

CICIMAR OCEÁNIDES ISSN 2448-9123 https://cicimaroceanides.mx Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas https://doi.org/10.37543/oceanides.v37i1-2.274

CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN DEL FONDO EN EL ARRECIFE ROCOSO LA SORPRESA (BAJA CALIFORNIA SUR, MÉXICO) IMPLEMENTANDO MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN ESPACIAL

del Pino-Machado, Arturo^{1*}, José Manuel Borges-Souza¹, Francisco Javier Urcádiz-Cázares², Víctor Hugo Cruz-Escalona¹, Guillermo Martínez-Flores⁴, Arelly Ornelas-Vargas¹

^{1*} Departamento de Pesquerías y Biología Marina. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. Instituto Politécnico Nacional. Av. IPN s/n Col. Playa Palo de Santa Rita Aparatado Postal 592, La Paz, Baja California Sur CP 23096, México.² Departamento de Ciencias Básicas, Instituto Tecnológico de La Paz, Tecnológico Nacional de México, Blvd. Forjadores de Baja California Sur 4720, Tecnológico, 23080, La Paz, Baja California Sur, México.³ Departamento de Ciencias Marinas / Instituto Politécnico Nacional. / Av. IPN s/n Col. Playa Palo de Santa Rita Aparatado Postal 592, La Paz, Baja California Sur, México.³ Departamento de Oceanografía / Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas / Instituto Politécnico Nacional. / Av. IPN s/n Col. Playa Palo de Santa Rita Aparatado Postal 592, La Paz, Baja California Sur CP 23096, México. *Autor de correspondencia, Correo electrónico: adelpinom1700@alumno.ipn.mx.

RESUMEN. La caracterización y clasificación de unidades espaciales del arrecife rocoso de La Sorpresa se ha enfocado en aspectos abióticos y bióticos mediante tecnologías y métodos de teledetección espacial que permitem mapear el fondo marino. Adicionalmente el empleo de datos in situ y métodos de interpolación espacial permiten estimar valores continuos de las variables deseadas. En este contexto, el objetivo del presente estudio es caracterizar espacialmente el fondo de un arrecife rocoso mediante métodos de interpolación espacial de variables. Para ello se emplearon 40 puntos para la interpolación y 20 como datos independientes para la evaluación de los modelos. Como métodos de interpolación espacial se emplearon Distancia Inversa Ponderada (IDW), el Vecino Natural (NN) y la regresión del proceso Gaussiano (Kriging). También se realizó una Clasificación multivariante de coberturas a través de un método no supervisado. El método IDW mostró los valores más bajos en los indicadores de evaluación tos de condiciones, inferidas a partir de la caracterización de los valores modelados y su distribución espacial. De manera general el arrecife rocoso de la Sorpresa está constituido en su basamento por tepetate y rocas los cuales les dan soporte a las coberturas de algas coralinas, coral y macroalgas. Con la integración de los mapas de cobertura compuesta se logró detectar zonaciones dentro del área. Los resultados obtenidos demuestran que el uso de observaciones puntuales junto con la implementación de métodos de interpolación espacial, resultan una estrategia eficiente, con un desempeño adecuado en las caracterizaciones de hábitats.

Palabras-clave: Interpolación, Golfo de California, arrecife rocoso, clasificación no supervisada.

Characterization and classification of bottom rocky reef La Sorpresa (Baja California Sur, Mexico) using spatial interpolation methods

ABSTRACT. The characterization and classification of spatial units of reefs have focused on abiotic and biotic aspects through spatial remote sensing technologies and methods that allow mapping the seabed. Additionally, in situ data and spatial interpolation methods enable the estimate of continuous values of the desired variables. In this context, the objective of the present study is to spatially characterize the bottom of a rocky reef using methods of spatial interpolation of variables. For this, 40 points were used for interpolation and 20 as independent data for evaluating the models. Inverse Distance Weighted (IDW), Natural Neighbor (NN), and Gaussian process regression (Kriging) were used as spatial interpolation methods. In addition, a multivariate Coverage Classification was also performed through an unsupervised method. The IDW method showed the lowest values in the evaluation indicators for all the interpolated coverages. The multivariate analysis showed that five sets of conditions prevail, inferred from the characterization of the modeled values and their spatial distribution. In general, the rocky reef of Sorpresa has tepetate and rocks in its base, which supports the coverage of coralline algae, coral, and macroalgae. Furthermore, integrating the composite coverage maps made it possible to detect zoning within the same variables. The results show that using punctual observations and implementing spatial interpolation methods is an efficient strategy, with adequate performance in habitat characterizations.

Keywords: Interpolation, California Gulf, rocky reef, unsupervised classification

del Pino-Machado, A., Borges-Souza, J. M., Urcádiz-Cázares, F. J., Cruz-Escalona, V. H., Martínez-Flores, G. & Ornelas-Vargas, A. (2022). Caracterización y clasificación del fondo en el arrecife rocoso La Sorpresa (Baja California Sur, México) implementando métodos de interpolación espacial. *CICIMAR Oceánides*, 37(1-2), 13-24.

