

Licencia Creative Commons (CC BY-NC 4.0)

Artículos Científicos

DOI: <https://doi.org/10.25009/uvs.vi19.3103>

Evaluación rápida del estado de condición ecológica de arrecifes coralinos mesofóticos del sistema arrecifal veracruzano

Rapid Ecological Condition Assessment of Mesophotic Coral Reefs in the Veracruz Reef System

Itzayana Gutiérrez-Hernández ^a | Javier Bello-Pineda ^{b*}
Guillermo Horta-Puga ^c | Jonathan Aguilera-Arias ^d
Eduardo Morteo-Ortiz ^e

Recibido: 27 de enero de 2025.

Aceptado: 19 de mayo de 2025.

^a Universidad Veracruzana. Boca del Río, México. Contacto: zS23000025@estudiantes.uv.mx | ORCID:

^b Universidad Veracruzana. Boca del Río, México. Contacto: jabello@uv.mx | ORCID: 0000-0003-4432-0957

*Autor para Correspondencia

^c Universidad Veracruzana. Tlalnepantla, México. Contacto: horta@unam.mx | ORCID: 0000-0003-0126-8175

^d Universidad Veracruzana. Boca del Río, México. Contacto: jonsalamanca@gmail.com | ORCID: 0009-0002-5708-6784

^e Universidad Veracruzana. Xalapa, México. Contacto: emorteo@uv.mx | ORCID: 0000-0002-9494-2976

Cómo citar:

Gutiérrez-Hernández, I., Bello-Pineda, J., Horta-Puga, G., Aguilera-Arias, J. y Morteo-Ortiz, E. (2025). Evaluación rápida del estado de condición ecológica de arrecifes coralinos mesofóticos del sistema arrecifal veracruzano. *UVserva*, (20), 222-238. <https://doi.org/10.25009/uvs.vi19.3103>

Resumen: Los ecosistemas coralinos mesofóticos son comunidades que se distribuyen típicamente a profundidades entre 30 a 150 m, dependiendo de la transparencia de la columna de agua. El estudio de estos ecosistemas ha cobrado interés recientemente, al atribuirles la función hipotética de refugio ecológico ante la presión antropogénica para especies usualmente encontradas en zonas menos profundas (<30 m). No obstante, a escala mundial, los estudios que describen su estado ecológico son muy escasos y para algunas regiones, nulos. En el presente estudio, se llevó a cabo una evaluación del estado ecológico de arrecifes distribuidos en ambientes mesofóticos de la costa central de Veracruz, México, mediante el uso del Índice Rápido de Estado Ecológico (Q-MAES). Para obtener la información, se utilizó un vehículo de operación remota (ROV), equipado con una cámara de video de alta definición. Se obtuvieron 11 videos transectos de 15 minutos cada uno, que corresponden a aproximadamente 150 m de distancia recorrida por cada unidad de muestreo. Los transectos se realizaron en la zona de barlovento (W) de los arrecifes Holandesa III, Santiaguillo y Anegadilla, en un rango de 30 a 44 m de profundidad. De cada video transecto se extrajeron 20 fotogramas, considerando cada cambio aparente del paisaje arrecifal. Para determinar el índice q-MAES, a cada fotograma se le aplicó un análisis visual rápido con el software CPCE, usando 50 puntos aleatorios y se obtuvieron datos cuantitativos considerando 4 variables; ST (Número de taxa mega bentónicos), SCB (porcentaje de cobertura biótica), SL (porcentaje de basura marina) y SE (porcentaje de cobertura de especies erectas), finalmente se determinó la correlación que existe entre el estado ecológico q-MAES con la presión antropogénica estimada que reciben los tres sitios.

Palabras clave: Ecosistemas coralinos mesofóticos; estado ecológico; afectaciones ecológicas; sistema arrecifal veracruzano.

Abstract: Mesophotic coral ecosystems (MCEs) typically occur at depths between 30 to 150 m, depending on water transparency. Recently, MCEs have gain attention as potential ecological refuges for species from shallower areas (<30 m) facing anthropogenic pressures. However, global data on their ecological status remain scarce or non-existent, particularly in certain regions. This study assesses the ecological condition of mesophotic reefs distributed along the central coast of Veracruz, Mexico, using the Rapid Ecological Status Index (Q-MAES). Data were collected using a remotely operated vehicle (ROV), equipped with a high-definition video camera. Eleven 15-minute video transects (approx. 150m each) were conducted at depths of 30-40m across the windward zones (W) of the Holandesas III, Santiaguillo and Anegadilla reefs. For each transect video, 20 frames were extracted, based on reefscape changes. The Q-MAES index was determined, through rapid visual analysis using CPCE software (50 random points per frame), evaluating four variables: Number of megabenthonic taxa (ST), percentage of biotic cover (SCB), percentage of marine litter (SL) and percentage of cover of erect species (SE). Finally, the correlation between the Q-MAES index and estimated anthropogenic pressure at the three sites was analyzed.

Keywords: *Mesophotic Coral Ecosystems; Ecological Status; Ecological Impacts; Invasive Species; Veracruz Reef System.*

Introducción

Los arrecifes de coral están entre los ecosistemas más biodiversos y productivos del planeta, los cuales se distribuyen generalmente entre las latitudes de los trópicos de Cáncer y Capricornio (Carricart-Ganivet y Horta-Puga, 1993). Su distribución es restringida debido a que necesitan condiciones específicas para sobrevivir, siendo la temperatura el factor más importante para el desarrollo de las colonias coralinas formadoras de arrecifes, con óptimos entre 22°C y 29°C.

Existe una zona de transición que representa la extensión de los ecosistemas someros a profundos, llamados ecosistemas coralinos mesofóticos (ECM). Son comunidades distribuidas típicamente en un rango de 30 a 150 m de profundidad, donde aún se encuentran varios taxones formadores de hábitats, entre los que destacan los corales, algas coralinas, macroalgas y esponjas (Kahng *et al.*, 2010; Baker *et al.*, 2016). Sin embargo, en el caso de las comunidades coralinas, el rango es un poco más restringido a los 30 a 90 m de profundidad.

