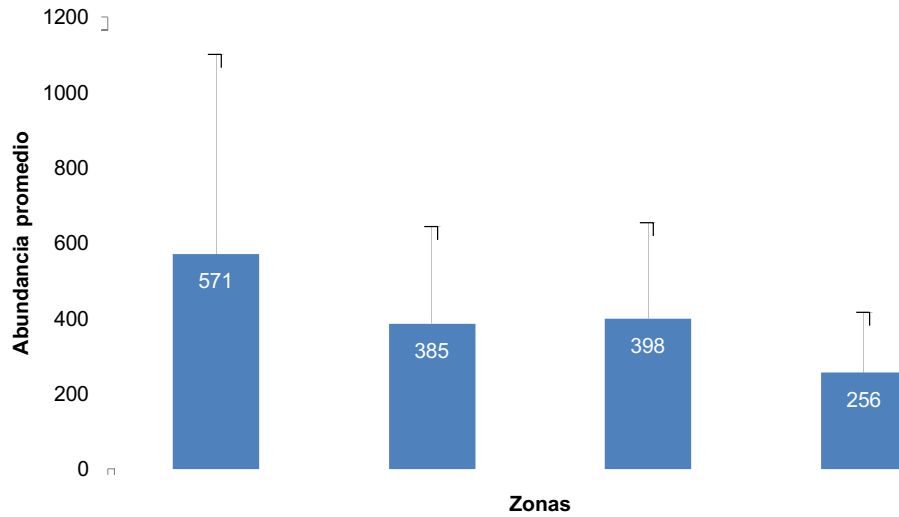


Figura 26. Abundancia promedio por zonas en el arrecife De Enmedio.

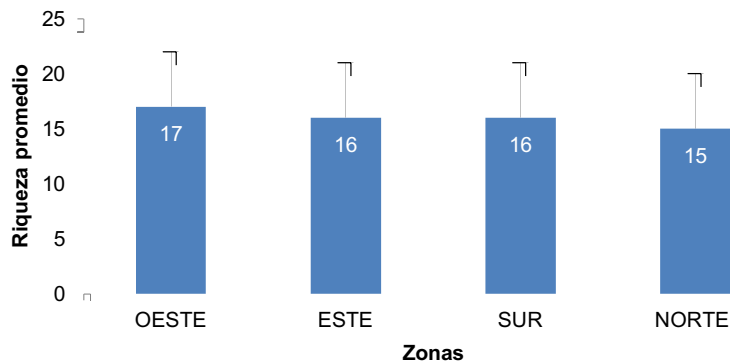


Figura 27. Riqueza de especies promedio por zona en del arrecife De Enmedio.

Respecto a la presencia de especies, en la Tabla 7 se muestra qué especies se registraron en cada zona. Se encontró que la mayoría de las especies estuvieron presentes en cada zona; sin embargo, hubo especies que solo tuvieron presencia en una sola zona tales como: *Synodus Intermedius*, *Stegastes leucostictus*, *Chromis insolata*, *Sphoeroides spengleri*, *Parablenius marmoreus*, *Cephalopolis cruentata*, *Lutjans griseus*, *Scorpaena plumieri*, *Pomacanthus hybrido*, *Nicholsina usta*, *Chaetodon sedentarium*, *Lutjanus jocu*, *Sparisoma aurofrenatum*, *Kiphosus sectatrix*, *Cephalopolis cruentatus*, *Cantherinis pullus* y *Labrisomus nuchipinnis*.

Tabla 9. Registro de la presencia de especies en el arrecife De Enmedio por zonas.

	NORTE	ESTE	OESTE	SUR
<i>Coryphopterus personatus/hyalinus</i>	1	1	1	1
<i>Stegastes adustus</i>	1	1	1	1
<i>Chaetodon capistratus</i>	1	1	1	1
<i>Stegastes planifrons</i>	1	1	1	1
<i>Stegastes partitus</i>	1	1	1	1
<i>Synodus Intermedius</i>	0	0	1	0
<i>Scarus iseri</i>	1	1	1	1
<i>Hypoplectrus castroaguirrei</i>	1	0	1	0
<i>Coryphopterus glaucofraenum</i>	1	1	1	1
<i>Stegastes leucostictus</i>	0	0	1	0
<i>Elacatinus oceanops</i>	1	1	1	1
<i>Haemulon aurolineatum</i>	1	1	1	1
<i>Halichoeres bivittatus</i>	1	1	1	1
<i>Chaetodon ocellatus</i>	1	1	1	1
<i>Anisotremus virginicus</i>	1	1	1	1
<i>Chromis insolata</i>	0	0	1	0
<i>Halichoeres burekai</i>	1	1	1	1
<i>Chromis multilineata</i>	1	1	1	1
<i>Ocyurus chrysurus</i>	1	1	1	1
<i>Sphoeroides spengleri</i>	0	0	1	0
<i>Hypoplectrus nigricans</i>	1	0	1	1
<i>Haemulon flavolineatum</i>	1	1	1	0
<i>Parablenius marmoreus</i>	0	0	1	0
<i>Thalassoma bifasciatum</i>	1	1	1	1
<i>Elacatinus redimiculus</i>	1	1	1	0
<i>Cephalopolis cruentata</i>	0	0	1	0
<i>Lutjans griseus</i>	0	0	1	0
<i>Sparisoma viride</i>	1	1	1	1
<i>Stegastes variabilis</i>	1	1	1	1
<i>Priacanthus arenatus</i>	0	1	1	0
<i>Epinephelus adscensionis</i>	1	1	1	1
<i>Scarus taeniopterus</i>	1	0	1	0
<i>Bodianus rufus</i>	1	1	1	1
<i>Holacanthus bermudensis</i>	1	0	1	0
<i>Rhinesomus triqueter</i>	1	1	1	0
<i>Malacoctenus triangulatus</i>	1	1	1	0
<i>Pomacanthus paru</i>	1	1	1	1
<i>Scorpaena plumieri</i>	0	0	1	0
<i>Canthigaster rostrata</i>	1	1	1	1

<i>Pomacanthus hybridus</i>	0	0	1	0
<i>Chromis scotti</i>	1	1	1	1
<i>Clepticus parrae</i>	0	0	1	1
<i>Mycteroperca bonaci</i>	1	0	1	0
<i>Haemulon macrostomus</i>	1	1	1	1
<i>Anisotremus surinamensis</i>	1	1	1	1
<i>Chaetodon sedentarium</i>	0	0	1	0
<i>Nicholsina usta</i>	0	0	1	0
<i>Acanthurus chirurgus</i>	1	1	1	1
<i>Sphoeroides spengleri</i>	0	0	1	0
<i>Lutjanus jocu</i>	0	0	1	0
<i>Sparisoma aurofrenatum</i>	0	0	1	0
<i>Abudefduf saxatilis</i>	1	1	1	1
<i>Ophiblenius maclurei</i>	1	1	0	0
<i>Microspathodon chrysurus</i>	1	1	1	1
<i>Holocentrus adscensionis</i>	1	1	0	0
<i>Lutjanus mohogoni</i>	1	0	0	0
<i>Scarus vetula</i>	1	0	0	0
<i>Sphyræna barracuda</i>	1	0	0	0
<i>Elacatinus jarocho</i>	1	1	1	1
<i>Sparisoma rubripinne</i>	0	1	0	0
<i>Lutjanus gryseus</i>	0	1	0	0
<i>Aulostomus maculatus</i>	0	1	1	0
<i>Kipphosus sectatrix</i>	0	1	0	0
<i>Labrisomus nuchipinnis</i>	0	1	0	0
<i>Acanthurus Bahianus</i>	0	0	1	1
<i>Cantherinis pullus</i>	0	0	0	1
<i>Cephalopolis cruentatus</i>	0	0	0	1

Por profundidad, se observó que las áreas > 10 m tuvieron la mayor abundancia, con 12,394 individuos y una riqueza de 58 especies. La profundidad < 10 m presentó 9,704 individuos y una riqueza de 56 especies. La zona Oeste fue la de mayor abundancia para ambas profundidades (Fig. 28).

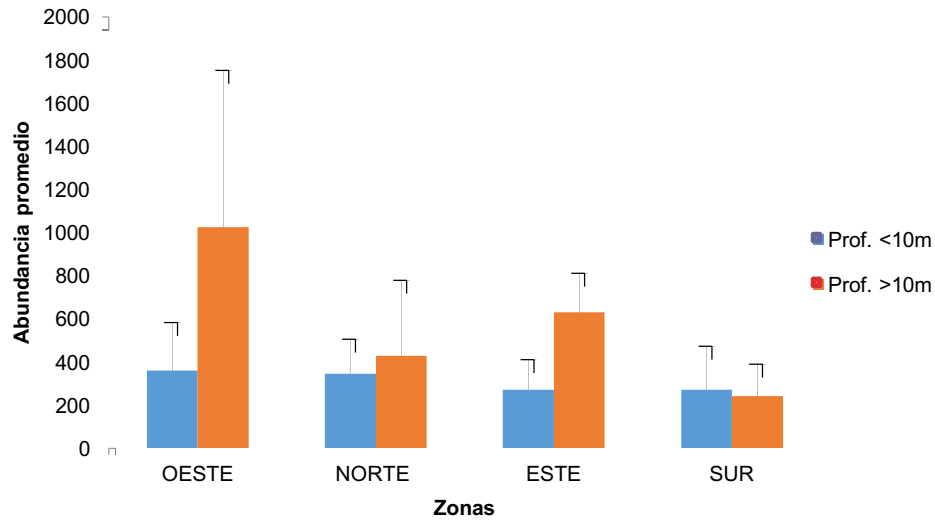


Figura 28. Grafica de la abundancia total por profundidad en cada zona del arrecife De Enmedio. Para la riqueza de especies, la zona Este presentó los valores más altos en la profundidad <10m; sin embargo, la zona Oeste >10 m tuvo una mayor riqueza. En las zonas Norte la profundidad <10 m presentó los valores más bajos de riqueza (Fig. 29).

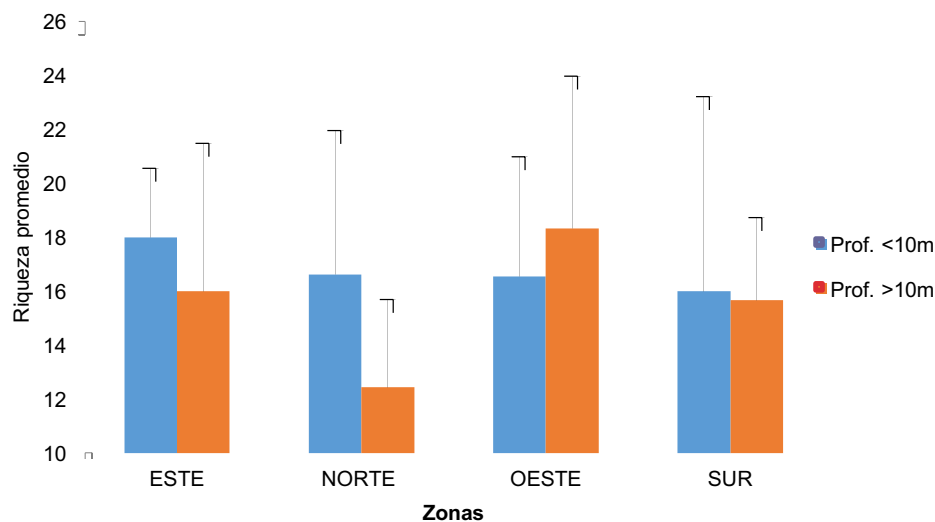


Figura 29. Riqueza de especies por profundidad en cada zona De Enmedio.

En cuanto a los valores de los índices ecológicos por zona arrecifal, abundancia, riqueza, diversidad de Shannon, equidad de Pielou y dominancia se muestran en la Tabla 10. El valor más alto del índice de diversidad de Shannon (H) se registró en la zona Este (2.24 bits/ind). Los valores de equidad (J) en la zona Este presentó el valor más alto, el valor más alto de dominancia (D) fue en la zona Oeste (0.46) (Tabla 8). Al realizarles una prueba de Kruskal-Wallis se determinó que las diferencias no son significativas entre las zonas con una $p > 0.05$.

Tabla 10. Valores de los índices ecológicos por zona en el arrecife De Enmedio.

	NORTE	ESTE	OESTE	SUR
Riqueza (S)	44	41	58	35
Abundancia (N)	5771	3976	10,848	1535
Dominance (D)	0.24	0.16	0.46	0.25
Shannon (H)	2.04	2.24	1.49	1.99
Equitability (J)	0.53	0.60	0.36	0.56

Análisis estadísticos

Se llevaron a cabo análisis del coeficiente de similitud de las comunidades ícticas entre las diferentes zonas. Al hacer el análisis por zona mediante el *n-MDS* (Fig.30), no se distinguió un patrón claro, los datos se distribuyen en una nube homogénea, lo cual nos indica que las zonas no explican un patrón de distribución de los peces.