INTRODUCCIÓN

Los arrecifes rocosos son uno de los ecosistemas costeros físicamente más complejos y mejor representados en el Pacífico mexicano que, soportan una importante diversidad biológica en comparación con las áreas que los circundan (Calapiz-Segura, 2004; Villegas-Sánchez *et al.*, 2009). Hasta ahora, la caracterización y clasificación de unidades espaciales de dichos arrecifes se ha enfocado en aspectos abióticos y bióticos mediante tecnologías y métodos de teledetección espacial que permiten mapear el fondo marino. Generalmente se utilizan imágenes de satélite de alta resolución espacial y espectral en costas someras para obtener clasificación de unidades mediante procesamiento digital de estas imágenes (Silvero *et al.* 2021). También se ha empleado imágenes obtenidas a partir de vehículos aéreos y submarinos no tripulados (drones) para la observación indirecta de hábitats bentónicos (Tait *et al.*, 2021; Nababan *et al.*, 2021)

Fecha de recepción: 15 de marzo de 2021

Fecha de aceptación: 23 de septiembrre de 2022

Vol.37 No. 1 Enero - Junio 2022

El uso de imágenes con sistema LIDAR (Light detection and ranging) también son muy útiles en la clasificación de coberturas abióticas (Wang et al. 2019); incluso el uso de fotografías aéreas ha permitido clasificar arrecifes (Sheppard et al. 1995). A la par de estas tecnologías y métodos implícitos, las observaciones in situ de manera puntual o por transectos en un arrecife también es una vía directa para la caracterización el medio biótico y abiótico, incluso es un complemento de los métodos de teledetección antes mencionados. Sin embargo, el uso de métodos sofisticados muchas veces es poco accesibles por su elevado costo o poca disponibilidad. Si bien el muestreo in situ es una alternativa económicamente viable y que arroja información derivada de una inspección directa de los elementos abióticos y bióticos en los arrecifes rocosos, el método no permite extenderse a un análisis espacial cartografiable a una escala por ejemplo 1:5000 o 1:20,000.

En contraparte, existe una metodología accesible conocida como interpolación espacial (Isaak y Srivastava, 1989; Franke y Nielson, 1991) que permiten estimar valores continuos de una variable que represente, por ejemplo, una cobertura de tipo abiótico o biótico en un área geográfica determinada. La interpolación espacial se realiza mediante algoritmos matemáticos deterministas o geoestadísticos (Isaak y Srivastava, 1989) para predecir valores de objetos o elementos partir de datos puntuales (muestreo in situ) referenciados geográficamente, bajo el supuesto que aquellos objetos cercanos distribuidos espacialmente estén relacionados por sus características intrínsecas (Krivoruchko, 2012; Xiao et al. 2016). Las interpolaciones se han utilizado para caracterizar y clasificar el fondo marino en bahías y lagunas (Sheehan et al. 2009; Tapia-Silva et al., 2015; Urcádiz-Cázares et al., 2017), pero hasta ahora, no se han explorado para zonas arrecifales rocosas. Los métodos de interpolación permitirían caracterizar espacialmente las coberturas del fondo de un arrecife en función de una variable o múltiples variables superpuestas en un sistema de información geográfica (SIG), lo cual puede contribuir para el análisis de patrones, delimitación y clasificación de unidades útiles para los estudios de ecología y conservación (Chust et al. 2007; Urcádiz et al. 2017).

En este contexto, el objetivo del presente estudio es caracterizar espacialmente el fondo de un arrecife rocoso (La Sorpresa, Baja California Sur) mediante métodos de interpolación espacial de variables que representen el porcentaje de cobertura de elementos bióticos y abióticos, particularmente de rocas, tepetate (rocas sedimentarias), arena, coral, macroalgas y algas coralinas. Adicionalmente, se pretende clasificar al arrecife rocoso utilizando el conjunto multivariado de coberturas interpoladas, con el objeto determinar unidades del fondo con potencial utilidad para las investigaciones ecológicas en dichos ambientes marinos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El arrecife rocoso La Sorpresa conocido también como El Saltito o Playa Muertitos, se ubica al sur de la Península de Baja California en el Golfo de California (Fig. 1), corresponde a un área reducida a ~ 0.7 km² con profundidades de hasta 12 m. El fondo está conformado por afloramientos sedimentarios consolidados llamados localmente como "tepetate", también son comunes agregaciones rocosas de diversos tamaños que van desde cantos rodados hasta bloques que forman pequeños islotes, entre macizos rocosos ocurren claros con arenas y parches coralinos (Sánchez-Caballero, 2014). El fondo está cubierto por macroalgas a manera de parches y algas coralinas cuya cobertura es mayor en comparación con el resto del área circundante (Sánchez-Caballero et al., 2019). Esta variedad de coberturas combinadas no ha sido caracterizada a detalle y se considera que su heterogeneidad puede contribuir al estudio ecológico de comunidades marinas.

Para caracterizar el arrecife y obtener información necesaria para la aplicación de modelos de interpolación, se procedió a tomar muestras dentro del arrecife. Mediante un muestreo aleatorio simple, se generaron 60 puntos referenciados geográficamente en un SIG, posteriormente, con ayuda de un GPS y a partir de buceo autónomo se llegó a cada punto y en ellos se colocó un marco de 1 m2 sobre el fondo. El marco cuenta con nueve cuadrantes a manera de subdivisiones que permite cuantificar visualmente la cobertura de elementos bióticos y abióticos en términos porcentuales. De acuerdo con las características del sitio, se contabilizo la cobertura de rocas, tepetate, arena, coral, macroalgas y algas coralinas (Tabla 1; Figura A-1). Los puntos georreferenciados fueron divididos aleatoriamente en 40 para implementar los modelos de interpolación para cada cobertura y 20 puntos para evaluar su capacidad predictiva, permitiendo analizar el rendimiento entre diferentes algoritmos de interpolación.