La distribución de estos ecosistemas varía dependiendo de la penetración de la luz en la columna de agua asociada al aumento de la profundidad (Baker *et al.*, 2016; Lesser *et al.*, 2009), lo cual se relaciona directamente con la transparencia del agua en cada región. Otros de los factores que interactúan en la distribución y composición estructural de estos ecosistemas, son los tipos de sustrato en donde se encuentren, niveles de nutrientes, corrientes, materia orgánica suspendida, temperatura y la competencia intra e interespecífica (Baker *et al.*, 2016; Kahng *et al.*, 2014).

Debido a los rangos de profundidad en los que estos se distribuyen los ECM, se les atribuye la posible función como “refugios ecológicos”, bajo el supuesto que, a mayor profundidad, el impacto de las actividades antropogénicas, afectaciones por efectos del cambio climático y fenómenos naturales (huracanes, tsunamis), tienden a disminuir o a ser afectados en menor grado respecto a ecosistemas más someros, haciéndolos lugares aptos para el desarrollo de muchas especies durante diferentes etapas de su ciclo de vida (etapa larvaria, reproducción) (Hinderstein *et al.*, 2010; Rocha *et al.*, 2018).

No obstante, pese a su considerable importancia, el conocimiento de los ECM es relativamente escaso, en comparación con estudios realizados en ecosistemas arrecifales someros a profundidades <30 m. Esto se entiende debido a las limitaciones logísticas y de seguridad que se requiere para su estudio, puesto que se distribuyen en el límite de lo permitido para el buceo autónomo convencional (SCUBA), lo que ha restringido su estudio y caracterización ecológica a grandes escalas (Kahng *et al.*, 2017).

Gracias al avance tecnológico, actualmente se cuenta con vehículos de operación remota a distancia (ROV), así como los vehículos submarinos autónomos (AUV), que han permitido el incremento reciente en investigaciones de aspectos geomorfológicos, cartográficos, descriptivos y ecológicos de los ECM (Armstrong *et al.*, 2011; Locker *et al.*, 2010; Sherman *et al.*, 2010).

Sin embargo, son pocos los estudios enfocados a la evaluación del estado ecológico en el que se encuentran estos ecosistemas, incluyendo el efecto de la actividad humana. Lo cual es particularmente importante en ecosistemas cercanos a la zona costera, donde la presión puede aumentar, inclusive si se distribuyen en zonas con

algún esquema de manejo y conservación. Uno de los pocos estudios en los que se propone un protocolo de evaluación del estado ecológico de los ECM, es el Cánovas-Molina y colaboradores (2016).

Ellos integraron los factores considerados dentro de la evaluación del estado ecológico de ecosistemas arrecifales someros a ecosistemas coralinos mesofóticos, generando dos métodos de evaluación con métricas cuantitativas que permiten la determinación del estado ecológico de los ECM, siendo el primer estudio de esta índole a nivel global para estos ecosistemas.

Para México, la información acerca de estos ecosistemas es extremadamente escasa, por ello es importante el desarrollo de investigaciones sobre la distribución espacial de estos ecosistemas, su estado ecológico y el tipo de servicios ecosistémicos que proveen, que permitan incorporarlos a esquemas de conservación y manejo.

En el presente estudio, se llevó a cabo la primera evaluación del estado ecológico de arrecifes distribuidos en ambientes mesofóticos de la costa central de Veracruz, México, mediante el uso del Índice Rápido de Estado Ecológico (*Q-MAES*) utilizando un vehículo de operación remota y se determinó la correlación que existe entre dicho estado ecológico con la presión antropogénica estimada que reciben los tres sitios.