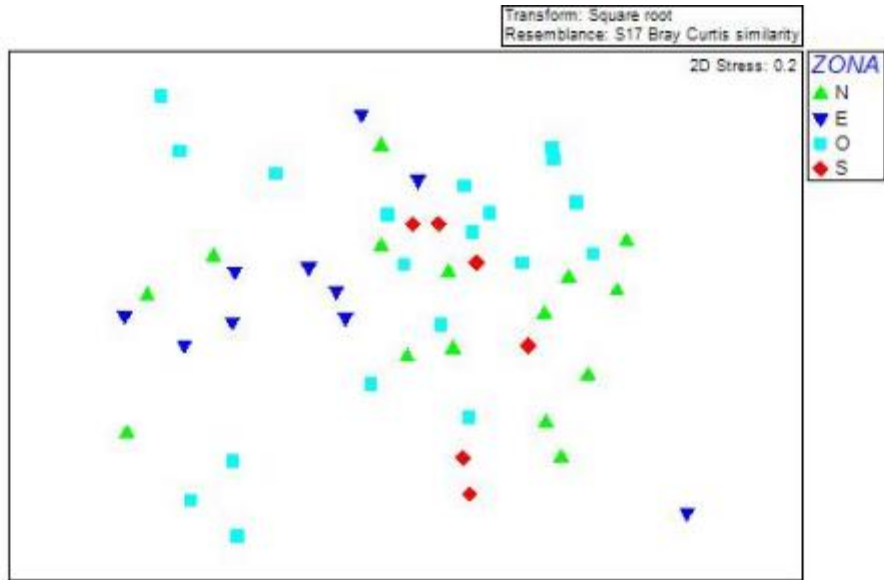


Figura 30. No se distingue un patrón de agrupamiento de peces entre zonas.

Al analizarlos por profundidad se distingue una separación entre profundidades <10 m y >10 m. (Fig. 31), el análisis ANOSIM determina que existen diferencias significativas entre las profundidades (R global= 0.13, $P < 0.05$) estimada por especies.

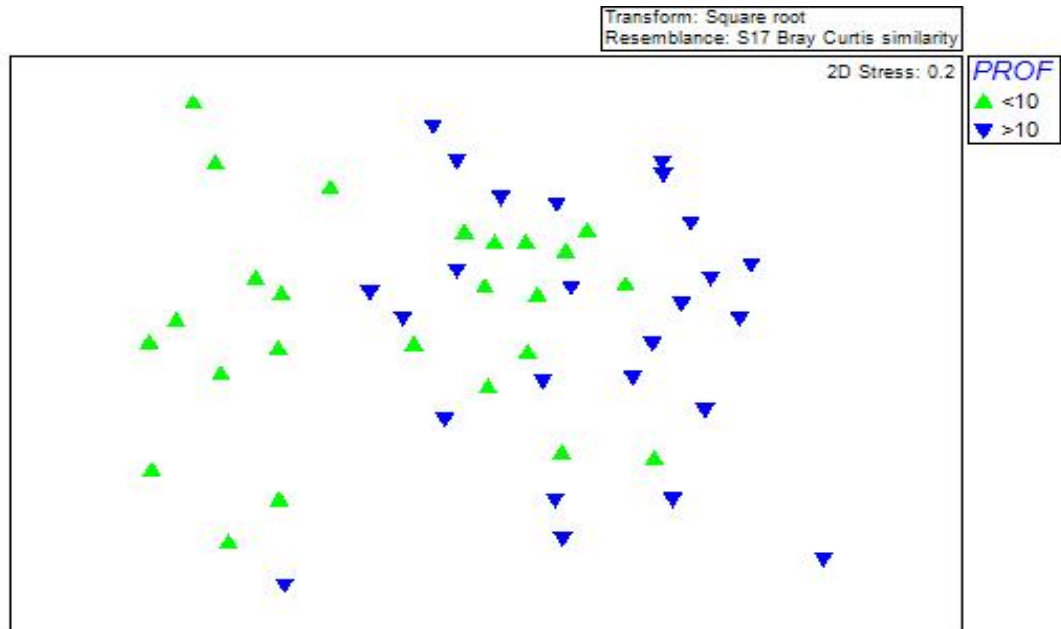


Figura 31. Gráfica de escalamiento multidimensional (MDS) mostrando un patrón de agrupamiento por profundidad.

Índices ecológicos de corales

Se reportó un total de 10 familias, 15 géneros y 22 especies. La familia con mayor abundancia relativa fue Faviidae, con 76.51 %, la familia Acroporidae con 0.54 %, presentó la menor abundancia relativa (Fig. 32). La cobertura total del arrecife fue de 16.50 %.

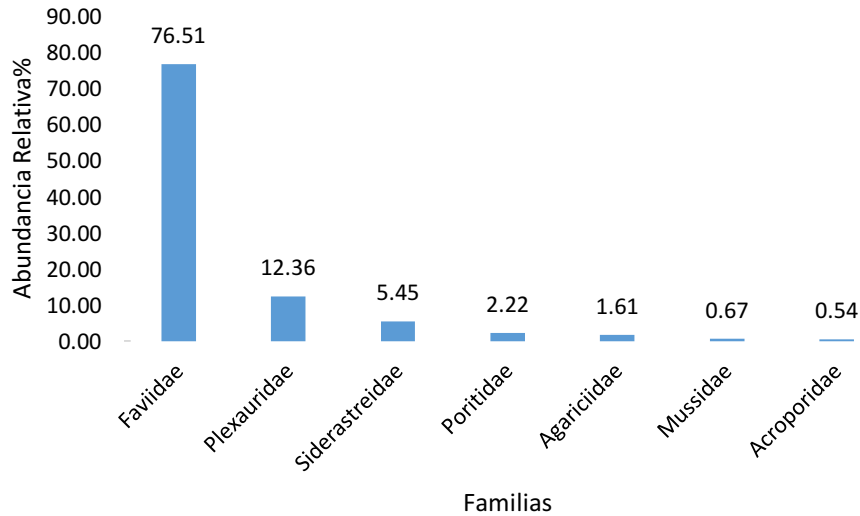


Figura 32. Porcentaje de abundancia relativa por familia en el arrecife De Enmedio.

Las especies con mayor abundancia relativa fueron *Orbicela faveolata* con 43.73 %, seguido por *Colpophyllia natans* con 12.77 % y *Pseudodiploria strigosa* con el 9.82%, juntas representan el 66.32% de la abundancia relativa total. El resto de las especies registró valores de abundancia relativa inferiores a 9 % (Fig. 33). En la Zona Oeste se encontró la mayor abundancia con el 54.94 % (Fig. 34), encontrando para la misma zona la mayor riqueza con 18 especies (Fig. 35).

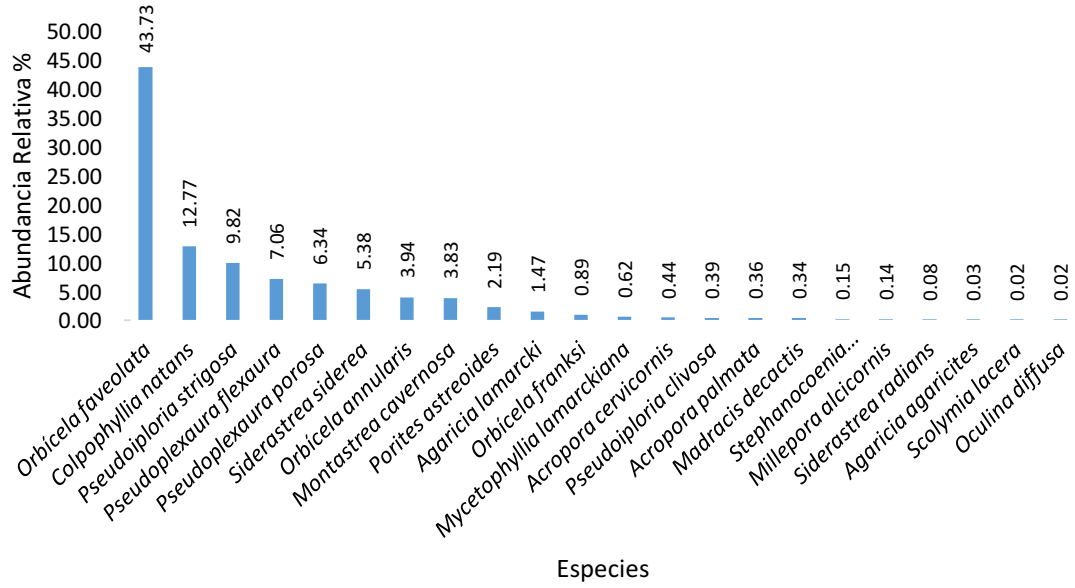


Figura 33. Abundancia relativa por especie en el arrecife De Enmedio.

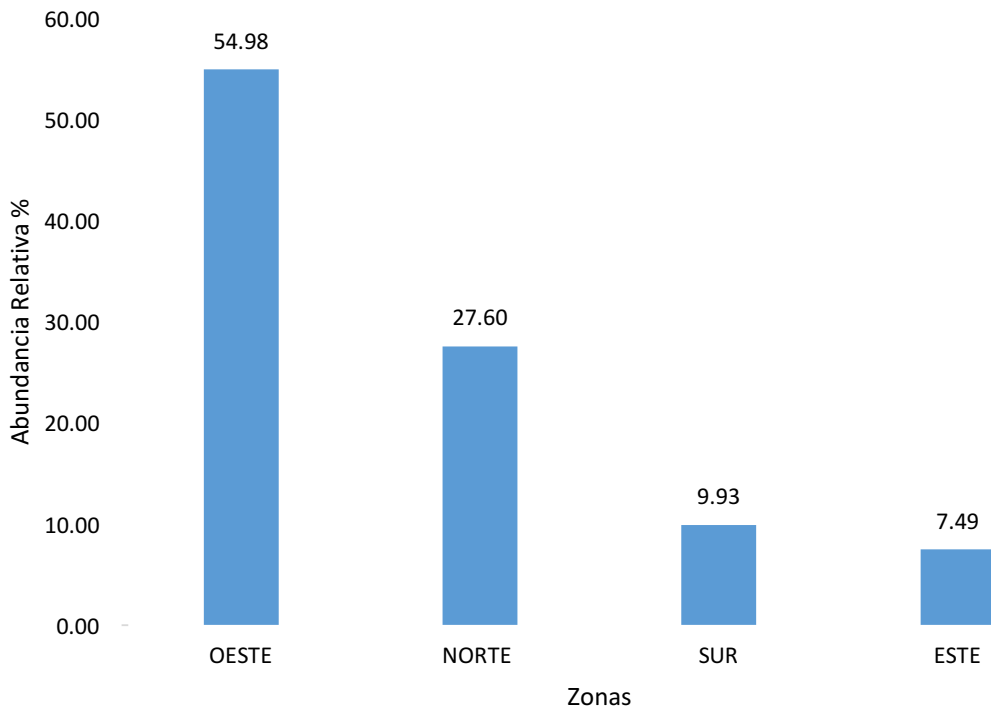


Figura 34. Abundancia relativa por zona dentro en el arrecife De Enmedio.

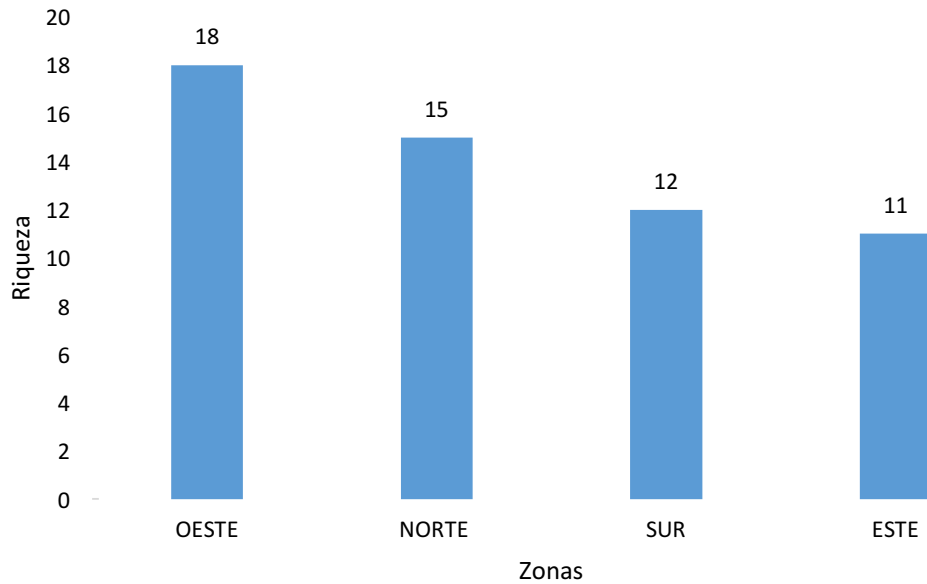


Figura 35. Riqueza específica en cada zona del arrecife De Enmedio.

En la Tabla 9 se muestran las especies por zona; puede verse que *Stephanocoenia intersepta*, *Siderastrea radians*, *Pseudoplexaura porosa* y *Pseudoplexaura flexaura* solo se encontraron en la zona Oeste. La especie *Scolymia lacera* solo se registró para la zona Norte, *Oculina diffusa* solo se registró en la zona Sur y *Acropora palmata* y *Agaricia agaricites* solo se encontraron en la zona Este. Por otro lado hubo especies que se registraron en todas las zonas tales como *Siderastrea siderea*, *Pseudoiploria strigosa*, *Porites astreoides*, *Orbicela faveolata*, *Orbicela annularis*, *Mycetophyllia lamarckiana*, *Montastrea cavernosa* y *Colpophyllia natans*.

Tabla 11. Presencia de especies por zona en el arrecife De Enmedio.