Para cada cobertura (variable) se realizó la interpolación en el sistema de información geográfica Arc-GIS 10.8 a partir de tres algoritmos diferentes comúnmente utilizados para el medio marino (Urcádiz-Cázares et al. 2017): la Distancia Inversa Ponderada, la regresión del proceso Gaussiano llamado Kriging y, el Vecino Natural (Isaak y Srivastava, 1989; Franke v Nielson, 1991). Para el método de Distancia Inversa Ponderada se emplearon los ajustes comúnmente utilizados en literatura de acuerdo con Rigaux et al. (2001), para lo cual, el parámetro de peso se mantuvo en dos (el valor predeterminado), el radio de búsqueda fue un máximo de cinco puntos. Para los modelos con Kriging se utilizó un análisis de semivariogramas empíricos calculados a partir del modelo esférico (Isaak y Srivastava, 1989). Por otro, los modelos con Vecino Natural fueron calibrados de acuerdo con los valores predeterminados debido a que el mismo algoritmo aplica auto ponderación a razón de la magnitud



Figura 1. Localización del área de estudio (arrecife de La Sorpresa). Fuente: Elaboración propia

y distribución de puntos en el espacio (Sibson, 1981).

Como producto final del modelado, el SIG muestra un mapa o capa de las coberturas que indican los valores continuos de 0 a 100% predichos en el espacio y representan los elementos estudiados dentro del arrecife. La evaluación de estos modelos se llevó a cabo siguiendo la propuesta de Luo et al.(2008), esto es, contrastando los valores que arrojan la predicción de cada modelo contra los 20 valores independiente calculando así, las métricas medias del error y la raíz cuadrada del error cuadrático medio. De acuerdo con los valores de estas métricas (basadas en la diferencia entre los valores observados y predichos en los modelos), se puede seleccionar al modelo que presente el menor error entre los tres diferentes algoritmos utilizados. Una vez establecido el mejor modelo, se procedió a clasificar los valores de los pixeles a tres intervalos numéricos que representan las categorías o niveles "bajo, medio y alto" con el objeto de facilitar el análisis de la distribución de las coberturas. El procedimiento de clasificación se realizó con el método de rupturas naturales Jenks (De Smith *et al.*, 2007) que considera la frecuencia y magnitud de los pixeles, así como su naturaleza de cambio en su variabilidad. De esta manera, se considera que cada intervalo representa el nivel bajo, medio o alto del porcentaje de cobertura en cada píxel, permitiendo observar la distribución geográfica de dichos niveles. En un paso posterior, esta distribución de los tres niveles de cada cobertura se transformó a polígonos en el SIG con el objeto de configurar "mapas de coberturas compuestas" que permita superponer capas y observar la combinación de coberturas en el arrecife, lo cual permite caracterizar la heterogeneidad de coberturas, su distribución y podría representar hábitats para especies marinas.

Utilizando las capas selectas de cobertura arrojadas en los modelos de interpolación en formato ráster, se implementó una clasificación multivariante no supervisada (Rodríguez-Basalo et al. 2022) la cual consiste en transformar, agrupar y discriminar todos los valores de las múltiples capas para finalmente configurar unidades en el espacio geográfico dada la naturaleza de estos. Esto se logra fundamentalmente a través de un análisis de componentes principales, un análisis clúster o conglomerado optimizado, y un análisis de clasificación bayesiana de máxima verosimilitud. Como primer paso, se integraron las capas de cobertura en un solo formato ráster como un archivo de conjunto bandas tipo "Geodatabase" utilizando las utilidades de procesamiento de ráster del ArcGIS 10.3.

Se realizó un análisis de componentes principales del conjunto de bandas ráster de cobertura transformando los datos originales desde el espacio de atributos multivariantes en un nuevo espacio de atributos cuyos ejes se rotan con respecto al original (componentes). La razón de transformar a nuevos componentes consiste en reducir las variables originales las cuales no están correlacionadas y se elimina la redundancia de datos (Richards, 2013), de esta manera se generó una nueva capa ráster multibanda utilizando tres componentes principales que explica ~92% de la varianza.

Tabla 1: Componentes del ambiente bentónico escogidos para la caracterización de la heterogeneidad del fondo marino

Tipo	Componentes	Características
Abiótico	Roca	Macizos formados por dis-
	Tepetate	tintos tipos de rocas, princi- palmente ígneas, metamór- ficas y sedimentarias Macizos consolidados for- mados por sedimentos an- tiguos.
	Arena	Sedimento no consolidado, compuesto de partículas cuyo tamaño varía entre 0.063 y 2 milímetros.
Biótico	Cobertura de coral	Colonia de organismo po- lipoides principalmente dominados por especies de los géneros Pocillopora y Porites y en menor propor- ción, los géneros Psammo- cora y Pavona
	Macroalgas	Alga marina de tamaño macroscópico, multicelula- res en general
	Algas coralinas	Algas marinas con depósi- tos calcáreos contenidos dentro de las paredes celu- lares

Posteriormente, se realizó una agrupación de pixeles transformados mediante un análisis de conglomerado optimizado e iterativo (ISO clúster, de las herramientas del análisis espacial del ArcGIS 10.3) que separa todos los pixeles en el espacio multidimensional en un número de grupos unimodales de acuerdo con la naturaleza misma de los datos, en este caso se agruparon en cinco en función del valor promedio multivariante resultando en un archivo de firma (Richards, 2013).