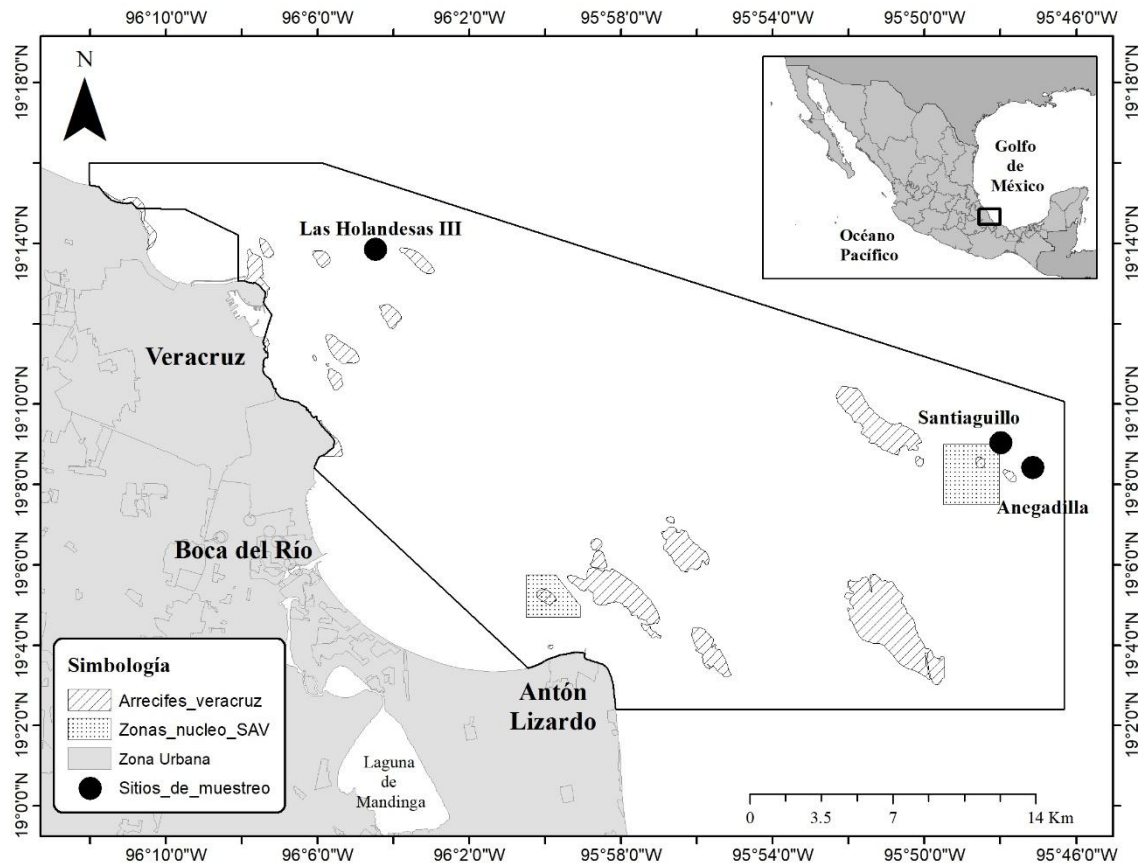
1. Material y métodos

1.1. Área de estudio

El Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano (PNSAV) tiene un área total de 64.516 ha de las cuales 1,114 son zonas núcleo y el resto área de amortiguamiento con sus diferentes sub-zonificaciones. Dentro de la poligonal se seleccionaron tres sitios de muestreo con base a estudios de batimetría previamente realizados (Mayorga *et al.*, 2021). El primer sitio fue el arrecife Holandesa III, encontrado dentro de los grupos arrecifales del norte cercano a la costa del Puerto de Veracruz y su más reciente ampliación de la zona portuaria. Los otros dos sitios fueron los arrecifes Anegadilla y Santiaguillo, que se localizan en el grupo arrecifal del sur, cerca de las costas del municipio de Alvarado, dentro de una de las dos zonas núcleo dentro del parque. Los sitios seleccionados presentan rangos de profundidad mayores a los 30 m (**Figura 1**), lo cual, los hace aptos para el presente estudio enfocado a ecosistemas arrecifales mesofóticos (Kahng *et al.*, 2014; Kahng *et al.*, 2017).

Figura 1

Poligonal del Sistema Arrecifal Veracruzano, sus zonas núcleo y arrecifes adyacentes



Nota: Los sitios muestreados se señalizan con puntos.

Fuente: Elaboración propia.

1. 2. Etapas metodológicas

1. 2. 1. Obtención de video transectos y procesamiento

Para el muestreo se eligió el método del videotransecto, filmando a profundidades de entre 30 a 45 m, para los tres sitios de estudio.

En campo, el trabajo consistió en la toma de videos con un vehículo operado remotamente (ROV) equipado con dos cámaras de video, una con calidad de 1080 FullHD y otra cámara GOPRO con ultra definición HD 4k, colocada a un ángulo aproximado de 180°, este último permitía una observación más detallada y definida de la cobertura bentónica.

Para cada transecto, el ROV era sumergido hasta la profundidad máxima, una vez fijado el rumbo se tomaba la hora y posición geográfica y se consideraba el inicio del video transecto. Se conducía el ROV siguiendo la dirección de la corriente de manera análoga a la técnica de arrastre de manta (Gress *et al.*, 2016), durante un lapso de 15

minutos, mientras las cámaras grababan la cobertura del fondo. Al finalizar ese período se tomaba nuevamente la hora y posición geográfica y se consideraba el final del transecto e inicio del siguiente.

1. 2. 2. Análisis de videos y obtención de fotogramas

El análisis de imágenes se realizó en dos pasos, la primera consistió en el análisis visual rápido de todos los videotransectos obtenidos. De esta forma se seleccionaron los videos que contaban con la calidad y el ángulo de 90° con respecto a la cobertura bentónica. A los videos seleccionados se les aplicó corrección de color, luz y sombras, mediante el programa Adobe Premier Pro CC 2017© (**Figura 2**).

Para descartar los videos que pudieran o no ser utilizados y determinar el tamaño de muestra, teniendo como referencia las unidades de tiempo y la aproximación a lo recorrido (Cánovas-Molina, *et al.*, 2016).

En total se seleccionaron 11 video transectos (**Tabla 1**), entre los tres sitios. De cada video transecto se obtuvieron 20 fotogramas considerando la inclinación de 180° con respecto a la cobertura bentónica. En total se obtuvieron 220 fotogramas, de los cuales 60 correspondieron a la Holandesa III, 80 para Santiaguillo y 80 para Anegadilla.

Tabla 1

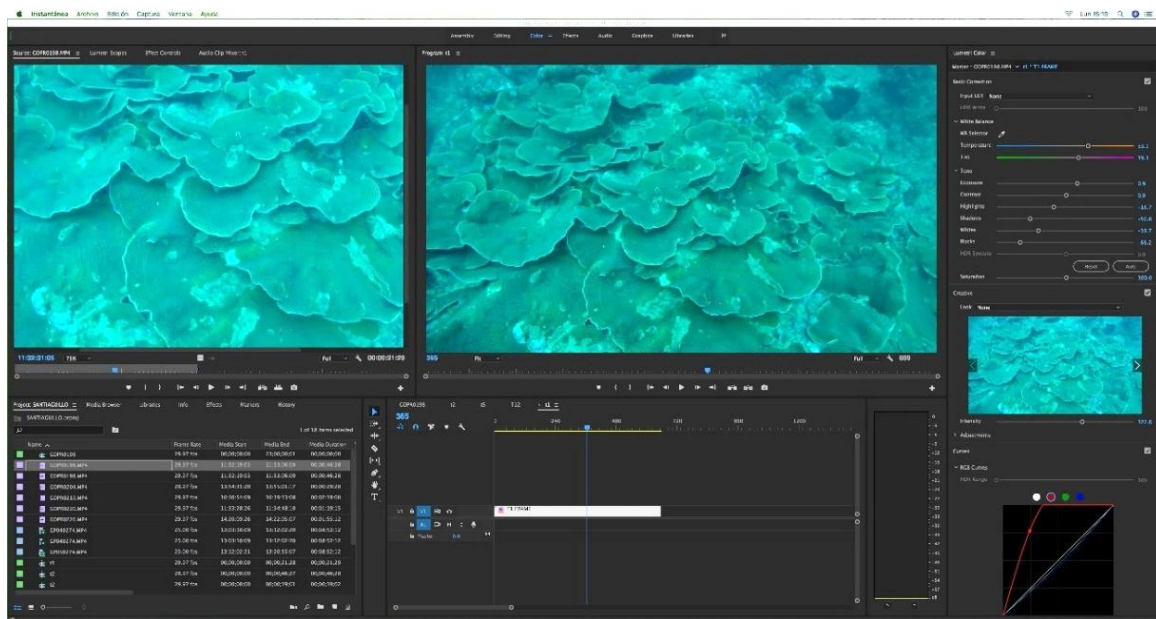
Descripción de arrecife seleccionado, total de video transectos seleccionados para el análisis de datos, área recorrida aproximada y tiempo

Grupo arrecifal en SAV	Sitio	Total de video transectos	Área recorrida aproximada	Tiempo total por video transectos
Norte	Holandesa III	3	450 m	45 min
Sur	Santiaguillo	4	600 m	60 min
Sur	Anegadilla	4	600 m	60 min

Fuente: Elaboración propia.