	NORTE	ESTE	OESTE	SUR
<i>Acropora cervicornis</i>	1	0	1	0
<i>Acropora palmata</i>	0	1	0	0
<i>Agaricia agaricites</i>	0	1	0	0
<i>Agaricia lamarcki</i>	1	0	1	1
<i>Colpophyllia natans</i>	1	1	1	1
<i>Madracis decactis</i>	1	0	1	1
<i>Millepora alcicornis</i>	1	0	1	0
<i>Montastrea cavernosa</i>	1	1	1	1
<i>Mycetophyllia lamarckiana</i>	1	1	1	1

<i>Oculina diffusa</i>	0	0	0	1
<i>Orbicela annularis</i>	1	1	1	1
<i>Orbicela faveolata</i>	1	1	1	1
<i>Orbicela franksi</i>	1	0	1	1
<i>Porites astreoides</i>	1	1	1	1
<i>Pseudoiploria clivosa</i>	1	1	1	0
<i>Pseudoiploria strigosa</i>	1	1	1	1
<i>Pseudoplexaura flexaura</i>	0	0	1	0
<i>Pseudoplexaura porosa</i>	0	0	1	0
<i>Scolymia lacera</i>	1	0	0	0
<i>Siderastrea radians</i>	0	0	1	0
<i>Siderastrea siderea</i>	1	1	1	1
<i>Stephanocoenia intersepta</i>	0	0	1	0

Al analizarse por profundidad se observó que a <10m se presentó la mayor abundancia relativa, con 66.06 % y una riqueza de 20 especies. La profundidad >10 m tuvo una abundancia relativa de 33.94 % con una riqueza de 14 especies. En la profundidad <10 m en la zona Oeste presentó la mayor abundancia. El valor más bajo también se presentó a <10 m en la zona Este (Fig. 36).

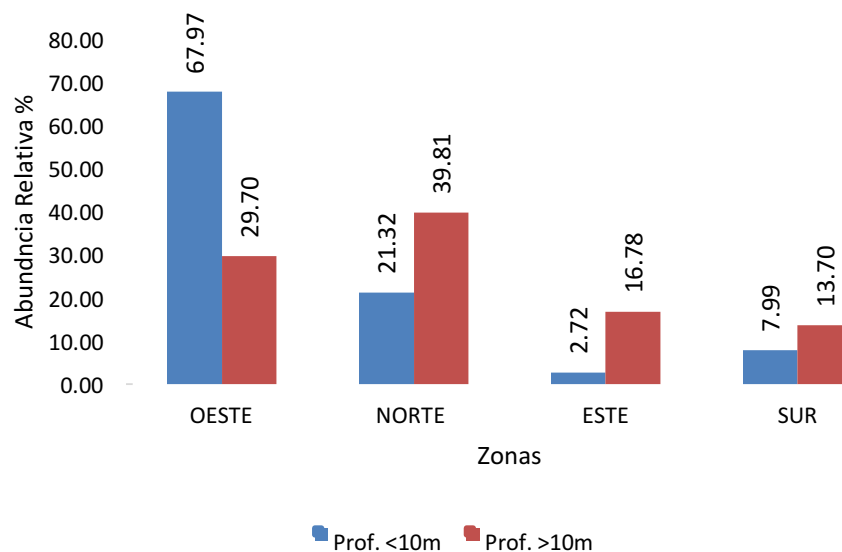


Figura 36. Abundancia relativa por profundidad en las zonas del arrecife De Enmedio.

Respecto a la riqueza, nuevamente la zona <10 m presentó los valores extremos; la zona Oeste los valores más altos y la zona Este tuvo la menor riqueza (Fig. 37).

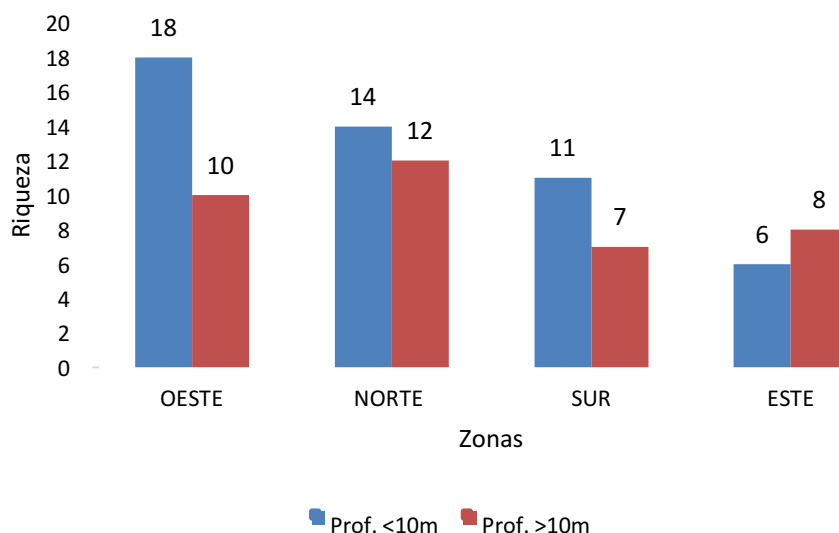


Figura 37. Riqueza específica por profundidad en cada zona del arrecife De Enmedio.

Respecto a los índices ecológicos, el índice de diversidad de Shannon (H) registró el valor más alto (2.03 bits/ind) en la zona Oeste, la equidad (J) en la zona Oeste (0.70), el valor más alto de dominancia (D) fue en la zona Norte (0.37) (Tabla 10). Se determinó que las diferencias no son significativas entre las zonas (valor del estadístico, $p > 0.05$).

Tabla 12. Valores de los índices de diversidad en cada zona del arrecife De Enmedio.

	NORTE	ESTE	OESTE	SUR
Riqueza (S)	15	11	18	12
Abundancia (N)	220	56	445	78
Dominance (D)	0.37	0.33	0.19	0.31
Shannon (H)	0.56	0.59	0.70	0.60
Equitability (J)	1.50	1.41	2.03	1.49

Análisis estadísticos

En cuanto a la diversidad beta de las comunidades coralinas por zonas mediante el coeficiente de similitud con Bray-Curtis, en el diagrama *n*-MDS no se distingue claramente un patrón de los datos, los cuales se distribuyen en una nube homogénea (Fig. 38).

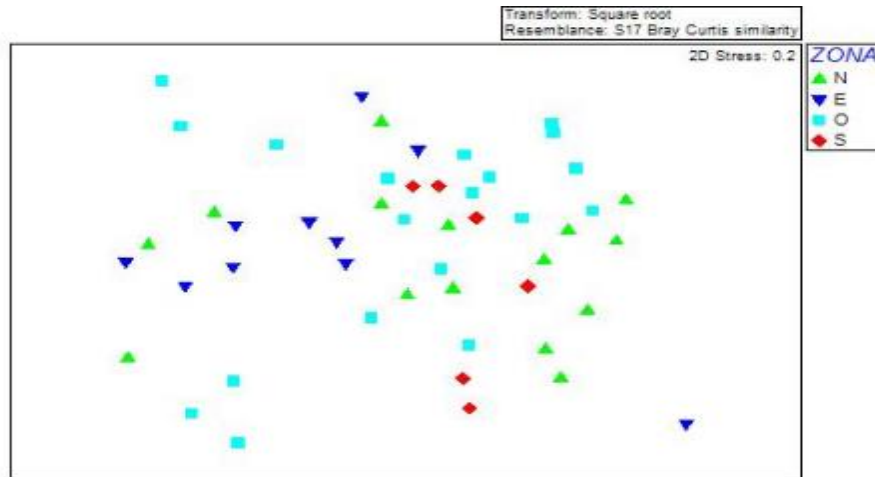


Figura 38. Gráfica de escalamiento multidimensional (MDS) donde no se observa un patrón de agrupamiento.

Al analizarlo por profundidad se distinguen dos grupos; los de la profundidad <10 m y los de profundidad >10m., el análisis ANOSIM determina que existe diferencias significativas entre las profundidades ($R_{\text{global}} = 0.18$, $P < 0.005$) estimada por especies (Fig. 39).

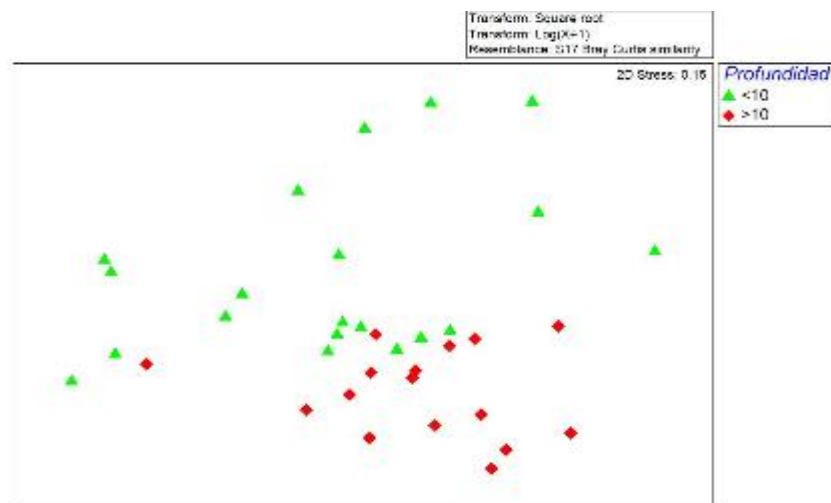


Figura 39. Gráfica de escalamiento multidimensional (MDS) de corales donde se distingue una separación.

Correlación entre métricas del paisaje-diversidad de peces y corales.

La correlación entre las métricas del paisaje y la diversidad de peces y corales, se llevó a cabo mediante la prueba BIO-ENV. Se encontró que las variables ambientales que tuvieron una mayor correlación con la diversidad de peces fue el número de parches (NP), con una relación lineal positiva ($r= 0.536$) (Tabla 11). Sin embargo, este valor no fue significativo ya que mostró una $p=0.074$.

Tabla 13. Resultado del BIO-ENV entre las matrices de métrica de paisaje y de peces. CA = área de la clase, NP = número de parches, LPI = índice del parche más grande.

No. Variables	Coefficiente de correlación de Spearman	Combinación de variables
1	0.536	NP
2	0.238	CA, NP
2	0.143	NP, LPI

En cuanto a la diversidad de corales, el valor de Rho con mayor correlación lo obtuvo igualmente el número de parches (NP) (Tabla 12).

Tabla 14. Resultado del BIO-ENV entre las matrices de métrica de paisaje y biológicas de corales, CA = área de la clase, NP = número de parches, LPI = índice del parche más grande, SHAPE = índice de la forma y PROX = proximidad.

No. Variables	Coefficiente de correlación de Spearman	Combinación de variables
1	0.264	NP
2	-0.037	CA, NP
1	-0.125	NP

DISCUSIÓN

A partir de los resultados en el arrecife De Enmedio se estableció que la zona Noreste tiene una gran pendiente con un relieve en su mayoría irregular y valles; hacia suroeste se observaron dos cordilleras con bajo relieve y una gran planicie con algunas formaciones rocosas que conducen a inferir características morfológicas y patrones de complejidad topográfica, por tanto la caracterización de los arrecifes de coral dentro del PNSAV son importantes ya que nos da un reflejo claro de la configuración espacial y estructural, mostrando así el estado actual de los hábitats presentes en estos ambientes. Conviene subrayar que para esto se utilizó un perfilador sísmico que realiza la caracterización del fondo marino a través de señales sísmicas, con lo cual, se establece el espesor, profundidad y litología de los estratos que constituyen el subsuelo de alguna región (Dobrin, 1975), el cual arroja como resultado los perfiles de fondo en las diferentes zonas, pudiendo así determinar con precisión los relieves y los sustratos presentes que fueron sustrato no consolidado (arena) y sustrato consolidado (roca). Huvenne et al. (2002) utilizó esta herramienta en arrecifes y en sus perfiles del subfondo encontró montículos con texturas más ásperas, las cuales se deben a la presencia de corales y su fauna asociada. Otros investigadores que realizaron trabajos de caracterización que concuerdan con el presente trabajo como Lara *et al.* (1992), que menciona que el arrecife De Enmedio tiene una gran pendiente suave de sotavento y hacia barlovento es común encontrar un armazón calcáreo hecho de restos de *Acropora palmata*. Además, Vargas-Hernández *et al.* (1993) menciona que en el arrecife De Enmedio la pendiente de barlovento se extiende a una profundidad máxima de 25 m en tanto la de sotavento se extiende a una profundidad de 22 m. Asimismo Pérez-España y Vargas-Hernández (2008) años más adelante mencionan que la pendiente de sotavento (15 m) es más somera que la de barlovento (35 m). Cabe mencionar que en ninguno de estos estudios se utilizó percepción remota, lo cual en este trabajo fue importante la utilización de estas herramientas por la obtención de imágenes reales del fondo marino del arrecife De Enmedio, por lo que el funcionamiento de estas técnicas ha mejorado de forma eficaz la observación y monitoreo de los arrecifes de coral poco profundos, así como para caracterizar las

diferencias estructurales de los arrecifes. Dentro del PNSAV la caracterización arrecifal se ha llevado a cabo a través de distintos estudios recientes, con diferentes tipos de herramientas, entre ellas la percepción remota en diferentes arrecifes dentro del PNSAV (p.e. Aguilera-Arias, 2012 y Alfaro-Gómez, 2017). Por otra parte, se utilizó un sonar de barrido lateral, con el cual se generaron imágenes digitales del fondo marino, estos permitieron tener una imagen real del fondo marino, de esa manera nos permitió hacer una foto interpretación del fondo marino y con ello interpretar y observar las zonas con sedimento no consolidado (arena) y sedimento consolidado (roca), aun así, no nos permitió determinar a una escala más fina los componentes bentónicos del sustrato consolidado. Por lo que, al elaborar mapas a escalas gruesas es importante decidir cómo clasificar sitios grandes que representan una mezcla de hábitats, ya que existen hábitats pequeños que se pueden observar a escala fina y pueden perderse al aumentar la escala, pero esta pérdida puede compensarse al incluir categorías de hábitats mixtos (Prada *et al.*, 2008). Con relación a lo anterior la escala a la que trabaja el sonar de barrido lateral no permitió discriminar y clasificar a un detalle más fino los hábitats encontrados. Es por ello que se decidió trabajar a una escala más gruesa, en la cual puedan identificar los elementos bentónicos finos. Los resultados obtenidos del sonar de barrido lateral fueron procesados en el software QTC SWATHVIEW (Quester Tangent Corporation), proporcionando un mapa automatizado de clases acústicas, dando como resultado un mapa de cinco clases acústicas, Mumby y Harborne (1999) proponen que las clases bentónicas se deriven y se describan de forma objetiva mediante análisis aglomerativos jerárgicos por lo que en un principio se pensó que cada clase era un hábitat, pero al hacer el muestreo solo se logró determinar la presencia de dos grandes clases, que se les renombro, la Clase 1 paso a sustrato no consolidado (arena) y Clase 2 a sustrato consolidado (roca), ya con la clasificación supervisada se logró determinar cinco componentes bentónicos dominantes dentro del sustrato consolidado, estos fueron: 1) coral vivo, 2) roca coralina, 3) pedacería de coral, 4) arena y 5) alga coralina. Encontrando que el componente más abundante fue la roca coralina, seguido de alga coralina, sin embargo la cobertura coralina fue de 16.1 % para el arrecife De Enmedio lo cual es