Finalmente, se implementó el algoritmo de clasificación bayesiano de máxima verosimilitud que asigna a cada celda a una de las clases predeterminadas en función del vector del valor promedio y la matriz de covarianza indicada en el archivo de firma. De esta manera, se estima la probabilidad para cada clase a fin de determinar la pertenencia de las celdas a la clase, el resultando de la clasificación es un mapa que divide el área de estudio en clases o unidades de ocurrencia dada la naturaleza multivariante de las variables en el espacio geográfico (Richards, 2013; Nijhawan et al., 2017). Cabe destacar que, en este caso, se asignaron cinco clases debido a que representa el número de elementos con mayor extensión espacial dentro del arrecife (tepetate, macroalgas, arena, cobertura de coral y algas coralinas), por lo cual se asumen cinco unidades principales en el fondo del arrecife rocoso, que a su vez es un prerrequisito en el análisis no supervisado. Con la delimitación de estas unidades, se procedió a calcular los estadísticos media y desviación estándar con los valores originales de cada cobertura para caracterizar e interpretar con facilidad el fondo del arrecife. Finalmente, esta clasificación representa un análisis alternativo que integra información de coberturas de todas las capas desde la perspectiva multivariante y las representa geográficamente.

RESULTADOS

Los modelos de interpolación realizados mediante Distancia Inversa Ponderada, Kriging y Vecinos Naturales para los cinco tipos de coberturas presentaron valores bajos de la media del error y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (Tabla 1), indicando valores similares entre lo predicho y lo observado con los 20 puntos independientes. No obstante, comparando los valores de estas métricas, el de Distancia Inversa Ponderada mostró los valores más bajos en ambos indicadores para todas las coberturas interpoladas. Por tanto, se asume que este modelo de interpolación espacial representa mejor la variabilidad espacial de las diferentes coberturas en comparación con los otros dos.

Los modelos realizados con la Distancia Inversa Ponderada y clasificados en niveles de cobertura se presentan en la figura 2. De manera global, se observa que la distribución de las coberturas es espacialmente diferente en la forma y distribución del área ocupada. Las coberturas más extendidas de acuerdo con los niveles medio y alto corresponden a las macroalgas, arena y el tepetate, respectivamente; y en segundo plano, figuran las rocas, algas coralinas y la cobertura de coral. Al combinar estas capas en el SIG, se constituyen los mapas de cobertura compuestas que se muestran en la figura 3. Las combinaciones de capas tomando los polígonos delimitados en los niveles medio y alto del porcentaje de cobertura, muestran la variabilidad de elementos interpuesto y su distribución dentro del arrecie La Sorpresa. Las figuras 3a, 3b y 3c describen los cambios en la zonación de las coberturas bióticas sobre fondo abiótico, dígase arena, roca y tepetate. Las figuras 3d, 3e y 3f muestran cómo cambia el sustrato sobre el que se disponen los diferentes componentes bióticos (algas coralinas, corales y macroalgas).

Respecto a la clasificación no supervisada de las ocho coberturas, el análisis multivariante permitió separar en cinco unidades el área de estudio, como se muestra en la figura 4. Las características de cada unidad en términos de los valores originales de los pixeles se resumen con en la tabla 3. La unidad uno se caracteriza por tener un promedio porcentual de tepetate del 48%, algas coralinas del 38% y macroalgas del 30%. La unidad dos, muestra porcentajes prominentes para el tepetate con el 68% en promedio, macroalgas del 61% y cobertura de coral del 28%. Por su parte, la unidad tres tiene mayor porcentaje promedio de arena con un 52%, macroalgas del 38%, tepetate del 24% y rocas del 21%. La unidad cuatro se encuentra representada en mayor porcentaje promedio por la cobertura de coral con un 44%, rocas con 32% y macroalgas con 25%. Por último, la unidad cinco se caracteriza por un porcentaje promedio de arenas con el 70%, rocas con 64% y macroalgas con 55 %.



Figura A-1. Componentes del ambiente bentónico escogidos para la caracterización de la heterogeneidad del fondo marino.

DISCUSIÓN

Cuando se mapean las coberturas de fondo en arrecifes, generalmente se opta por la interpretación análoga o digital por procesamiento de imágenes obtenías de satélites, aviones o drones (Sheppard et al. 1995; Tait et al. 2021; Nababan et al. 2021 y Silvero et al. 2021), esto permite mapear extensiones geográficas considerables, pero la inversión de recursos es elevada. En otros casos, una caracterización de arrecifes rocosos se desarrolla a partir de un conjunto de observaciones in situ de tipo puntual o por transepto que permite observaciones directas de los elementos bióticos y abióticos, es accesible económicamente, pero no informa sobre su distribución en extensiones espaciales más amplias (Sánchez-Caballero, 2014). En este estudio se demuestra que a partir de observaciones in situ, es posible predecir valores de coberturas en el espacio geográfico en arrecifes rocosos, con un bajo índice de error menor al 1% de acuerdo con la media del error y la raíz cuadrada del error cuadrático medio.