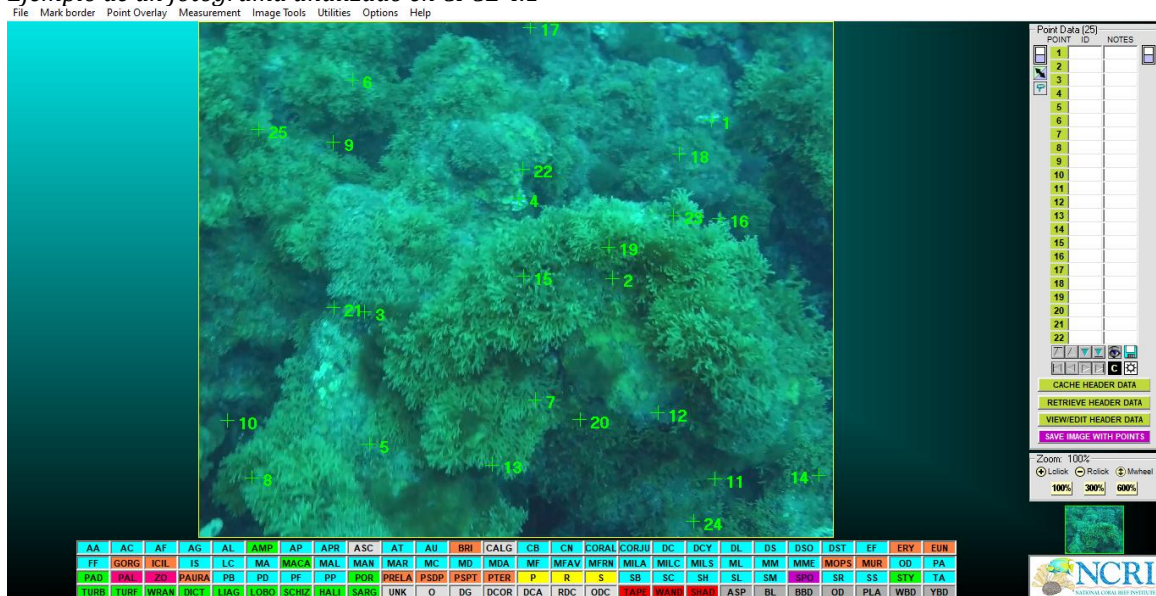
Para la estimación de cobertura se utilizó el software CPCE 4.1© (Kohler y Gill, 2005); Para cada fotograma se generaron 50 puntos aleatorios, esto para contabilizar la cobertura mega bentónica, en la que se incluyeron únicamente a corales escleractinios, macroalgas, gorgonias (corales córneos) y esponjas (Cánovas-Molina, *et al.*, 2016), en total se usaron 3,000 puntos para Holandesa III, 4,000 puntos para Santiaguillo y Anegadilla respectivamente (**Figura 3**).

Figura 2
Ejemplo de mejora digital de imágenes



Nota: A la izquierda se muestra la imagen original, a la derecha después de aplicar corrección de color, luz y sombras mediante el programa Adobe Premier Pro CC 2017©.

Figura 3
Ejemplo de un fotograma analizado en CPCE 4.1



Nota: En la fotografía se muestran los 50 puntos aleatorios generados y las categorías de cobertura bentónica para su estimación.

Fuente: Elaboración propia.

1. 2. 3. Evaluación del estado ecológico

El Índice Rápido del Estado Ecológico (q-MAES) fue propuesto por Cánovas-Molina y colaboradores en 2016, para evaluar ECM. Este consiste en la suma de los puntajes obtenidos de cuatro variables (ver **Ecuación 1** y **Tabla 2**), donde la suma total determina el estado ecológico, utilizando 3 categorías cualitativas: “bueno”, “moderado” y “malo” (**Tabla 3**)

Ecuación 1:

$$q-MAES = S_T + S_{CB} + S_{CE} + S_L$$

ST = Número de taxa megabentónicos

SCB= Porcentaje de cobertura biótica

SCE= Porcentaje de cobertura especies erectas

SL= Basura marina

Tabla 2

Descripción de las métricas aplicadas y los porcentajes considerados para otorgarle la puntuación y determinar el estado ecológico encontrado en los MCE

Métricas	1 punto	2 puntos	3 puntos
Número de taxa megabentónicos (ST)	< 19	$19 \leq \text{Taxa} \leq 30$	> 30
Porcentaje de la cobertura biótica (SCB)	< 43.5%	$43.5 \leq \% \leq 69.6$	> 69.6%
Porcentaje de cobertura especies erectas(SCE)	< 21.5%	$21.5 \leq \% \leq 30.04$	> 34.4%
Densidad de basura marina (SL)	> 0.1%	$0.1 \% \leq L \leq 0.06\%$	< 0.06%

Fuente: Cánovas *et al.*, 2016

Tabla 3

Categorías y rangos para determinar el estado ecológico de los MCE

Estado ecológico	Rangos de q- MAES
Malo	$4 \leq q-MAES \leq 6$
Moderado	$7 \leq q-MAES \leq 9$
Bueno	$10 \leq q-MAES \leq 12$

Fuente: Cánovas-Molina, *et al.*, 2016.

1. 2. 4. Índice de presión humana

Una vez obtenido el estado ecológico q-MAES, se estimó el “Índice de presión humana”, en el cual se determina si existe correlación entre el estado ecológico del ecosistema y las actividades humanas. Se consideraron las fuentes de presión humanas en un rango de al menos 10 km de distancia a cada sitio estudiado, incluyendo las descargas de ríos, áreas de pesca, poblados y actividad portuaria. Se utilizó una escala cualitativa de 0 a 5 para estimar dicha presión, donde 0 es muy poca presión y 5 es mucha presión.