un valor alto comparado con lo encontrado por Jones *et al.* (2008) para el mismo arrecife, menciona que el componente bentónico Alga es el más abundante con el 67.5% y la Cobertura Coralina representa el 5.1%; concluyendo que la mala gestión y el deterioro de la calidad del agua, debido a la contaminación que afecta a toda la región, donde solo la mayoría de los arrecifes aislados son generalmente saludables. Cabe mencionar que Jones *et al.* (2008) solo realizó 6 transectos en tres diferentes profundidades (6m, 12m y 18m), mientras en el presente trabajo se llevó acabo para dos profundidades (10m y 20m) y 50 puntos de muestreo. Lo cual puede llevar a que el resultado encontrado en esta investigación este más apegado a la realidad debido a las diferentes zonas que se muestrearon y la cantidad de puntos de muestreo. Alfaro-Gómez (2017) realizó la caracterización topográfica y paisajes del Arrecife Verde ocupando los mismos sensores remotos que se usaron en el presente trabajo. Caracterizó particularmente las zonas de barlovento y sotavento, encontrando pendientes más abruptas en la primera que en la segunda, lo que le ayudó a describir los paisajes presentes en el arrecife. Los sensores remotos son una herramienta muy útil dentro de la ecología de arrecifes para concentrar las investigaciones en cuanto al manejo de la conservación y la toma de decisiones, por lo que sería una valiosa contribución a los esfuerzos de conservación marina en estos ecosistemas. Como Ortiz-Lozano *et al.* (2018), que encontraron 18 formaciones arrecifales dentro y fuera del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano, mediante el uso de un ecosonda (GARMIN echo MAP CHIRP 92sv), concluyendo que el manejo ambiental de estos, no está completamente considerado en los decretos de creación de ANP, y la mayoría de ellos están ubicados en áreas asignadas a la pesca artesanal. Por lo que la protección de los arrecifes de coral sumergidos es responsabilidad de las autoridades para garantizar la protección de estos ecosistemas.

Las métricas de análisis espacial que se presentaron a lo largo de este trabajo son un instrumento útil en el análisis de los cambios en paisajes arrecifales, a través de enfoques diversos que van desde la descripción de dichos paisajes hasta su aplicación como instrumento de comparación entre zonas y profundidades. Forman (1995) destacó diversos procesos de transformación del paisaje, dentro de los

cuales la fragmentación del hábitat es uno de los más importantes; menciona que los efectos espaciales como la variación del tamaño, el número de parches, la forma, dimensión fractal, conectividad y aislamiento, entre otros, inciden sobre numerosos procesos ecológicos. Utilizando estas métricas resultó que el arrecife De Enmedio tiene un paisaje altamente fragmentado dado el número de parches (NP) del sustrato consolidado. Arias *et al.* (2010) mencionan que la zona a sotavento se caracteriza por movimientos de agua de baja intensidad, oleaje de baja energía y altas tasas de sedimentación terrígena, siendo esta última la principal fuerza ambiental rectora de este hábitat. Por lo que las zonas a barlovento obtuvieron menor área de sustrato no consolidado y las zonas a sotavento tienen un paisaje de alta fragmentación.

De acuerdo con Friedlander y Parrish (1998) la estructura del hábitat juega un papel importante en la estructuración de las comunidades ecológicas. Como resultado de la falta de una clasificación de la complejidad del hábitat se llevó a cabo una clasificación de la complejidad con base a lo expuesto por Risk (1972) y Aranson y Swanson (1997), donde cero (0) es una zona completamente plana y uno (1) es una máxima complejidad topográfica. El arrecife De Enmedio obtuvo una moderada complejidad del hábitat, lo que indica que la mayoría de la topografía es de un relieve irregular con pequeñas grietas. Estos relieves podrían servir de refugio para diferentes organismos, entre ellos los peces, como lo confirman varios autores como Luckhurst y Luckhurst (1978); Bell y Galzin (1984); Sano *et al.* (1984); Roberts y Ormond (1987); Chabanet *et al.* (1997); Lecchini *et al.* (2003); Walker *et al.* (2009); Wilson *et al.* (2010) y Messmer *et al.* (2011). Por lo que la zona Oeste, la de menor complejidad, se esperaba encontrar una menor diversidad y talla de peces.

Dentro de los trabajos de investigación sobre la comunidad íctica que se han realizado en el área de estudio, se encuentran listados generales del SAV como el de Vargas-Hernández *et al.* (2002) quienes reportaron 248 especies, Rangel-Avalos *et al.* (2007) registraron 155 especies, Pérez-España y Vargas-Hernández (2008) reportaron un listado de 109 especies y Del Moral-Flores *et al.* (2013) incluyeron una lista de 387 especies. En este estudio se encontraron un total 22,130 organismos pertenecientes a 69 especies, comparado con Velazco (2016) quien

reportó un total de 24, 844 organismos pertenecientes a 114 especies para todo el SAV y de las cuales solo 10 especies fueron para el arrecife Enmedio. Se observa que el número de organismos es muy similar, aun cuando este estudio se realizó solo en un arrecife y el de Velazco en todo el SAV. La riqueza en el arrecife De Enmedio representa el 60% de las especies reportadas por Velazco (2016); esto probablemente debido al esfuerzo de muestreo que se realizó en el arrecife de Enmedio.

Las especies con mayor abundancia fueron *Coryphopterus personatus/hyalinus*, *Chromis multilineata* y *Halichoeres burekai*. Pérez-España y Vargas-Hernández (2008), Aviles-Victorio (2012) y Velazco (2016) también señalaron estas especies como abundantes. Pérez- España *et al.* (2015) reportaron para el arrecife de Enmedio que la especie *Coryphopterus personatus/hyalinus* mostró una abundancia relativa del 53%, dato que se asemeja a lo reportado en el presente trabajo con el 50.3% de abundancia relativa. Estas especies son planctívoras y constituyen los grupos de pequeños peces bentónicos dominantes que viven en asociación con las formaciones coralinas (Mumby 2006), por lo que su importancia ecológica es en la trama trófica. Aunque Choucair (1992) sugiere que una mayor abundancia de especies de menor talla puede deberse a la sobreexplotación pesquera, es probable además de ella, la pérdida del hábitat y la degradación de la calidad del agua también estén afectando significativamente el arrecife y sus habitantes.

Respecto a la distribución vertical de la ictiofauna, se pudo observar que la profundidad >10 m tuvo una mayor abundancia y riqueza, incluso dentro de cada zona del arrecife De Enmedio. Las especies con mayor abundancia para las dos profundidades fueron *Coryphopterus personatus/hyalinus*, *Chromis multilineata* y *Halichoeres burekai*. Mientras que en las diferentes zonas del arrecife se observó que estas mismas especies se presentaron en diferente orden, solo agregando algunas especies como en zona Norte y Sur *Elacatinus jarocho* y la zona Oeste *Stegastes adustus*. Según Stella-Mejia y Garzón-Ferreira (2000), las especies que tienen un patrón de distribución determinado pueden tener un ámbito estrecho de dominancia o estar distribuidas ampliamente por varias zonas y las variables

ambientales (profundidad) hacen que la estructura de la comunidad se diferencie entre las grandes zonas geomorfológicas y factores aleatorios por los cuales la comunidad varía dentro de cada zona. Por otro lado, los índices de diversidad de la comunidad íctica no determinaron diferencias significativas ($p > 0.05$) en las diferentes zonas del arrecife y las profundidades, siendo la zona Oeste la que presentó la mayor abundancia y riqueza, siendo la zona con menor complejidad del hábitat, lo cual indicaría que los peces se distribuyen homogéneamente dentro de todo el arrecife.

En cuanto a los corales, se encontraron un total de 22 especies y la especie con mayor abundancia fue *Orbicela faveolata*. La cobertura general para el arrecife fue de 16.1%. Al comparar los resultados con los trabajos de Pérez-España y Vargas-Hernández (2008) que señalaron que los corales más abundantes fueron *Montastrea cavernosa*, *Orbicela annularis* y *Colpophyllia natans*, con una cobertura promedio del 10% para el arrecife De Enmedio, puede verse que los resultados no coinciden, porque ellos solo trabajaron en una zona. Pérez-España *et al.* (2015) encontró un total de 10 especies de coral para el arrecife De Enmedio, con una cobertura promedio del 7% y *Orbicela faveolata* es una de las especies con mayor abundancia, siendo el único trabajo que menciona a esta especie como abundante. Quizás los bajos valores de cobertura y riqueza se deban al esfuerzo de muestreo en cada uno de los trabajos. Contrario a lo reportado por Horta-Puga y Tello Mussi (2009), quienes reportan una riqueza de 20 especies para el arrecife De Enmedio, con una cobertura del 22.6%. Cabe resaltar que en este trabajo se integra la zona de planicie, reporta igualmente una cobertura del 10% para la zona de barlovento y del 55% para sotavento, estos resultados concuerdan con lo encontrado en este trabajo donde se encontró para la zona Norte y Este (barlovento) la cobertura promedio fue del 10.67% y para la zona Oeste y Sur (zona sotavento) la cobertura promedio fue de 18.50%. La cobertura de coral vivo es considerada como uno de los indicadores más confiables para determinar el estado de salud de un arrecife, Alcolado y Duran (2011) consideran que una cobertura por encima del 20% es típica de un arrecife saludable mientras que una cobertura de coral entre 10% y 20%

refleja un regular estado de salud, por lo que el arrecife De Enmedio se encuentra en un estado regular.

La mayor abundancia y riqueza se encontró a la profundidad <10 m, resultado que concuerda con Pérez España *et al.* (2015) quienes comparan la riqueza entre profundidades y encuentran que la zona somera obtuvo mayor riqueza de 10 especies. Díaz-Pulido *et al.* (2004) señalan que la profundidad, oleaje, luz y geomorfología son los principales factores que controlan los esquemas de zonación al interior de los arrecifes coralinos. Los índices de diversidad de la comunidad coralina no mostraron diferencias significativas ($p>0.05$) en las diferentes zonas y profundidades. Aunque cabe destacar que, en la zona Oeste, tanto corales como peces mostraron mayor abundancia y riqueza, lo que evidencia mejores condiciones para el desarrollo de la comunidad coralina e íctica en esta zona. Esto se puede deber a que la zona de sotavento, tiene una menor profundidad, mayor penetración de luz y las características del sustrato inerte por la baja influencia del oleaje, son variables que pueden estar ayudando a tener una mayor abundancia y riqueza. Como lo demuestra González-González *et al.* (2016) al comparar la diversidad bentónica en tres ambientes arrecifales como: arrecife frontal, arrecife posterior y planicie arrecifal del arrecife Enmedio en el Sistema Arrecifal Lobo-Tuxpan, encontrando diferencias significativas entre los ambientes, demostrando que el arrecife posterior fue el ambiente arrecifal más importante por concentrar la mayor riqueza de especies y el máximo desarrollo coralino.

Según Fahring (2003) a medida que aumenta el grado de fragmentación de los paisajes disminuye la cantidad de hábitat remanente, se reduce el tamaño de los parches e incrementa el aislamiento. Este paradigma puede explicar el hecho de que la correlación entre las métricas del paisaje y la diversidad de peces-corales, tuvieron un efecto significativo en el NP. La alta fragmentación del arrecife De Enmedio no tuvo ningún efecto negativo en la diversidad de peces-corales para la zona Oeste, la cual obtuvo el mayor NP, indicando alta fragmentación y la mayor diversidad en peces-corales, lo cual estaría rechazando la hipótesis expuesta en este trabajo, sin embargo, la proximidad de los parches es muy alta encontrando una facilidad para el intercambio de individuos entre los parches. Por otro lado, la

zona Sur que igualmente es una zona altamente fragmentada y obtuvo los valores de menor diversidad de peces-corales, con una baja proximidad entre los parches, esto estaría llevando a la zona Sur a una sucesión ecológica de los parches, de la población y a escala todo el paisaje. La zona Sur es donde podemos asegurar que a una alta fragmentación se tiene un efecto negativo en la diversidad y la variable de proximidad (aumento de la distancia entre fragmentos), tiene la dificultad para el intercambio de individuos entre las poblaciones aisladas, así como para reponerse, por recolonización o de una eventual extinción. La literatura menciona que la fragmentación del hábitat implica la reducción de áreas continuas de hábitat a parches más pequeños, lo que resulta en la pérdida del hábitat interior y aumenta el hábitat marginal, se cree que estos cambios influyen en la supervivencia y la persistencia de diversas especies en entornos tanto terrestres como marinos (Harwell et al. 2011). Para las dos diferentes profundidades se estarían dando en el mismo arreglo, la profundidad >10m tiene una alta fragmentación y obtuvo los valores más altos de diversidad de peces-corales, exceptuando en la zona oeste donde la profundidad <10m obtuvo la mayor diversidad. Como lo demostrado por Acosta-Gonzales *et al.* (2013) donde enfatiza el importante papel de las unidades geomorfológicas profundas y la cobertura coralina como fuente de diversidad. Martínez-Rendis *et al.* (2015) encontró que la transformación del paisaje arrecifal durante un cambio de fase y el cambio de paisaje costero, provocó un aumento en la fragmentación de pastos marinos de 2000 al 2006, y en el mismo periodo se presentó una menor diversidad de peces y de cobertura coralina. Por el contrario, Acosta-Gonzales *et al.* (2013) mencionan que, a pesar de la disminución y la degradación de los arrecifes, se mantuvo la diversidad de los peces. Eggleston (1999) sugirió que existe una relación entre la fragmentación del hábitat y la biodiversidad, y que la mayor biodiversidad ocurre en niveles intermedios de fragmentación del hábitat. Se ha hecho poco esfuerzo para investigar la relación entre las métricas y la diversidad de peces, con la excepción del trabajo de Grober-Dunsmore *et al.* (2008) quienes utilizaron las métricas del paisaje para relacionar la estructura del hábitat con la diversidad de peces, encontraron que las métricas del paisaje, la disposición espacial y la composición de los paisajes de los arrecifes de

coral, están correlacionados con pocos parámetros de diversidad de peces arrecifales. Por lo que se esperaría estudios posteriores para tener un registro de los cambios en el paisaje arrecifal ya que la perturbación antropogénica es un factor de fragmentación dentro de los arrecifes coralinos, especialmente dado también por factores abióticos como la tasa de sedimentación por la cercanía con el río Jamapa y tener datos de la evolución del arrecife De Enmedio.