Los tres métodos de interpolación empleados en este estudio, también han sido utilizados para describir las características abióticas y bióticas en otras regiones, por ejemplo para de los sedimentos como el tamaño de la partícula, el grado de selección y el porcentaje de carbonato de calcio (Urcádiz-Cazáres et al. 2017) las metodologías para la delimitación de unidades en los fondos dominados por sedimentos no consolida- dos son escasas. Objetivos. Clasificar y caracterizar unidades en el fondo marino a partir de la distribución espacial de cuatro variables: el contenido de carbonato de calcio, el tamaño medio de grano, la clasificación del sedimento y la profundidad en la bahía de La Paz. Métodos. La distribución espacial de las cuatro variables mencionadas fue generada a partir de modelos de interpolación. Los modelos se elaboraron con base en los datos de 85 muestras de

Tabla 2. Comparación de los valores de la Media del error (ME), Raíz media del error cuadrático (RCEC) para los métodos de interpolación Distancia media ponderada (IDW), Kriging ordinario (KR) y Vecino natural (NN)

	NN		KR		IDW	
_	ME	RCEC	ME	RCEC	ME	RCEC
Alga coralina	-0.05	0.057	0.02	0.031	0.02	0.027
Arena	-0.04	0.052	0.02	0.023	0.01	0.015
Bloques	-0.05	0.059	0.03	0.031	0.02	0.027
Canto rodado	-0.04	0.052	0.03	0.037	0.02	0.028
Cobertura coral	-0.06	0.069	0.02	0.02	0.01	0.014
Macroalgas	-0.03	0.041	0.02	0.027	0.01	0.015
Rocas	-0.03	0.043	0.02	0.026	0.01	0.015
Tepetate	-0.04	0.044	0.02	0.027	0.01	0.014



Figura 2. Representación espacial de la distribución de las variables de cobertura del fondo. La gama de grises representa los niveles bajo, medio y alto según el método de rupturas naturales de Jenks. Fuente: Elaboración propia con datos de la salida del modelo



Figura 3. Delimitación de hábitats particulares de los elementos abióticos y bióticos del fondo marino. Fuente: Elaboración propia con datos de la salida del modelo.



Figura 4. Clasificación espacial multivariante no supervisada de unidades en el fondo del arrecife rocoso. Fuente: Elaboración propia con datos de la salida del modelo y post-procesos en el SIG.

sedimento superficial y utilizando un sistema de información geográfica. La clasificación de unidades se determinó agrupando polígonos construidos a partir de los modelos e implementando un análisis de agrupamiento jerárquico. La caracterización se obtuvo con los valores predi- chos en los modelos. Resultados. Los modelos presentaron valores entre 2.7 a 95% de contenido de carbonato de calcio, -0.9 a 7.8 Φ de tamaño medio de grano (donde Φ es una transformación logarítmica del diámetro de sedimento, la cobertura de algas (Tapia-Silva et al. 2015; Valley et al., 2005), hábitat asociados a zonas de corriente (Sheehan y Welsh, 2009) incluso para cobertura de plantas terrestres (Mkrtchyan, 2004). Sin embargo, para el arrecife La Sorpresa el algoritmo de Distancia Inversa Ponderada resultó ser la aproximación más adecuada para representar la variabilidad espacial de los porcentajes de cobertura, por un lado, debido a que presentó el menor error en las métricas y asumiendo que las variables que se representan disminuyen su influencia al aumentar la distancia desde el punto (Rigaux et al. 2001). Este último aspecto lo convierte en el método de interpolación adecuado para esta zona, dado que concede mayor peso a los valores cercanos al punto a estimar y menos peso los puntos lejanos.

De manera general el arrecife rocoso de la Sorpresa está constituido en su basamento por tepetate (sedimentos antiguos consolidados) y rocas que, por un lado, reducen la energía del oleaje para configurar el arrecife elevando la profundidad promedio del fondo y, por otro lado, proporcionan soporte a las coberturas de elementos bióticos como algas coralinas,

Tabla 3. Características de las coberturas por unidad clasificada. Los valores porcentuales representan las estadísticas del conjunto de pixeles obtenidos dentro de cada unidad clasificada. U= unidad clasificada del arrecife (Figura 4); μ = promedio porcentual del conjunto de pixeles agrupados según los límites espaciales de cada unidad, σ = la desviación estándar.

		Rocas		Tepetate		Arena	
U	Área (ha)	μ	σ	μ	σ	μ	σ
1	1.91	8.0	8.0	48	16	23	11
2	1.30	18	15	68	16	21	15
3	1.98	21	17	24	15	52	17
4	0.99	32	20	10	10	17	14
5	0.85	64	15	10	9.0	70	15
		Cobertura Coral		Macroalgas		Alga C	
U	Área (ha)	μ	σ	μ	σ	μ	σ
1	1.91	18	11	30	13	38	11
2	1.30	28	17	61	14	22	15
3	1.98	14	7.0	38	17	20	17
4	0.99	44	16	25	21	14	14
5	0.85	22	9.0	55	27	7.0	15

coral y macroalgas. Estos elementos a su vez constituyen microhábitats para especies de peces e invertebrados marinos que en combinación ofrecen información de su complejidad y heterogeneidad del hábitat (Tizol-Rosado, 2019).