La estimación de presión humana para los tres sitios de muestreo se basó, por una parte, en lo reportado por Reyna-González (2014), quien hizo un mapeo de las principales actividades por zonas dentro del PNSAV, y, por otra parte, en consulta a

expertos locales, literatura y observaciones en campo, al momento de la toma de los video- transectos en cada sitio de muestreo. Para establecer si las actividades humanas están relacionadas con el estado ecológico para los arrecifes estudiados, se llevó a cabo un análisis de correlación de Spearman, comparando el estado ecológico q-MAES, contra el Índice de presión humana, estimados para cada sitio (Cánovas-Molina, *et al.*, 2016).

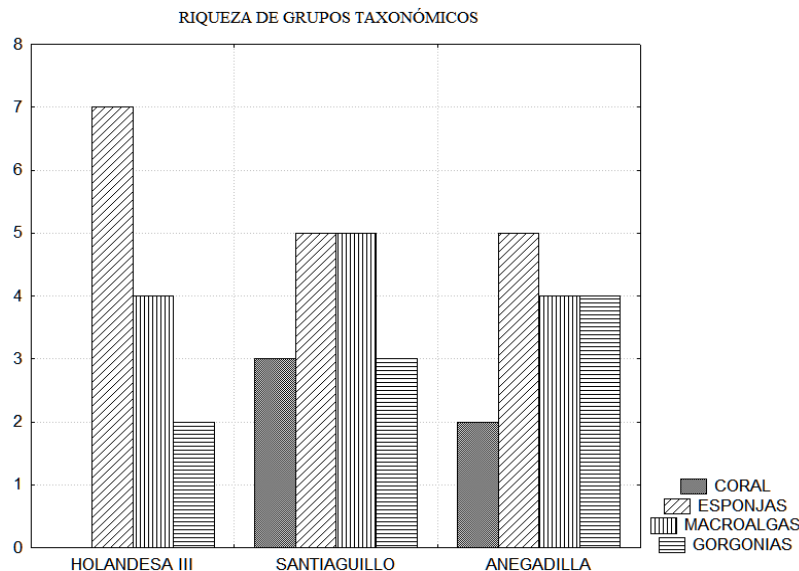
2. Resultados

2. 1. Composición bentónica

Los grupos reconocibles se ordenaron para su clasificación, dentro de grupos funcionales como esponjas, macroalgas, corales y gorgonias (**Figura 4**). Se identificaron a nivel de género siendo el grupo de mayor riqueza y dominancia en la cobertura de las Holandesa III las esponjas: *Agelas*, *Aplysina*, *Verungula*, *Haliclona*, *Iotrochota*, *Ircinia* y *Aiolochoira*. Las macroalgas pertenecientes a los géneros *Halimeda*, *Dyctiota*, *Lobophora*, TURF (tapete algal, por sus siglas en inglés, también conocidas como algas filamentosas) y *Peyssonnelia*, se encuentran distribuidos entre los arrecifes de grupo sur. Respecto a la cobertura coralina, se encontraron los géneros de corales escleractinios *Agaricia*, *Porites* y *Montastraea*. También se encontraron los corales córneos *Pseudopterogorgia*, *Ellisella* y *Anthipathes* y *Carijoa*.

Figura 4

Riqueza de grupos funcionales encontrados en los sitios de estudio
(Número de grupos por sitio)



Fuente: Elaboración propia.

El mayor porcentaje de cobertura bentónica fue de macroalgas, el cual, fue mayor para el sitio Santiaguillo con un 64.2%. Para el caso de la Holandesa III, la cobertura de este grupo fue de 57.98%. El grupo de esponjas tuvo una cobertura de 10% en Santiaguillo, mientras que en la Holandesa III tuvo un 7.75% y Anegadilla 4.43%. Las mayores coberturas de gorgonias se registraron para el sitio Holandesa III con 2.89% y las menores para Santiaguillo con 0.23%. Respecto al grupo de corales escleractinios, Santiaguillo registró la mayor cobertura con 5.51% y la Holandesa III el menor porcentaje en cobertura con 0.36% (**Tabla 4**).

Finalmente se registró porcentajes de basura marina el sitio con el mayor valor fue la Holandesa III con 0.95 %, seguido de Santiaguillo con 0.49 % y el sitio con menor evidencia de perturbaciones y presencia de basura marina, fue Anegadilla con 0.06%.

Tabla 4

Cobertura del fondo (%) de los grupos evaluados por el método q-MAES

Sitio	Coral	Esponjas	Macroalgas	Gorgonias	Basura marina
Holandesa III	0.36%	7.75%	57.98%	2.89%	0.95%
Santiaguillo	5.51%	10%	64.2%	0.23%	0.49%
Anegadilla	3.1%	3.94%	62.03%	0.79%	0.06%

Fuente: Elaboración propia.

2.2. Índice de estado ecológico q-MAES

El sitio con un mayor número de taxa megabentónicos identificados fue Santiaguillo, con 16 taxa, seguido por Anegadilla con 15, mientras que Holandesa III presentó la menor riqueza, con 13 taxa.

En cuanto a cobertura biótica, Santiaguillo también registró el porcentaje más alto (91.75%), seguido por Anegadilla (66.72%) y Holandesa III (66.09%), este último con la mayor proporción de arenales (**Tabla 5**).

Tabla 5

Número de taxa megabentónicos (ST) identificados, porcentaje de cobertura biótica (SCB), porcentaje de cobertura de especies erectas (SCE) y menor porcentaje de basura marina (SL)

SITIO	ST	SCB	SCE	SL
HOLANDESA III	13	66.09%	2.89%	0.95%
SANTIAGUILLO	16	91.75%	0.23%	0.49%
ANEGADILLA	15	66.72%	0.79%	0.06%

Fuente: Elaboración propia.

En relación con la presencia de basura marina, Holandesa III fue el sitio más impactado, con un 0.95% de residuos, mayormente fragmentos de tubos, redes y líneas de pesca (**Figura 5**).

Santiaguillo presentó un valor menor (0.49%), compuesto principalmente por desechos de origen pesquero, mientras que Anegadilla fue el sitio menos afectado, con solo un 0.06%, valor que, según los criterios de Cánovas-Molina *et al.* (2016), se encuentra dentro del rango considerado como “bueno” (**Figura 6**).