CONCLUSIONES

- Con ayuda de la percepción remota activa fue posible identificar dos tipos de fondo: 1) sedimento consolidado (roca) que estuvo caracterizada por cuatro principales componentes bentónicos, coral vivo, roca coralina, pedacería de coral y alga coralina, 2) sedimento no consolidado (arena)
- Se determinó que el Sedimento no consolidado (arena) obtuvo la mayor área y de acuerdo a las métricas del paisaje en el sedimento consolidado (roca), el arrecife De Enmedio está altamente fragmentado
- Las 69 especies de peces y 22 especies de corales son valores de riqueza similares a otros estudios, siendo la especie *Coryphopterus personatus/hyalinus* la especie de pez más abundante y *Orbicela faveolata* la especie de coral con mayor cobertura.
- Los índices ecológicos de la comunidad de peces y corales no presentaron diferencias significativas entre las diferentes zonas y profundidades del arrecife.
- A la escala que se trabajó, de las métricas de paisaje analizadas solo el número de parches mostró una relación significativa con la riqueza de peces y corales y esta fue positiva, lo cual no apoya la hipótesis planteada.

RECOMENDACIONES

- Realizar estudios similares para tener un registro de los cambios en el paisaje arrecifal ya que la perturbación antropogénica es un factor de fragmentación.
- Comprobar que en las etapas finales de los procesos de fragmentación las condiciones son tan restrictivas que puedan afectar negativamente a parámetros tales como la condición corporal, el esfuerzo reproductivo, la estabilidad durante el desarrollo y el comportamiento.

LITERATURA CITADA

- Acosta-González, G., Rodríguez-Zaragoza, F.A., Hernández-Landa, R.C., y Arias-González, J.E. 2013. Additive Diversity Partitioning of Fish in a Caribbean Coral Reef Undergoing Shift Transition. PLoS ONE 8(6): 1-11 pp.
- Aguilera, J. 2012. Caracterización estructural y dinámica del paisaje en lagunas arrecifales: estudio de caso Sistemas Arrecifal Veracruzano. Tesis de Maestría. Universidad Veracruzana, UV. 81 p.
- Alcolado, P. D. y Duran A., 2011. Sistemas de escalas para la clasificación y puntaje de condición del bentos e ictiofauna de arrecifes coralinos de Cuba y del Gran Caribe. Serie oceanológica, 8; 25-29 pp.
- Alfaro-Gómez, K., 2017. Caracterización topográfica y estructural de los paisajes de las pendientes del arrecife Verde, Veracruz, México. Tesis de Maestría. Universidad Veracruzana, UV. 95 p.
- Andréfouët, S., Kramer, P., Torres-Pulliza, D., Joyce, K. E., Hochberg, E. J., Garza-Perez, R., Mumby, P. J., Riegl, B. M., Yamano, H., White, W. H., Zubia, M., Brock, J. C., Phinn, S. R., Naseer, A., Hatcher, B. G. y Muller-Karger, F. E. 2003. Multi-sites evaluation of IKONOS data for classification of tropical coral reef environments. Remote Sensing of Environment, 88: 128–143 pp.
- Aronson, R. B. y Swanson, D. W. 1997. Video surveys of coral reefs: uni and multivariate applications. Proc. 8th Int. Coral Reef Sym, 2:1923-1926.
- Arias-González, J. E., Done, T. J., Page, C. A., Cheal, A. J., Kininmonth, S. y Garza-Pérez, J. R. 2006. Towards a reefscape ecology: relating biomass and trophic structure of fish assemblage to habitat at Davies Reef, Australia. Marine Ecology Progress Series, 320: 29-41 pp.
- Arias-González, J. E., Núñez-Lara, E., Rodríguez-Zaragoza, F. A. y Legendre, P., 2011. Indicadores del paisaje arrecifal para la conservación de la

biodiversidad de los arrecifes de coral del Caribe. Ciencias Marinas, 37(1): 87–96 pp.

Arias-González, J. E., Acosta-González, G., Membrillo, N., Garza-Pérez, J. R. y Castro-Pérez, J. M., 2012. Predicting spatially explicit coral reef fish abundance richness and Shannon- Weaver index from habitat characteristics. Biodiversity Conservation, 21: 115-130 pp.

Arroyo-Rodríguez V, Fahrig L. 2014. Why is a landscape perspective important in studies of primates? American Journal of Primatology 76:901–909.

Avilés-Victorio, C. L., 2012. Monitoreo de peces de arrecife del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano, México. Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico de Boca del Rio. 76 p. Bello, P. J., Liceaga-Correa, M. C., Hernandez-Núñez, H. y Ponce-Hernandez, R. 2005a. Using aerial video to train the supervised classification of Landsat TM imagery for coral reef habitats mapping. Environmental Monitoring and Assessment, 105: 145-164 pp.

Bastian, O. (2002). Landscape Ecology, 16(8), 757–766.

Bello, P., J., Rios, L. V., Liceaga, C. M. A., Zetina, M. C., Cervera, C. K., Arceo, B. P. y Hernandez, H. N. 2005b. Incorporating spatial analysis of hábitat into spiny lobster (*Panulirus argus*) stock assesment at Alacranes reef, Yucatan, México. Fisheries Research, 73: 37-47 pp.

Bell, J. D. y Galzin, R., 1984. Influence of live coral cover on coral-reef fish communities. Marine Ecology Progress Series, 15: 267- 274 pp.

Benavente, F. A. 2010. Aplicación de métricas de ecología del paisaje para el análisis de patrones de ocupación urbana en el Área Metropolitana de Granada. Anales de Geografía, 30:2, 9-29 pp.

-
- Chabanet, P., Ralambondrainy, H., Amanicu, M., Faure, G. y Galzin, R., 1997. Relationships between coral reef substrata and fish. *Coral Reef*, 16: 93-102 pp.
- Choucair, P.C., 1992. A quantitative survey of the ichthyofauna of arrecife de Enmedio, Veracruz, Mexico. Ms. Sc. Thesis, Corpus Chisti State University, Texas. 59 p.
- Clarke, K.R. y Ainsworth, M. 1993. A method of linking multivariate community structure to environmental variables. *Marine Ecology Progress*, 92: 205-219.
- Clarke, K. R. y Warwick, R. M. 2001. Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation. 2nd edition. Primere: plymouth. United kingdom. 271p.
- Cuevas, E., Liceaga-Correa, M. A., Rincón-Sandoval, L. A., Mexicano-Cíntora, G., Arellano-Méndez, L., Euán-Ávila, J. I., Hernández-Núñez, H. y Mulsow, S., 2013. Evaluación morfológica y sedimentológica de campos de dunas submarinas en la costa de Yucatán, México. *Ciencias Marinas*, 39:1, 83-99 pp.
- Del Moral-Flores, L. F., Tello-Musi, J. L., Reyes-Bonilla, H., Pérez-España, H., Martínez-Pérez, J. A., Horta-Puga, H., Velazco-Mendoza, L. A., y Catillo-Cárdenas, A. A., 2013. Lista sistemática y afinidades zoogeográficas de la ictiofauna del Sistema Arrecifal Veracruzano, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 84: 825-846 pp.
- Díaz-Pulido, G., Sánchez, J.A., Zea, S., Díaz, J.M. y Garzón J., 2004. Esquemas de distribución espacial en la comunidad bentónica de arrecifes coralinos continentales y oceánicos del Caribe Colombiano. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 28 (108): 337-347 pp.
- Dobrin, M. B., 1975. Introducción a la prospección geofísica, Barcelona, España, 2da Edición. Editorial Omega

-
- D.O.F., 1992. Diario Oficial de la Federación. México, D.F., martes 25 de agosto de 1992. 4-13 pp.
- D.O.F., 2012. Diario Oficial de la Federación. México, D.F., jueves 29 de noviembre 2012. 1-27 pp.
- Dustan, P., Dobson, E. y Nelson, G. 2001. Landsat Thematic Mapper: Detection of Shifts in Community Composition of Coral Reefs. *Conservation Biology*, 15 (4): 892-902 pp.
- Eggleston, D.B. 1999. Application of landscape ecological principles to oyster reef restoration. In: Luckenbach, M.W., Mann, R., Wesson, J.A. (Eds.), *Oyster Reef Habitat Restoration: A Synopsis and Synthesis of Approaches*. Virginia Institute of Marine Science Press, Gloucester Point, VA, 213–227 pp.
- Eyre, B. D., y Maher, D.T. 2011. Mapping ecosystem processes and function across shallow seascapes, *Continental Shelf Research*, 31: 2 (1), S162-S172 pp.
- Fahrig, L. 2003. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 34:487–515 pp.
- Forman, R. T. T. 1995. *Land Mosaic: The ecology of landscapes and regions*. Nueva York: Cambridge University Press
- Friedlander, A. M. y Parrish, J. D., 1998. Habitat characteristics affecting fish assemblages on a Hawaiian coral reef. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 224: 1-30 pp.
- Friedlander, A. M., Brown, E. K., Jokiel, P. L., Smith, W. R. y Rodgers K. S. 2003. Effects of habitat, wave exposure, and marine protected area status on coral reef fish assemblages in the Hawaiian archipelago. *Coral Reef*, 22: 291-305 pp.
- Garza-Pérez, J. R., Lehmann, A. y Arias-González, J. E. 2004. Spatial prediction of coral reef habitats: integrating ecology with spatial modeling and remote sensing. *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 269: 141-152 pp.

-
- González-González, M. Vicencio de la Cruz, F., Morales-Quijano, I., y Orduña-Medrano R. E. 2016. Diversity and coverage of the benthic community at Enmedio reef, Lobos-Tuxpan Reef System, Mexico. *Rev. Mar. Cost.* ISSN 1659-455X. Vol. 8 (2): 47-65 pp.
- Green, P.E., J.P. Mumby, A.J. Edwards y D.C. Clark. 2000. Remote sensing handbook for tropical coastal management. UNESCO, London, England. 320 pp.
- Grober-Dunsmore, R., Frazer, T., y Beets J., (2004). The significance of adjacent habitats on reefish assemblage structure: are relationships detectable and quantifiable at a landscape scale? *Proc Gulf Caribb Fish Inst* 55:713–734
- Grober-Dunsmore, R., Beets, J., Frazer, T., William, J., Lindberg P. W. y Funicelli N. A., 2008. Influence of landscape structure on reef fish assemblages. *Landsc Ecol* 23(SI):37–53 pp.
- Hamel, M. A. y Andréfouët, S. 2010. Using very high resolution remote sensing for the management of coral reef fisheries: Review and perspectives. *Marine Pollution Bulletin*, 60: 1397-1405 pp.
- Harwell, H. D., Posey, M. H., y Alphin, T. D., 2011. Landscape aspects of oyster reefs: Effects of fragmentation on habitat utilization. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 409: 30–41 pp.
- Horta-Puga, G. y Tello-Musi J. L., 2009. Sistema Arrecifal Veracruzano: condición actual y programa permanente de monitoreo: Primera Etapa. UNAM. Facultad de Estudios Superiores Iztacala. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. DM005. México D. F. 126 p.
- Huvenne, V.A.I., Blondel, Ph., y Henriët, J. P., 2002. Textural analyses of sidescan sonar imagery from two mound provinces in the Porcupine Seabight. *Marine Geology*, 189:323-341 pp.

-
- Mumby P. J., Broad K., Brumbaugh D. R., Dahlgren, C. P., Harborne A. R., Hastings, A., K. E. Holmes, Kappel C. V., Micheli, F. y Sanchirico J.N. 2008 Coral Reef Habitats as Surrogates of Species, Ecological Functions, and Ecosystem Services Conservation Biology, Volume 22, No. 4, 941–951 pp.
- Jordan-Dahlgren, E. 2004. Los arrecifes coralinos del golfo de México: Caracterización y Diagnostico. 555-570 pp. En: Diagnostico ambiental del golfo de México. Caso, M., Pisanty, I., y Ezcurra, E. (ed.). INE-SEMARNAT, 627 p.
- Lara, M., Padilla, C., García, C., Espejel, J. J., 1992. Coral Reef of Veracruz Mexico I. zonation and community. Proceedings of the seventh international coral reef symposium, Guam, Vol 1. 535-544 pp.
- Lecchini, D., Adjeroud, M., Pratchett, M. S., Cadoret, L. y Galzin, R., 2003. Spatial structure of coral reef fish communities in the Ryukyu Islands southern Japan. Oceanologica Acta, 26: 537-547 pp.
- Lozano, A. M., 2009. Taxocenosis de Octocorales del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano. Tesis de Maestría. Instituto de Ciencias Marinas y Pesqueras. UV. Boca del Rio, Veracruz, México. 91 p.
- Luckhurt, B. E. y Luckhurt, K., 1978. Analysis of the influence of substrate variables on coral reef fish communities. Marine Biology, 49, 317-323 pp.
- Ludwig, J.A. y Reynolds, J.F. 1988. Statistical Ecology: A Primer on Methods and Computing. Wiley-Interscience Pub., New York.
- Margalef, R. 1968. Perspectives in ecological theory. Univ. Chicago press, Chicago, Hill.
- Martínez-Rendis, A., Acosta-Gonzalez, G., Hernández-Stefanoni, J. L., y Arias-Gonzalez, J.E., 2015. Quantifying the reefscape transformation of a

coastal Caribbean coral reef during a phase shift and the associated coastal landscape change. *Marine Ecology* 37: 697–710 pp.