En los claros dentro del arrecife, la arena no consolidada se distribuye a manera de parches y se encuentran delimitados por formaciones rocosas consolidadas elevadas creando barreras que al mismo tiempo permiten el asentamiento de corales. Estas áreas protegidas de la energía del oleaje y de alta heterogeneidad, propician un incremento en la disponibilidad de refugio y permite a los individuos encontrar alimento, ocultarse de su depredador y al mismo tiempo puede proveer de superficie para la reproducción (Meléndez, 2014). Se ha encontrado una correlación positiva entre las características del medio donde se presentan las rocas y corales con la especie Stegas*tes rectifaenum* (Olivier *et al.* 2019), posiblemen-te contrastada con las funciones antes descrita. Las macroalgas son el componente biótico más extendido superficialmente que cubre aproximadamente el 60% del área de estudio y constituyen microhábitats específicos para especies principalmente herbívoras. Las algas coralinas han sido descritas como uno de los elementos estructurales más importantes de los arrecifes por su resistencia al deterioro provocado por el oleaje (Björk et al. 1995), por lo cual planteamos la hipótesis de que estas regiones son zonas de elevado estrés hídrico.

Las estructuras coralinas son la región de cobertura biótica menos extendida, estructuralmente corresponde a unidades marinas con elevados índices de rugosidad (Sánchez-Caballero, 2014). Las especies presentes en estas zonas emplean dichas características para encontrar refugio de los depredadores o para emboscar a sus presas. En estudios en zonas similares se ha demostrado que estas soportan gran parte de la diversidad y abundancia en el arrecife, favorecida por la confluencia de especies residentes, especies de fondos blandos, algunos pelágicos y depredadores superiores que se alimentan de organismos de arrecife, como Carangidos (Alvarez-Filip *et al.*, 2006).

Con la integración de los mapas de cobertura compuesta se logró detectar zonaciones dentro de las mismas variables. Por ejemplo, la zona de coral puede ser subdivida en zonas de coral con macroalgas o algas coralinas. Así mismo, es posible identificar qué zonas de coral se disponen sobre otros tipos de sustrato, por ejemplo, tepetate, arena o rocas y, qué proporción representa cada una de estas zonas sobre la composición de la cobertura total de coral. De esta forma, también es posible identificar una sucesión de hábitats y la heterogeneidad ambiental del fondo marino de La Sorpresa. La metodología propuesta en este estudio permite la caracterización espacial de elementos bióticos y abióticos que sugieren que el fondo marino del arrecife La Sorpresa es más diverso que lo señalado en descripciones puntuales previas (Sánchez-Caballero *et al.* 2019) mostrando además la distribución de microhábitats.

Por otro lado, se han propuesto trabajos de caracterización de hábitat en el fondo marino utilizando análisis multivariante con diferentes enfoques. Por ejemplo, Sheppard *et al.* (1995), clasifican visualmente a partir de imágenes fotográficas aéreas las estructuras de fondo y obtienen datos de campo para su contraste, realizando una clasificación por conglomerado en función de los elementos abióticos y bióticos de un arrecife. También existe una clasificación del fondo marinos (dominado por sedimentos) realizada por Urcádiz-Cázares *et al.* (2017) con técnicas de interpolación y análisis de conglomerados.

En este trabajo, se implementa inéditamente el análisis multivariante de clasificación no supervisada de las ocho coberturas, que sugiere la configuración de cinco unidades espaciales para el arrecife la sorpresa. La interpretación de estas unidades debe entenderse desde el espacio multidimensional y las funciones de los algoritmos del análisis de componentes principales, por conglomerado y máxima verosimilitud (Richards, 2013; Nijhawan et al. 2017). En el primer paso, los ocho valores de cobertura para cada ubicación de pixeles fueron transformados y suprimidos a tres nuevos componentes principales, luego cada píxel transformado se agrupó en cinco clústeres o conglomerados de acuerdo al promedio de los pixeles y finalmente fueron clasificados estimando la probabilidad de que cada pixel pertenezca a cada clase. Las unidades o clases resultantes representan el agrupamiento de los pixeles que se acercan al valor del vector promedio de porcentajes de todas las coberturas.

Ecológicamente, las unidades representan características propias en torno al porcentaje de cobertura de cada elemento estudiado, por ejemplo, los pixeles distribuidos en la unidad uno, deben aproximarse a las características de cobertura de tepetate de un ~48%, algas coralinas en un ~38% y macroalgas en un ~30% representando una combinación de coberturas para un potencial microhábitat diferenciado del espacio. Evidentemente, la interpretación en un aspecto ecológico en los mapas cobertura compuesta que solo representan la presencia (por arriba del nivel intermedio) de un elemento pudiera ser más sencillo que la interpretación de una clasificación no supervisada de esta naturaleza, no obstante, ésta última representa una mayor robustez por la información multivariante y estadística tratada. Si bien estas unidades han sido bien delimitadas y caracterizadas, deben ser probadas en campo, por ejemplo, en relación con la diversidad y dinámica poblacional de especies marinas dentro del arrecife. Un estudio de diseños de experimentos tomando como factores dichas unidades puede ser una directriz que contribuya la interpretación ecológica. Debe entenderse que este análisis es común en el tratamiento de imágenes con diferentes bandas obtenidas de sensores remotos, por lo cual, esta propuesta está explorando por primera vez el uso metodológico de clasificación no supervisada para el medio marino en un arrecife.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que el uso de observaciones puntuales junto con la implementación de métodos de interpolación, resultan una estrategia eficiente, con un desempeño adecuado (valores de media del error y la raíz cuadrada del error cuadrático medio bajos) en las caracterizaciones de hábitats. También son un avance en el uso de datos de cobertura y del análisis para la clasificación de los hábitats bentónicos marino en arrecifes rocosos. Además, tiene la ventaja de que con cantidades pequeñas de datos es posible realizar una descripción adecuada y detallada del hábitat. El empleo de este método pudiera reducir los tiempos y costos en la evaluación costera.