Pese a las diferencias encontradas en cada una de las categorías evaluadas dentro del índice de condición ecológica, los tres sitios fueron clasificados con un estado “malo” (**Tabla 6**) Anegadilla y Santiaguillo obtuvieron las puntuaciones más altas, con 6 puntos, mientras que Holandesa III alcanzó un puntaje menor, con 5 puntos.

Figura 5

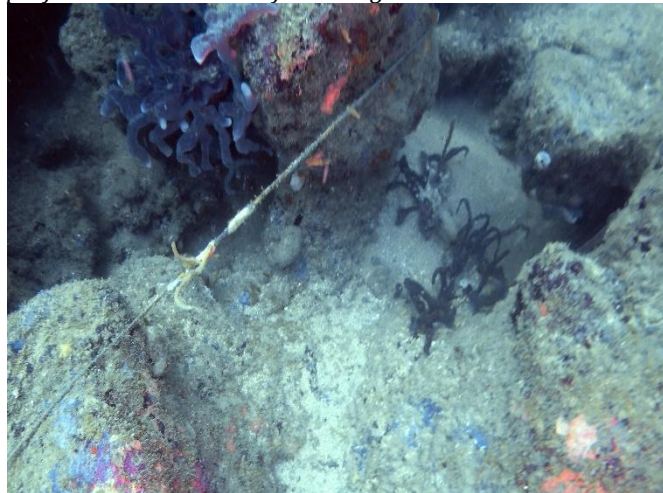
Pedazos de tubería encontrados en las Holandesa III a 32 m de profundidad



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6

Fragmentos de líneas de pesca encontrados a 40 m de profundidad en el arrecife Santiaguillo



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6

Puntuaciones asignadas. Muestra de la suma total de las métricas obtenidas en el índice q-MAES

SITIO	ST	SCB	SCE	SL
HOLANDESA 3	1	2	1	1
SANTIAGUILLO	1	3	1	1
ANEGADILLA	1	2	1	2

Fuente: Elaboración propia.

2. 3. Índice de presión humana

La **Tabla 6** muestra el resultado del análisis de presión humana estimada, donde el sitio con más presión fue la Holandesa III, por las actividades antropogénicas realizadas en la costa en la zona norte de la poligonal del SAV. Santiaguillo fue el sitio con menor impacto dentro de los arrecifes localizados en la zona sur (**Tabla 6**), considerando la correlación con el q-MAES y las presiones que existen (**Tabla 7, Figura 7**).

Tabla 7

Puntaje total para cada métrica considerada en el índice

Sitio	Pesca	Ríos	Puerto	Poblados
Las Holandesas III	3	3	5	5
Santiaguillo	1	2	2	2
Anegadilla	2	2	2	2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8

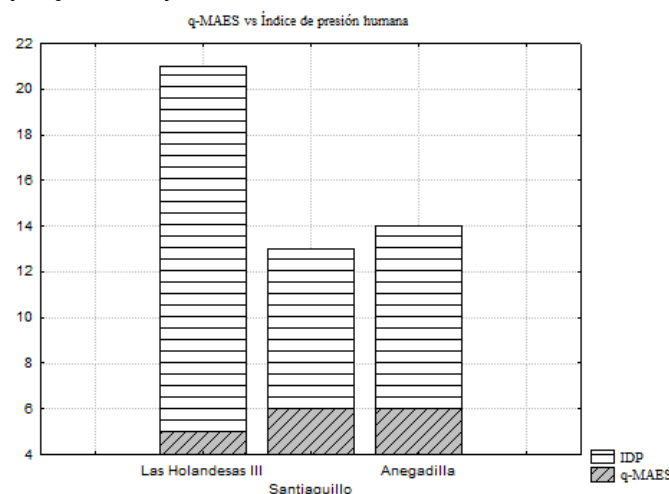
Comparación de los puntajes obtenidos para q-MAES y su estado ecológico contra la puntuación obtenida en la presión humana

Sitio	q-MAES	Estado ecológico	Presión humana
Las Holandesas III	5	Malo	16
Santiaguillo	6	Malo	7
Anegadilla	6	Malo	8

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7

Comparación de los puntajes obtenidos de presión humana (IDP), contra q-MAES en cada uno de los sitios



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de correlación entre el índice de presión humana y el q-MAES (**Tabla 7**), indican que en los tres sitios hay un valor de $r = 0.99$, lo que sugiere una influencia de las presiones humanas diferenciadas entre los mismos.

3. Discusión

La mayoría de métodos de evaluación de estado de condición ecológica disponibles, se han desarrollado para el estudio de ecosistemas arrecifales someros (<30 m), esto debido en parte a restricciones logísticas.

Tal es el caso del método de evaluación utilizado por el Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment Program (AGRRA, <https://www.agrra.org/coral-reef-monitoring>), basado en la toma de datos de porcentaje de coberturas de grupos taxonómicos, enfermedades en colonias coralinas y datos ícticos, a través de observación directa en campo y en ocasiones mediante toma de fotocuadrantes o videos y ha sido implementado ampliamente para el PNSAV (Horta-Puga, 2003; Horta-Puga y Tello-Musi, 2009; Pérez-España y Vargas-Hernández, 2008).

El avance tecnológico reciente ha permitido el uso de ROV's para obtener fotografías y videos de arrecifes en zonas de difícil acceso, como los ecosistemas coralinos mesofóticos. Esta herramienta facilita el estudio de su estructura comunitaria y el análisis de su condición ecológica. No obstante, debido a la falta de metodologías específicas para evaluar arrecifes mesofóticos, resulta necesario adaptar protocolos diseñados originalmente para arrecifes someros o para otras regiones geográficas.

En este estudio se utilizó el Índice Rápido de Estado Ecológico (q-MAES) propuesto por Cánovas-Molina y colaboradores (2016), el cual originalmente fue utilizado en zonas templadas del Mar Mediterráneo, por lo que se tuvo que ajustar las variables consideradas al tratarse el Golfo de México de un ambiente tropical.

En este estudio no solo se consideró la variabilidad y afectación que existe en la zona, si no, que se integran variables de carácter antrópico como características a evaluar durante la interpretación del estado del ecosistema y esto podría considerarse un primer paso para generar una línea base para la implementación de más estudios en ecosistemas de esta índole en esta región.