Mellin, C., Andrefouët, S., Kulbicki, M., Dalleau, M. y Vigliola, L., 2009. Remote sensing and fish–habitat relationships in coral reef ecosystems: review and pathways for systematic multi-scale hierarchical research. *Marine Pollution Bulletin*, 58: 11–19 pp.

Messmer, V., Jones, G. P., Munday, P. L., Holbrook, S. J., Schmitt, R. J. y Brooks, A. J., 2011. Habitat biodiversity as a determinant of fish community structure on coral reefs. *Ecology*, 92 (12): 2285-2298 pp.

Monreal-Gómez M. A., Salas-de-León D. A. y Velasco- Mendoza H. 2004. La hidrodinámica del Golfo de México. 47-68 pp. En: Diagnostico ambiental del Golfo de México. Caso, M., Pisanty, I., y Ezcurra, E. (ed.). INE-SEMARNAT, 627 p.

Mumby, P. J., Broad, K., Brumbaugh, D. R., Dahlgren, C. P., Harborne, A. R., Hastings, A., Holmes, K. E., Kappel, C. V., Micheli, F. y Sanchirico, J. N. 2008. Coral reef habitat as Surrogates of species, ecological functions, and ecosystem services. *Conservation Biology*. 22 (4): 941-951 pp.

Mumby, P. J., Harborne, A. R., 1999. Development of a systematic classification scheme of marine habitat to facilitate regional management and mapping of Caribbean coral reefs. *Biological Conservation*, 88: 155-163 pp.

Palandro, D. A., Andréfouët, S., Hu, C., Hallock, P., Müller-Karger, F., Dustan, P., Callahan, M. K., Kranenburg, C. y Beaver, C. R. 2008. Quantification of two decades of shallow-weather coral reef habitat decline in the Florida Keys National Marine Sanctuary using Landsat data (1984- 2002). *Remote Sensing of Environment*, 112: 3388-3399 pp.

Pérez España, H. y Vargas Hernández, J. M., 2008. Caracterización ecológica y monitoreo del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano: Primera

Etapa. Universidad Veracruzana. Centro de Ecología y Pesquerías
Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. DM002. México D. F. 70 p.

Pérez-España, H., Ávila-Gutierrez, P.S., Melo-Merino, S.M., Berumen- Solorzano, P., Flores-Arévalo, R. R., 2015. Patrones interanuales e interarrecifales de las comunidades de peces, corales y equinodermos en el Sistema Arrecifal Veracruzano, p. 151-170. En: A. Granados-Barba, L. Ortiz-Lozano, D. Salas-Monreal y C. González-Gándara (eds.). Aportes al conocimiento del Sistema Arrecifal Veracruzano: hacia el Corredor Arrecifal del Suroeste del Golfo de México. Universidad Veracruzana. 346 p.

Pielou, E. C., 1966. The Measurement of Diversity in Different Types of Biological Colledions. J. Theoret. Biol. 13:131-144 pp.

Prada, M.C., Appeldoorn, R.S., Rivera, J.A., 2008. The effects of minimum map unit in coral reefs maps generated from high resolution side scan sonar mosaics. Coral Reefs 27:297–310 pp.

Quintana y Molina, J., 1991. Resultados del programa de investigación en arrecifes veracruzanos del laboratorio de sistemas bénticos litorales. Hidrobiología, Vol. 1 (1), 73-86 pp.

Rangel-Ávalos, M.A., Jordan, LKB., Walter, B.K., William, D.S., Carvajal-Hinojosa, E., Spieler, R.E., 2008. Fish and Coral Reef Communties of the Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano (Veracruz Coral Reef System National Park) Veracruz, México: Preliminary Results. Proceedings of 60th Gulf and Caribbean Fisheries Institute. 427-435 pp.

Risk, M. J., 1972. Fish diversity on a coral reef in the Virgin Islands. Atoll Research Bulletin, 193: 1-6 pp.

Roberts, C. M. y Ormond, R. F. G., 1987. Habitat complexity and coral reef fish diversity and abundance on Red sea fringing reef. Marine Ecology Progress Series, 41: 1-8 pp.

-
- Sano, M., Shimizu, M. y Nose Y., 1984. Changes in structure of coral reef fish communities by destruction of Hermatypic coral: Observacional and experimental views. *Pacific Science*, 38 (1): 51-79 pp.
- Stella-Mejía, L., y. Garzón-Ferreira, J., 2000 Estructura de comunidades de peces arrecifales en cuatro atolones del Archipiélago de San Andrés y Providencia (Caribe sur occidental) *Rev. Biol. Trop.*, 48(4): 883-896 pp.
- Syms, C. y Jones G. P. 2000. Disturbance, habitat structure, and the dynamics of a coral-reef fish community. *Ecology*, 81: 2714-2729 pp.
- Tunnell Jr., J. W., Chávez, E. A., y Withers, K. 2007. Coral reefs of the southern Gulf of Mexico. Texas A&M University Press, College Station, 293 p.
- Turner, M. G., Gardner, R. H. y O'Neill, R. V. 2001. *Landscape Ecology in Theory and Practice: Patterns and Process*. Springer Press, New York, 401 p.
- Vargas-Hernández, J. M., Hernández-Gutiérrez A. y Carrera-Parra L. F. 1993. Sistema Arrecifal Veracruzano. 559-575 pp. En: *Biodiversidad marina y costera de México*. Salazar-Vallejo S.I. y González N. E. (eds.). CONABIO-CIQRO, México, 865 p.
- Vargas-Hernández, J.M. Nava-Martínez G., Román-Vives M.A. Peces del Sistema Arrecifal Veracruzano: La pesca en Veracruz y sus perspectivas de desarrollo, 17-29 pp.
- Vargas-Hernández, J. M., 2004. CoArrCP. (Coberturas Arrecifales por Conteo de Puntos). Versión 1.1. Manual del Usuario. 39 pp.
- Velazco, M. L. A., 2016. Estructura comunitaria de la ictiofauna del Sistema Arrecifal Veracruzano. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California Sur. Ciencias Marinas y Costeras. 111 p.
- Vicencio, C. F., 2013. Estructura de las comunidades macrobentónicas y nectónicas asociadas a los sustratos rocosos coralinos del arrecife Lobos, Veracruz,

México. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. UV. Tuxpan. Veracruz, México. 109 p.

Walker, B. K., Jordan, L. K. B. y Spieler, R. E., 2009. Relationship of reef fish assemblages and topographic complexity on southeastern Florida coral reef habitats. *Journal of Coastal Research*, 53: 39-48 pp.

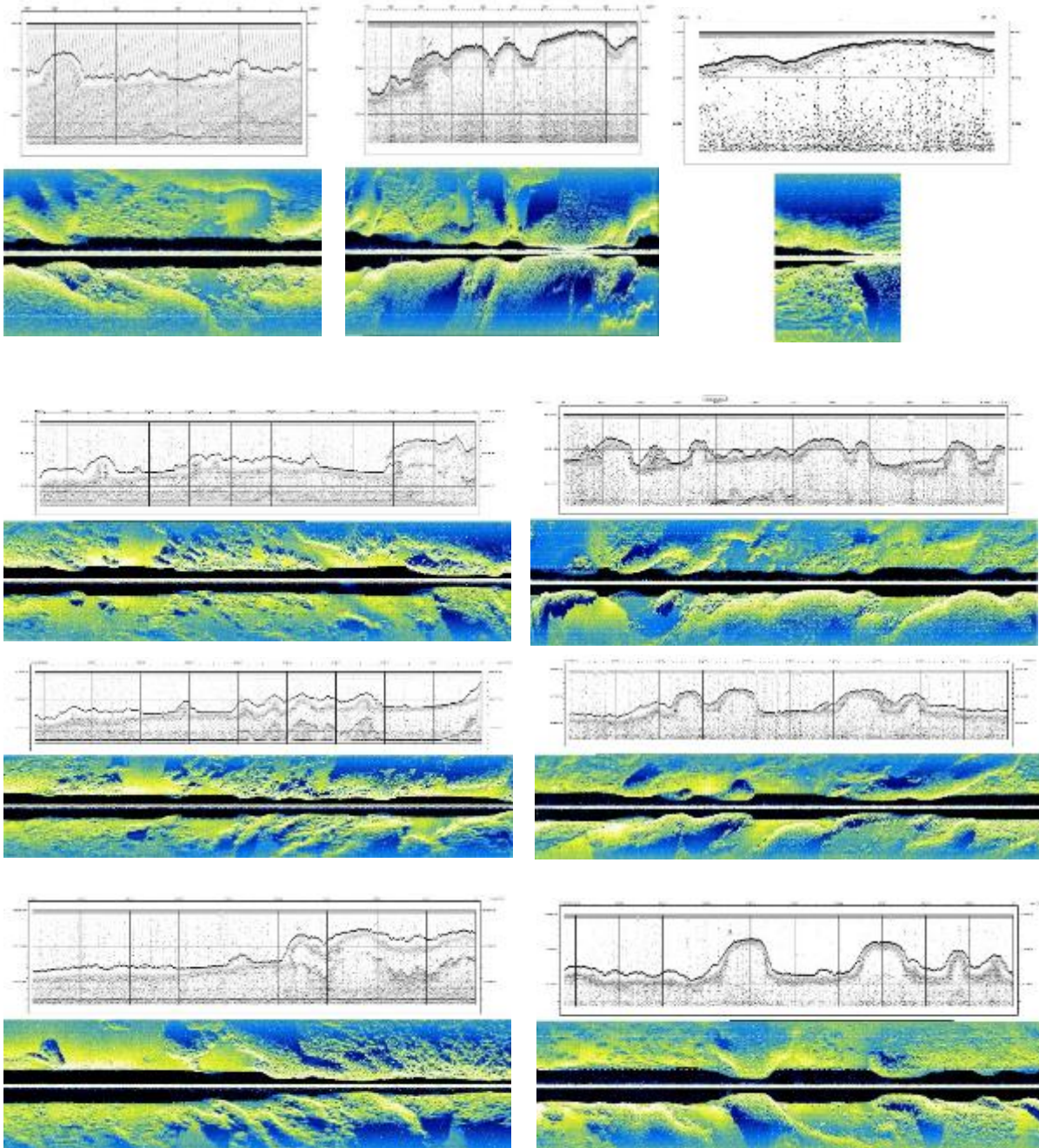
Wilson, S. K., Fisher, R., Pratchett, M. S., Graham, N. A. J., Dulvy, N. K., Turner, R. A., Cakacaka, A. y Poolunin, N. V. C. 2010. Habitat degradation and fishing effects on the size structure of coral reef fish communities. *Ecological Applications*, 20(2): 442-451 pp.

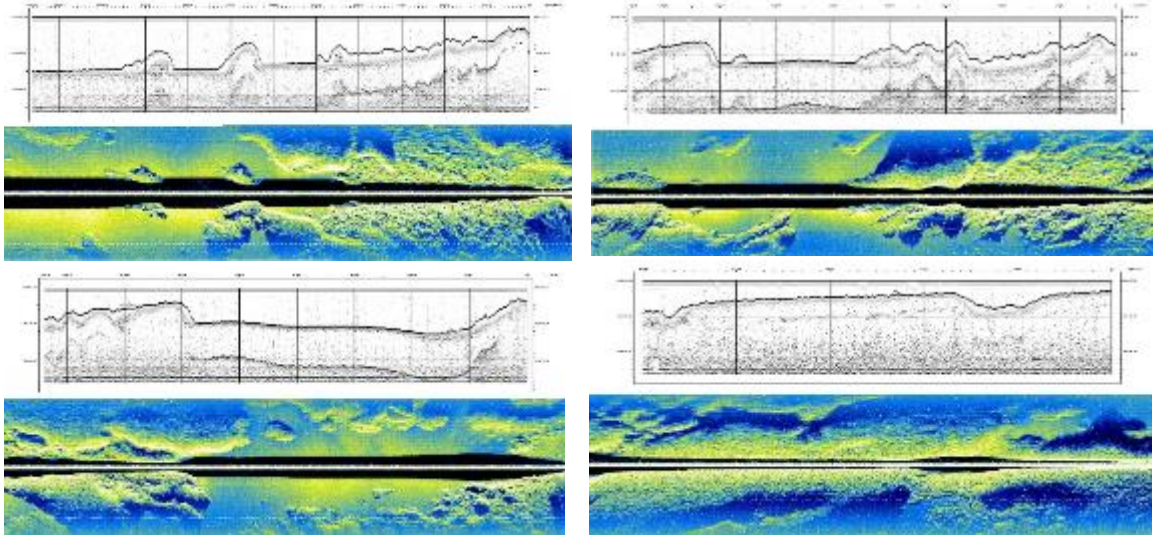
Xu, J. y Zhao, D. 2014. Review of coral reef ecosystem remote sensing. *Acta Ecologica Sinica*, (34) 19-25 pp.