REFERENCIAS

- Alvarez-Filip, L., Reyes-Bonilla, H., y Calderon-Aguilera, L. E. (2006). Community structure of fishes in Cabo Pulmo Reef, Gulf of California. *Marine Ecology*, 27(3), 253–262. https://doi. org/10.1111/j.1439-0485.2006.00108.x
- Björk, M., Mohammed, S., Björklund, M., y Semesi, A. (1995). Coralline Algae, Important Coral-Reef Builders Threatened by Pollution. *AMBIO:* A Journal of the Human Environment, 24(7-8), 502–505.
- Calapiz-Segura, A. (2004). Composición y estructura comunitaria de peces de arrecife rocoso en Punta Perico e Isla Cerralvo, Baja California Sur, México. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. La Paz, Baja California Sur, México. http://repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/14388
- Chust, G., Galparsoro, I., Borja, A., Franco, J., Beltrán, B., y Uriarte, A. (2007). Detección de cambios recientes en la costa vasca mediante ortofotografía. *Lurralde*, 30(59), e72. https://www.ingeba.org/ lurralde/lurranet/lur30/30chust/30chust.htm
- De Smith, M. J., Goodchild, M. F. y Longley, P. (2007) Geospatial Analysis: A Comprehensive Guide to Principles, Techniques and Software Tools. Leicester, UK: Troubador Publishing Ltd.
- Franke, R., y Nielson, G. M. (1991). Scattered Data Interpolation and Applications: A Tutorial and Survey. pp. 131-160. In: Hagen, H., y Roller, D. (Eds.). Geometric Modeling. Computer Graphics — Systems and Applications. Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-76404-2 6
- Isaaks, E. H. y Srivastava, R. M. (1989). An Introduction to Applied Geostatistics. New York: Oxford

University Press. 413 p.

- Krivoruchko, K. (2012). Empirical Bayesian kriging. ArcUser, 6(10), 6-20. https://www.esri.com/ news/arcuser/1012/files/ebk.pdf
- Luo, W., Taylor, M. C., y Parker, S. R. (2008). A comparison of spatial interpolation methods to estimate continuous wind speed surfaces using irregularly distributed data from England and Wales. *International Journal of Climatology*, 28(7), 947-959. https://doi.org/10.1002/joc.1583
- Melendez Cal-Mayor, J. F. (2014). Variabilidad genética y conectividad de la jaqueta de Cortés, Stegastes rectifraenum (Gill, 1862), Perciformes: pomacentridae, en ambas costas de la Península de Baja California. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. La Paz, Baja California Sur, México. http://www.repositoriodigital.ipn. mx/handle/123456789/19679
- Mkrtchyan, A. (2004). Spatial interpolation of field data on plant abundance. pp. 314-321. En: Commarmot, B., y Hamor F. D. (Eds.). Mukachevo, Ukraine Proceedings: Natural Forests in the Temperate Zone of Europe - Values and Utilisation. Birmensdorf, Swiss Federal Research Institute WSL; Rakhiv, Carpathian Biosphere Reserve. https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/publications/mkrtchian 2.pdf
- Nababan, B., Mastu, L. O. K., Idris, N. H., y Panjaitan, J. P. (2021). Shallow-Water Benthic Habitat Mapping Using Drone with Object Based Image Analyses. *Remote Sensing*, 13(21), 4452. https:// doi.org/10.3390/rs13214452
- Nijhawan, R., Srivastava, I., y Shukla, P. (2017). Land cover classification using super-vised and unsupervised learning techniques. Paper 1. En: Department of Computer Science and Engineering SSN College of Engineering (Ed.). 2017 International Conference on Computational Intelligence in Data Science. Short Proceedings. Chennai, India: Department of Computer Science and Engineering, SSN College of Engineering. https://doi. org/10.1109/ICCIDS.2017.8272630
- Olivier, D., Lepoint, G., Aguilar-Medrano, R., Díaz, A. H. R., Sánchez-González, A., y Sturaro, N. (2019). Ecomorphology, trophic niche, and distribution divergences of two common damselfishes in the Gulf of California. *Comptes Rendus Biologies*, 342(9-10), 309-321. https://doi. org/10.1016/j.crvi.2019.11.001
- Richards J. A. (2013). Remote Sensing Digital Image Analysis: An introduction. 5th ed. New York-London-Berlin: Springer Verlag. ISBN-10: 978-3-642-30061-5.