Este trabajo hace evidente que investigaciones realizadas con ROVs para la obtención de datos cualitativos y cuantitativos, tal como lo plantean en la literatura, resulta de gran apoyo y reduce las limitantes metodológicas y logísticas (Sherman *et al.*, 2010). Aunque cabe resaltar, que, por la aproximación a una costa, los niveles de sedimentación, materia disuelta y escorrentías puede causar dificultades al momento de realizar la revisión de los videos y visualización de ciertos organismos (Lesser, M., *et al.*, 2009).

Respecto a la descripción de la cobertura bentónica a partir de videotransectos, se usaron fotogramas, tomas fijas, para adquirir datos cuantitativos. Se adaptó y se consideró adicionar a la cámara fija del equipo ROV, una cámara marca GOPRO como un auxiliar para estimar la cobertura, con la finalidad, de poder obtener un ángulo similar a cuando se toman las fotografías por un buzo para estimar porcentajes de cobertura, tal y como se implementa en ecosistemas someros, siendo esta adaptación de suma importancia para posteriormente aplicar el método de evaluación del índice q-MAES (Reed *et al.*, 2017).

De acuerdo con Kahng *et al.* (2014) y Lesser *et al.* (2009), quienes describen que la composición bentónica en estos ecosistemas está dominada por esponjas y

macroalgas, con una disminución de la cobertura coralina, los resultados obtenidos en este estudio coinciden parcialmente con esta tendencia. Se registró una mayor riqueza de géneros de macroalgas, así como el porcentaje promedio de cobertura más alto para este grupo funcional en los tres sitios evaluados, en comparación con los demás grupos.

En cuanto a la cobertura coralina, esta fue menor en relación con otros grupos taxonómicos. No obstante, se observaron diferencias entre los sitios: en las Holandesas III, la cobertura coralina fue prácticamente nula, mientras que en los sitios ubicados al sur (Anegadilla y Santiaguillo), esta fue relativamente mayor. Por otro lado, la riqueza de géneros de gorgonias fue más alta en Anegadilla y Santiaguillo; sin embargo, su porcentaje dentro de la cobertura bentónica fue menor que en las Holandesas III.

Estos resultados respaldan la idea de que la distribución y composición estructural de los arrecifes puede variar incluso dentro de un mismo sistema arrecifal, posiblemente influenciada por su proximidad a áreas urbanas costeras (Baker *et al.*, 2016).

Además de su proximidad a las áreas urbanas, cabe resaltar que este sistema ha pasado por diferentes modificaciones en su manejo y estatus de categoría de protección (DOF, 2012) por lo que, de acuerdo con los resultados de Reyna (2014), sí existe evidencia de la práctica de actividades de carácter pesquero en los tres sitios, al mismo tiempo, se encontraron pedazos de tubería de origen desconocido, en el sitio las Holandesas III, la cual se encuentra con una aproximación de 5.13 km a la nueva ampliación portuaria, aprobada en el mismo año de la publicación del trabajo antes mencionado. Sin embargo, se requiere más literatura y análisis más detallados, que hablen del cambio de la composición bentónica a estas profundidades ante este tipo de posibles perturbaciones de origen antrópico.

Este trabajo presenta un método de evaluación rápida, que es útil para cubrir grandes áreas a un nivel de resolución grueso, pero es necesario continuar con el desarrollo de métodos cuantitativos que permita hacer evaluaciones a niveles taxonómicos finos.

Además de que este método, puede ser utilizado también para seguir tomándolo como referencia y generar un análisis con coberturas y porcentajes de estudios realizados, si no, en el mismo sitio o sistema, dentro de la misma zona geográfica, puesto que este análisis fue propuesto para condiciones del mar Mediterráneo.

Para esto sería necesario mejorar los diseños de muestreo y desarrollar marcos teóricos sólidos, por lo que resalta también la necesidad de hacer más análisis de este carácter en estos ecosistemas e incluir mayor o menor cantidad de variables de acuerdo con las características identificables con los datos obtenidos. Esclareciendo así la oportunidad de desarrollar una línea base para el desarrollo del uso o implementación de programas computacionales que permitan automatizar el reconocimiento de patrones de cobertura, que faciliten obtener datos cuantitativos en estos ecosistemas.

Cabe resaltar, que gracias a la utilización y adaptación de metodologías utilizadas en ecosistemas someros durante nuestro estudio, mediante la estimación de los porcentajes de cobertura con la utilización del software *CPCE 4.1*, se pudo obtener las métricas consideradas y realizar un análisis análogo al propuesto, generando datos numéricos para categorizar el estado ecológico en el que se encontraron los ecosistemas coralinos mesofóticos de las Holandesas III, Santiaguillo y Anegadilla ubicados dentro de la poligonal del PNSAV.

No obstante, que se esperaba encontrar diferencias considerables en los estados ecológicos de cada sitio, a causa de la distancia en particular de cada sitio, su proximidad a las áreas urbanas y las actividades permitidas descritas en el DOF (2012) y el Programa de manejo en el PNSAV (DOF, 2017), esto no ocurrió y los tres sitios se encontraron dentro de la categoría de "mal estado ecológico".

En consecuencia, se concluye que, en efecto, las actividades antrópicas, cercanía a estas áreas urbanas, así como las características físicas propias de cada sistema, son indicadores importantes por considerar y juegan un papel muy importante, para mejorar o afectar el estado ecológico en el que se encuentren estos ecosistemas.

Esto resalta la importancia de considerar estos ecosistemas no solo para la toma de decisiones y su futuro manejo, sino también la necesidad de la implementación de este tipo de evaluaciones, que aporten información, no solo del estado de condición ecológica, sino que se debe de incluir el posible efecto de afectaciones derivadas de acciones de gestión o manejo, actuales o pasadas y contemplar tanto a los ecosistemas someros y la relación existente con los ecosistemas mesofóticos.

Agradecimientos

Este trabajo se hizo con el apoyo del proyecto CONACYT con clave PDCPN 2015-606.