ANEXOS

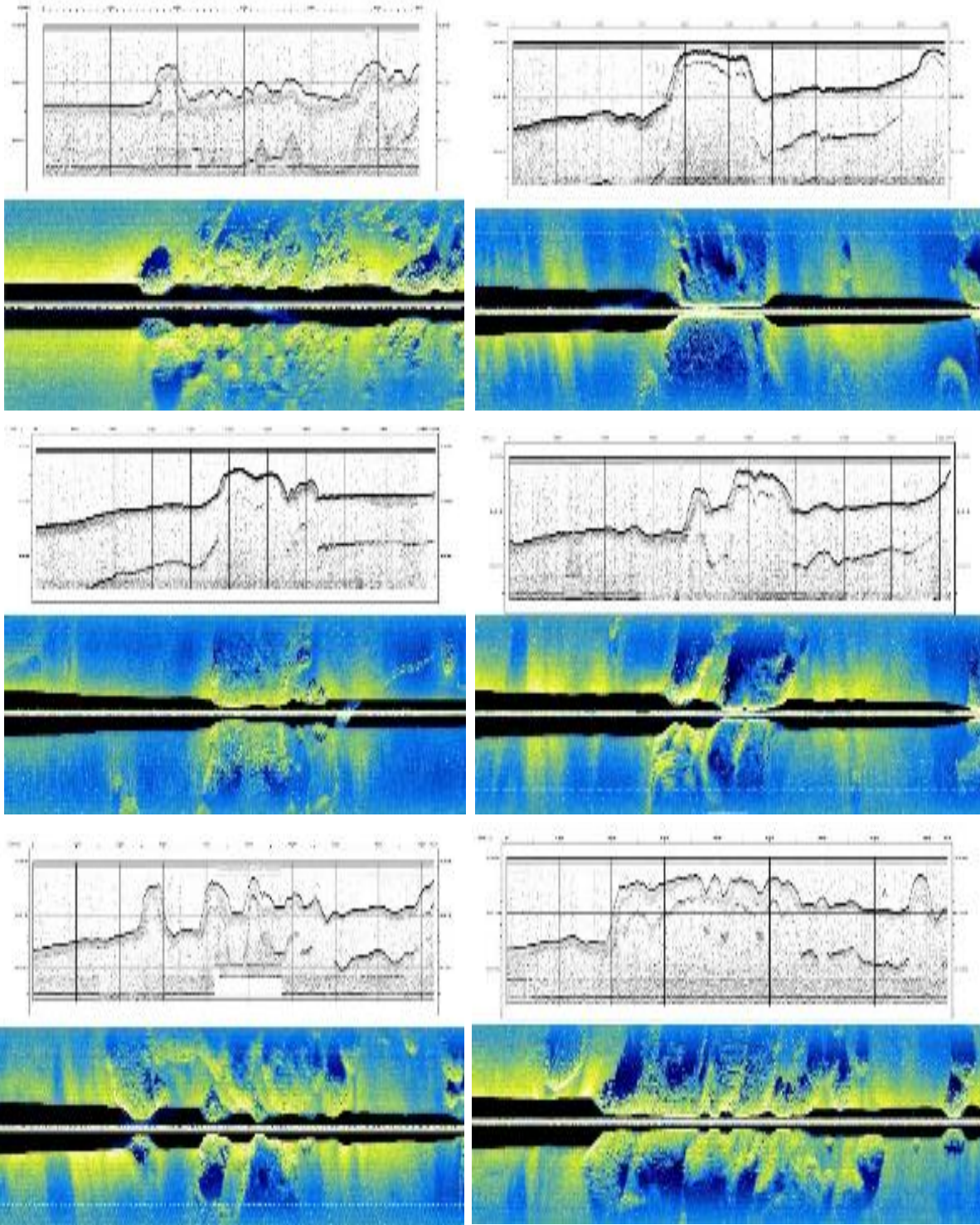
Anexo 1. Comparación de imágenes digitales de fondo y perfiles sísmicos.