- Rigaux, P., Scholl, M., y Voisard, A. (2001). Spatial databases: with application to GIS. San Francisco, Ca: Morgan Kaufmann.
- Rodríguez-Basalo, A., Ríos, P., Arrese, B., Abad-Uribarren, A., Cristobo, J., Ibarrola, T. P., Gómez-Ballesteros, M., Prado, E., y Sánchez, F. (2022).
 Mapping the habitats of a complex circalittoral rocky shelf in the Cantabrian Sea (south Bay of Biscay). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 273, 107912. https://doi.org/10.1016/j. ecss.2022.107912
- Sánchez-Caballero, C. A. (2014). Variación espacio temporal en la estructura comunitaria de la ictiofauna del arrecife rocoso de Playa La Sorpresa, B.C.S. México. Tesis Maestría. Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. La Paz, Baja California Sur, México. http://repositoriodigital.ipn.mx/ handle/123456789/20181
- Sánchez-Caballero, C. A., Borges-Souza, J. M. y Ferse, S. C. A. (2019). Rocky reef fish community composition remains stable throughout seasons and El Niño/La Niña events in the southern Gulf of California. *Journal of Sea Research*, 146, 55-62. https://doi.org/10.1016/j.seares.2019.01.008
- Sheehan, K. R., y Welsh, S. A. (2009). An Interpolation Method for Stream Habitat Assessments. North American Journal of Fisheries Management, 29(1), 1-9. https://doi.org/10.1577/M07-080.1
- Sheppard, C. R. C., Matheson, K., Bythell, J. C., Murphy, P., Myers, C. B., y Blake, B. (1995). Habitat mapping in the Caribbean for management and conservation: use and assessment of aerial photography. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 5(4), 277-298. https://doi.org/10.1002/aqc.3270050404
- Sibson, R. (1981). A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation. pp. 21-36. En: Barnett, V. (Ed.). Interpreting Multivariate Data. New York: John Wiley & Sons. ISBN-13: 978-0471280392.
- Silvero, N. E. Q., Demattê, J. A. M., Vieira, J. de S., Mello, F. A. de O., Amorim, M. T. A., Poppiel, R. R., Mendes, W. de S., y Bonfatti, B. R. (2021). Soil property maps with satellite images at multiple scales and its impact on management and classification. *Geoderma*, 397, 115089. https:// doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115089
- Tapia-Silva, F. O., O. E. Hernández-Cervantes, M. I. Vilchis-Alfaro, A. Sentíes y K. M. Dreckmann. (2015). *Mapping of algae richness using spatial data interpolation*. pp. 1005–1008. En: Schreier, G., Skrovseth, P. E. y Staudenrausch, H. (Eds.). 36th International Symposium on Remote Sens-

ing of Environment (Volume XL-7/W3). Berlin, Germany: Copernicus Publications. https://doi. org/10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-1005-2015

- Tait, L. W., Orchard, S., y Schiel, D. R. (2021). Missing the Forest and the Trees: Utility, Limits and Caveats for Drone Imaging of Coastal Marine Ecosystems. *Remote Sensing*, 13(16), 3136. https://doi.org/10.3390/rs13163136
- Tizol-Rosado, D. F. (2019). Influencia de la complejidad del hábitat sobre la variación espaciotemporal de la macrofauna en arrecifes rocosos de la Bahía de La Paz. Tesis Maestría. Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas La Paz, Baja California Sur, México. http://repositoriodigital.ipn.mx/ handle/123456789/26291
- Urcádiz-Cázares, F. J., Cruz-Escalona, V. H., Nava-Sánchez, E. H. y Ortega-Rubio, A. (2017). Clasificación de unidades del fondo marino a partir de la distribución espacial de los sedimentos superficiales de la Bahía de La Paz, Golfo de California. *Hidrobiológica*, 27, 399-409. https://doi. org/10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2017v27n3/ Urcadiz
- Valley, R. D., Drake, M. T. y Anderson, C. S. (2005). Evaluation of alternative interpolation techniques for the mapping of remotely-sensed submersed vegetation abundance. *Aquatic Botany*, 81, 13-25. https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2004.09.002
- Villegas-Sánchez, C. A., Abitia-Cárdenas, L. A., Gutiérrez-Sánchez, F. J. y Galván-Magaña, F. (2009). Rocky-reef fish assemblages at San José Island, Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 80, 169-179. http://dx.doi.org/10.22201/ ib.20078706e.2009.001.594
- Wang, K., Wang, T., y Liu, X. (2019). A Review: Individual Tree Species Classification Using Integrated Airborne LiDAR and Optical Imagery with a Focus on the Urban Environment. *Forests*, 10(1), 1. https://doi.org/10.3390/F10010001
- Wu, T. y Li, Y. (2013). Spatial interpolation of temperature in the United States using residual kriging. *Applied Geography*, 44, 112-120. https://doi. org/10.1016/j.apgeog.2013.07.012
- Xiao, Y., Gu, X., Yin, S., Shao, J., Cui, Y., Zhang, Q. y Niu, Y. (2016). Geostatistical interpolation model selection based on ArcGIS and spatio-temporal variability analysis of groundwater level in piedmont plains, northwest China. *SpringerPlus*, 5, 1-15. https://doi.org/10.1186/s40064-016-2073-0

Copyright (c) 2022 Arturo del Pino-Machado, José Manuel Borges-Souza, Francisco Javier Urcádiz-Cázares, Víctor Hugo Cruz-Escalona, Guillermo Martínez-Flores & Arelly Ornelas-Vargas



Este texto está protegido por una licencia CreativeCommons 4.0.

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato- y Adaptar el documento- remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

Resumen de licencia - Texto completo de la licencia