Referencias

- Armstrong**, R. A., Singh, H., & Kunz, C. (2011). Large-scale mapping and characterization of deep reef habitats in the US Caribbean. *Gulf and Caribbean Fisheries Institute*. <https://tinyurl.com/3uxxx7w3>
- Baker**, E. K., y Harris, P. T. (Eds.). (2016). Mesophotic coral ecosystems: a lifeboat for coral reefs?. *United Nations Environment Programme and GRID-Arendal*.
- Cánovas-Molina**, A., Montefalcone, M., Bavestrello, G., Cau, A., Bianchi, C. N., Morri, C. & Bo, M. (2016). A new ecological index for the status of mesophotic megabenthic assemblages in the Mediterranean based on ROV photography and video footage. *Continental Shelf Research*, 121, 13-20. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2016.01.008>
- Carricart-Ganivet**, J. P. y Horta-Puga, G. (1993). Arrecifes de coral en México. Biodiversidad marina y costera de México, *CONABIO*, 81-92.
- DOF** (2012) DECRETO que modifica al diverso por el que se declara Área Natural Protegida, con el carácter de Parque Marino Nacional, la zona conocida como Sistema Arrecifal Veracruzano, ubicada frente a las costas de los municipios de Veracruz, Boca del Río y Alvarado del Estado de Veracruz Llave, con una superficie de 52,238-91-50 hectáreas, publicado los días 24 y 25 de agosto de 1992, *Diario Oficial de La Federación*.

- DOF** (2017) ACUERDO por el que se da a conocer el resumen del Programa de Manejo del Área Natural Protegida con categoría de Parque Nacional la zona conocida como Sistema Arrecifal Veracruzano, *Diario Oficial de La Federación*.
- Gress**, E., Arroyo-Gerez, M., Wright, G., & Andradi-Brown, D. A. (2016). Mesophotic coral ecosystems (MCEs) act as deep reef refuges for fish populations in Cozumel, Mexico. *Gulf and Caribbean Fisheries Institute*, 85-86. https://proceedings.gcfi.org/wp-content/uploads/2018/10/GCFI_69_22b.pdf
- Horta-Puga**, G. (2003). Mexico. Condition of selected reef sites in the Veracruz Reef System (stony corals and algae). *Atoll Research Bulletin*. <https://doi.org/10.5479/si.00775630.20.360>
- Horta-Puga**, G., & Tello-Musi, J. L. (2009). Sistema Arrecifal Veracruzano: condición actual y programa permanente de monitoreo: Primera Etapa. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Iztacala. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. DM005. México DF, 4-7.
- Hinderstein**, L. M., Marr, J. C. A., Martinez, F. A., Dowgiallo, M. J., Puglise, K. A., Pyle, R. L., & Appeldoorn, R. (2010). Theme section on "Mesophotic coral ecosystems: characterization, ecology, and management". *Coral Reefs* 29, 277 - 251. <https://doi.org/10.1007/s00338-010-0614-5>
- Kahng**, S. E., Copus, J. M., & Wagner, D. (2014). Recent advances in the ecology of mesophotic coral ecosystems (MCEs). *Current opinion in environmental sustainability*, 7, 72-81. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.11.019>.
- Kahng**, S., Copus, J. M., & Wagner, D. (2017). Mesophotic coral ecosystems. *Marine animal forests*, 10, 978-3.
- Kahng**, S. E., Garcia-Sais, J. R., Spalding, H. L., Brokovich, E., Wagner, D., Weil, E., & Toonen, R. J. (2010). Community ecology of mesophotic coral reef ecosystems. *Coral Reefs*, 29(2), 255-275. <https://doi.org/10.1007/s00338-010-0593-6>
- Kohler**, K. E., & Gill, S. M. (2006). Coral Point Count with Excel extensions (CPCe): A Visual Basic program for the determination of coral and substrate coverage using random point count methodology. *Computers & Geosciences*, 32(9), 1259-1269. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.11.009>
- Lesser**, M. P., Slattery, M., & Leichter, J. J. (2009). Ecology of mesophotic coral reefs. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 375(1-2), 1-8.
- Locker**, S. D., Armstrong, R. A., Battista, T. A., Rooney, J. J., Sherman, C., & Zawada, D. G. (2010). Geomorphology of mesophotic coral ecosystems: current perspectives on morphology, distribution, and mapping strategies. *Coral Reefs*, 29(2), 329-345. <https://doi.org/10.1007/s00338-010-0613-6>
- Mayorga-Martínez**, M., Bello-Pineda, J., Perales-Valdivia, H., Pérez-España, H., & Heyman, W. D. (2022). Characterizing Geomorphology of Mesophotic Coral Reef Ecosystems in the Southwestern Gulf of Mexico: Implications for Conservation and Management. *Advances in 3D Habitat Mapping of Marine Ecosystem Ecology and Conservation*. doi: 10.3389/fmars.2021.639359
- Pyle**, R. L., Boland, R., Bolick, H., Bowen, B. W., Bradley, C. J., Kane, C., Kosaki, R. K., Langston, R., Longenecker, K., Montgomery, A., Parrish, F. A., Popp, B. N., Rooney, J., Smith, C. M., Wagner, D., Spalding, H. L. (2016) A comprehensive investigation of mesophotic coral ecosystems in the Hawaiian Archipelago. *Peer J* 4:e2475 <https://doi.org/10.7717/peerj.2475>

- Pérez** España, H. y J. M. Vargas Hernández (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.
- Reed**, J., Farrington, S., Moe, H., Harter, S. L., Hanisak, M. D., David, A., & Pomponi, S. A. (2017). Characterization of mesophotic coral/sponge habitats and fish assemblages in the regions of Pulley Ridge and Tortugas from ROV Dives during R/V Walton Smith Cruises of 2012 to 2015.
- Reyna** G., P. (2014). Modelo de soporte para la toma de decisiones en el Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano.
- Rocha**, L. A., Pinheiro, H. T., Shepherd, B., Papastamatiou, Y. P., Luiz, O. J., Pyle, R. L., & Bongaerts, P. (2018). Mesophotic coral ecosystems are threatened and ecologically distinct from shallow water reefs. *Science*, 361(6399), 281-284.
- Sherman**, C., Nemeth, M., Ruíz, H., Bejarano, I., Appeldoorn, R., Pagán, F. & Weil, E. (2010). Geomorphology and benthic cover of mesophotic coral ecosystems of the upper insular slope of southwest Puerto Rico. *Coral Reefs*, 29(2), 347-360.