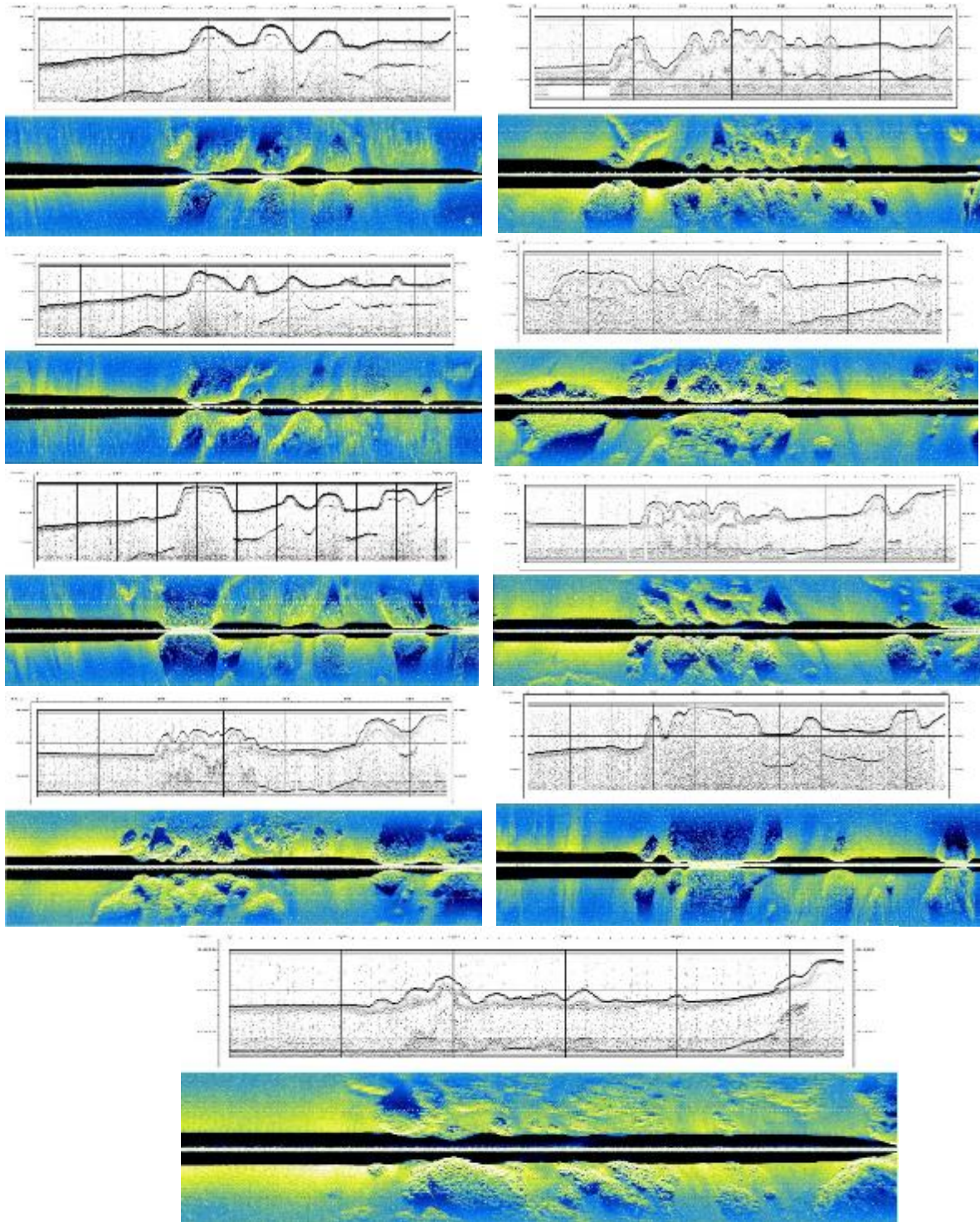
- Zona Norte



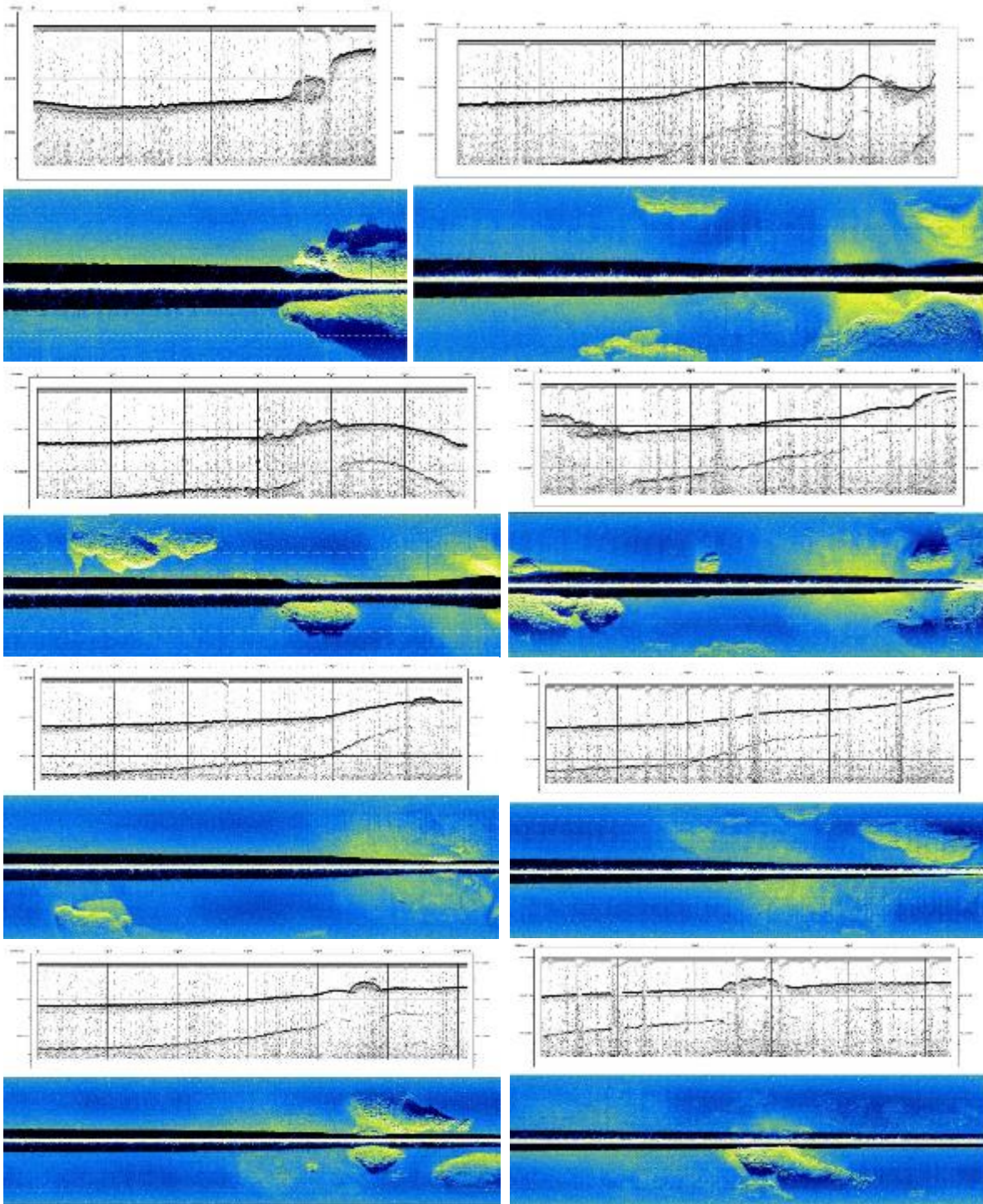


- Zona Oeste

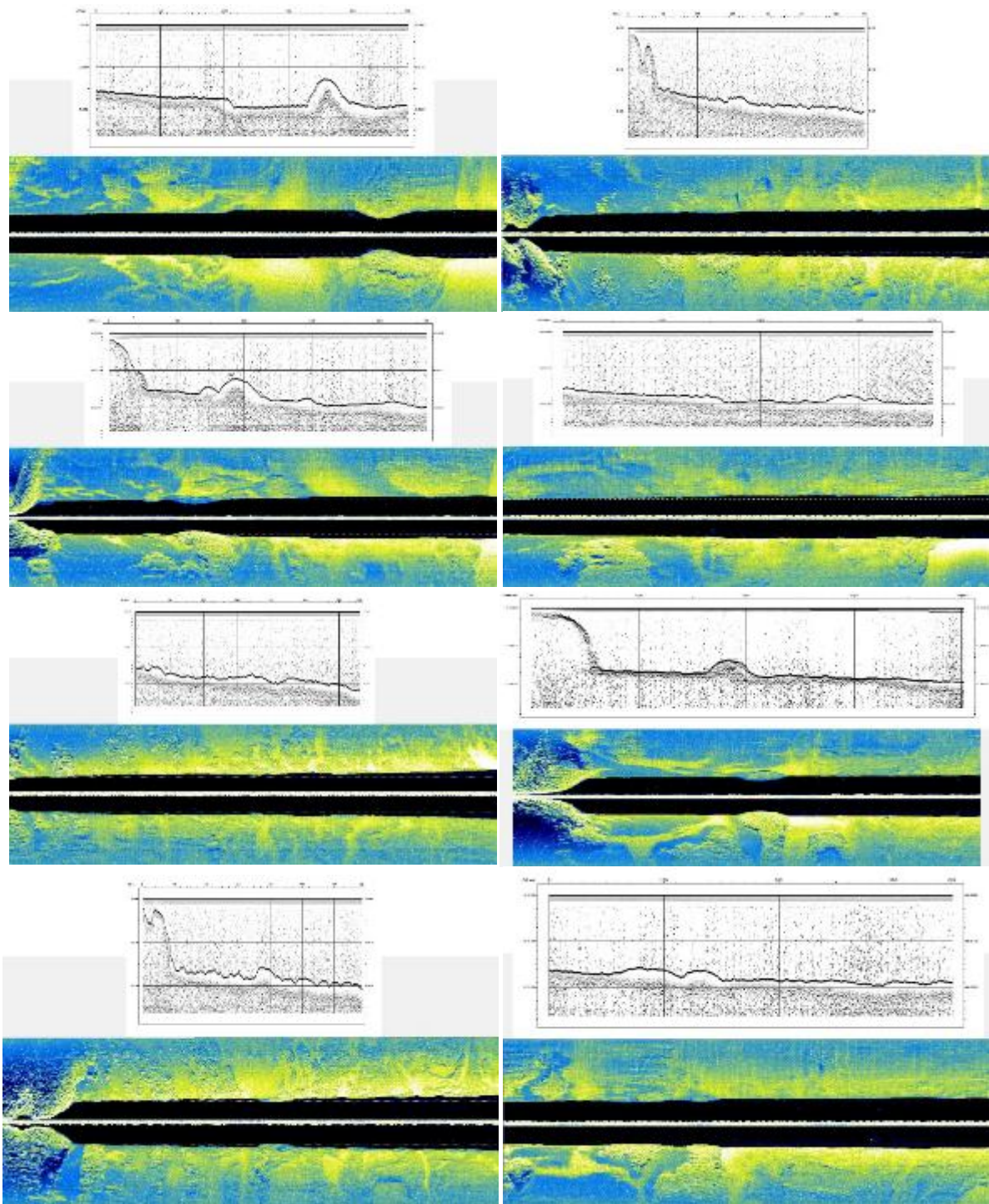


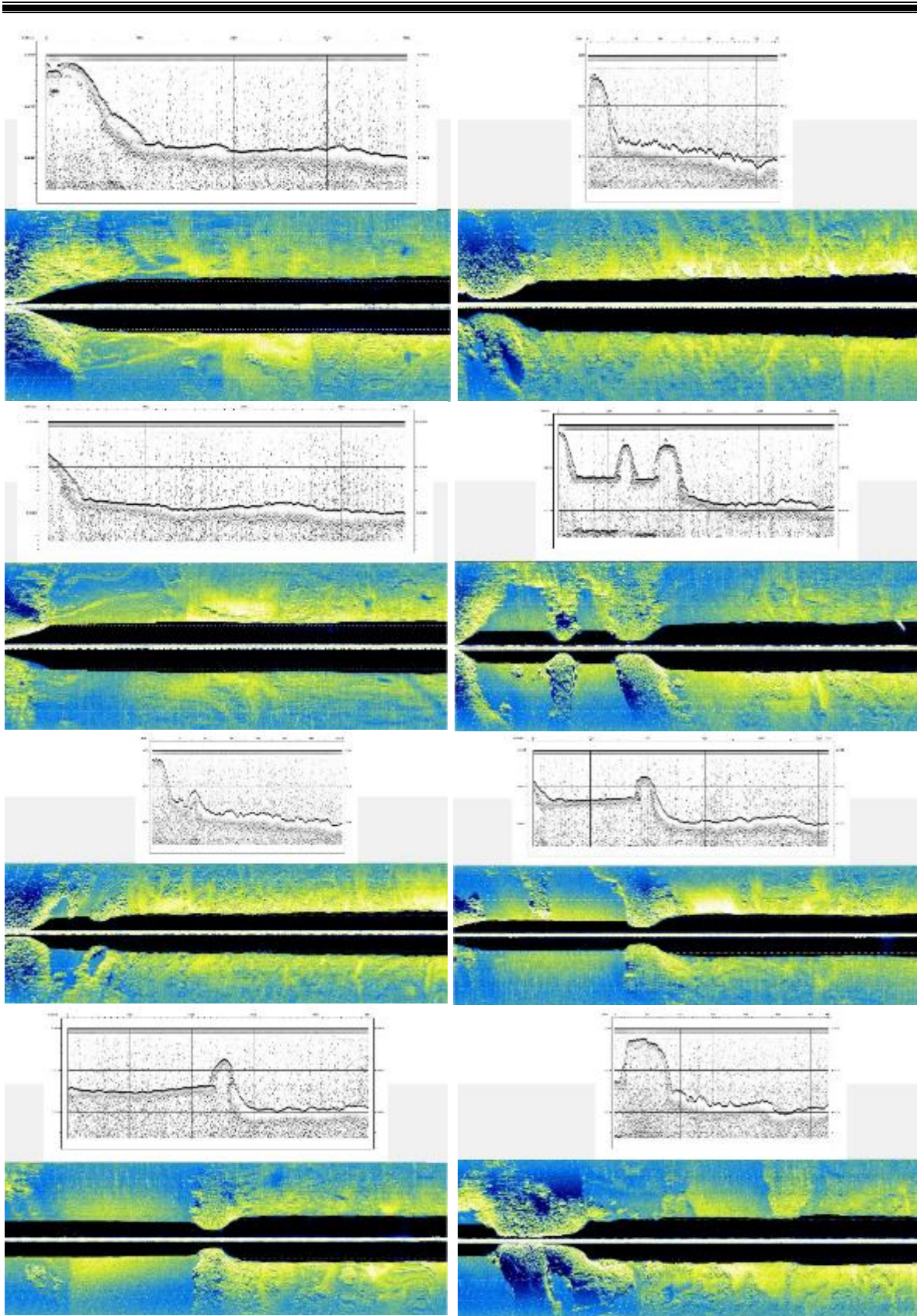


- Zona Sur



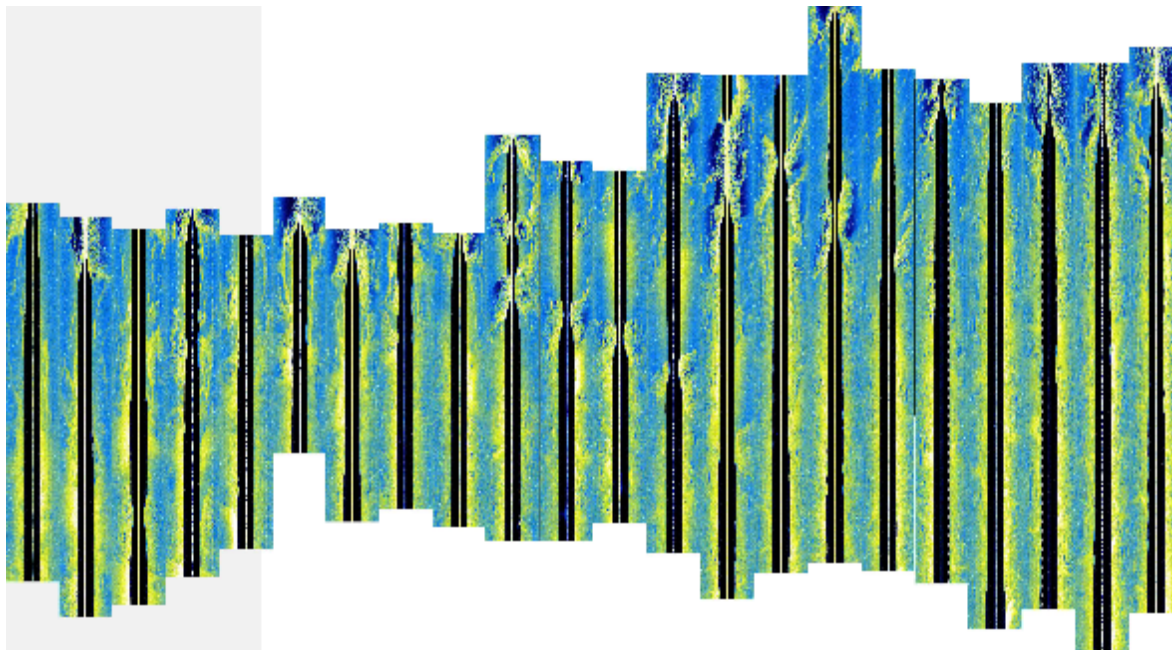
- Zona Este



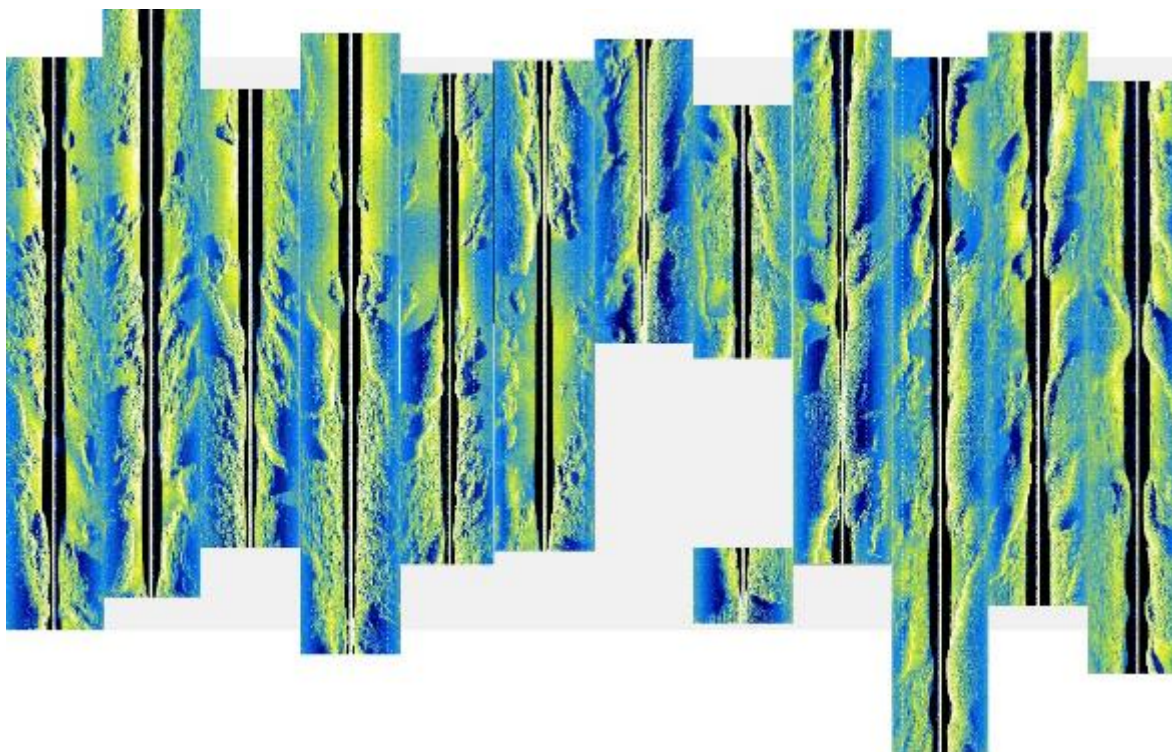


Anexo 2. Mosaicos digitales de cada zona.

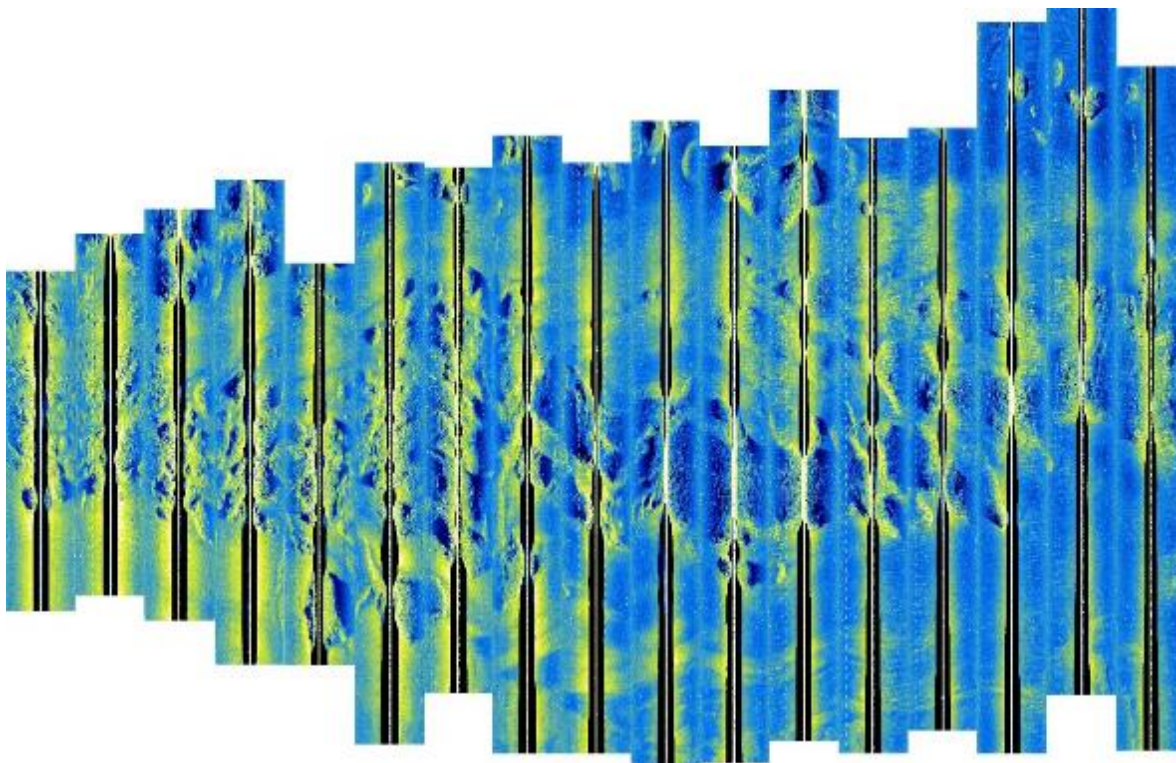
- Mosaico Este.



- Mosaico Norte



- **Mosaico Oeste**



- **Mosaico Sur**

