



Reporte del Proyecto

“Caracterización de hábitats submarinos del litoral de Sisal, Yucatán y análisis de la estructura-función de sus comunidades”
clave PAPIIT IN209408

Responsable

Dr. Joaquín Rodrigo Garza Pérez.
Profesor-Investigador Asociado “C” de Tiempo Completo.
Programa de Investigación Espacial en Ambientes Costeros y Marinos
UMDI-Sisal, Facultad de Ciencias
UNAM

Agradecimientos:

1. A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la Universidad Nacional Autónoma de México, por el financiamiento del proyecto IN209408 del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT).
2. A UMDI-Sisal, Facultad de Ciencias por todo el apoyo logístico y administrativo para la ejecución de este proyecto.
3. A los técnicos M.C. Alfredo Gallardo Torres, M.C. Enrique Puerto Novelo y Biol. Javier Eduardo Apodaca Hernández, por su apoyo para actividades de campo, logística y procesamiento de imágenes de satélite.
4. Al Earth Resources Observation Center (EROS) del United States Geological Survey (USGS) por el servicio de acceso a imágenes LANDSAT de archivo.

Resumen

Se caracterizaron y monitorearon a través de tres temporadas climáticas (secas lluvias y nortes), seis paisajes submarinos en el litoral de Sisal Yucatán. Las caracterizaciones se llevaron a cabo siguiendo un diseño muestral generado a partir de una clasificación no supervisada de una imagen de satélite Landsat ETM+ y un modelo batimétrico digital del área de estudio. Las técnicas usadas para la caracterización de las comunidades bentónicas y de peces asociadas a cada paisaje fueron la de videotransectos y la de censos visuales. En general se encontraron diferencias significativas entre las coberturas bentónicas de las temporadas secas y lluvias con la temporada de nortes. Se definió un gradiente temporal de incremento en número de especies de peces y su biomasa asociada desde la temporada de nortes, seguida por la de secas y terminando con el mayor número de especies y biomasa en la temporada de lluvias. Los seis paisajes submarinos definidos en el litoral de Sisal son constantes durante las tres temporadas climáticas y su distribución espacial se plasmó en un mapa temático generado a partir de una clasificación supervisada de una imagen de satélite Landsat ETM+ procesada con corrección atmosférica y remoción del efecto de la columna de agua. Se encontró una alta homogeneidad entre el tipo y la proporción de cobertura de los seis paisajes definidos, representando un gradiente continuo desde los fondos arenosos con escasa cobertura algal hasta los fondos rocosos con coberturas perennes de corales y octocorales. El análisis de asociación de las especies de peces con las coberturas y tipos de sustrato por medio de un Análisis de Correspondencia Canónica, reveló una baja selectividad de las especies a los tipos de cobertura y de sustrato, siendo más importante la complejidad de hábitat. En este caso, en la zona litoral de Sisal, las macroalgas juegan el papel más importante para el incremento en la complejidad del hábitat, y estas macroalgas tienen una dinámica fluctuante definida por las condiciones ambientales asociadas a cada temporada climática.

1. Introducción

El manejo de los ecosistemas costeros constituye una de las grandes preocupaciones internacionales. Las zonas litorales son particularmente frágiles ya que son explotadas sin contar con el conocimiento de los factores biológicos y ambientales que determinan la función del ecosistema y el estado de sus recursos. La conservación y el manejo coherente de un ecosistema deben estar basados en el conocimiento de sus recursos y de su funcionamiento. Esto permite, por una parte, evaluar las potencialidades económicas reales ofrecidas por el medio natural y, por otra parte, establecer las bases para planificar un desarrollo controlado en áreas adyacentes a los ecosistemas.

La ecología del paisaje, a diferencia de la ecología tradicional, reconoce la heterogeneidad espacial de los ecosistemas, considerando en su análisis tres aspectos: la estructura, la función y el cambio de los dos anteriores a través del tiempo (Urban et al 1987, Turner y Gadner 1991). En base a esta perspectiva jerárquica, se han realizado estudios acerca de la relación entre los patrones espaciales y los procesos ecológicos a lo ancho de la escala espacial y temporal. La gran mayoría se han hecho en ambientes terrestres, pero recientemente se han incorporado estos conceptos en algunos estudios de zonas costeras, debido principalmente a su enfoque integral (Costanza et al. 1990).

El concepto de analizar la estructura-función de las comunidades de peces y sus asociaciones al hábitat proporciona información valiosa para entender la dinámica de los ecosistemas marinos. Esta pregunta ha sido abordada desde varios enfoques, como la aproximación de "Fourth Corner" de Legandre et al. (1997), la cual parametriza el comportamiento de la asociación de ensamblajes de peces y las características del hábitat. Otra aproximación por Arias-González et al. (2006), relaciona la biomasa y la

estructura trófica de los ensamblajes de peces al hábitat y define los principales indicadores que regulan la distribución de los gremios de peces en un sistema arrecifal.

La información científicamente validada de la zona costera y litoral de Yucatán tiene las características de ser escasa, de distribución focalizada en algunas zonas y generalmente asociada a recursos económicamente importantes, estos estudios han sido generados en su mayoría por CONAPESCA. El ejemplo mas reciente del tipo de información con la que se cuenta en la zona es el sistema de ordenamiento costero POETCY. Este programa de ordenamiento ecológico fue instaurado precisamente para tratar de resarcir la deficiencia en la información ambiental del estado, tratando de incorporar toda la información disponible de diversas fuentes como institutos de investigación, universidades y secretarías estatales. Toda esta información recopilada es valiosa, pero al carecer de un objetivo común, es inconexa y de utilidad limitada para objetivos de manejo.

Al respecto, los componentes esenciales para el entendimiento y adecuada gestión de los recursos naturales se obtienen respondiendo a las preguntas ¿Qué hay? ¿En dónde hay? ¿Cuanto hay? Y ¿Por qué esta ahí? Una herramienta de fácil uso y comprensión por parte de científicos, administradores, tomadores de decisiones y el público en general son los mapas, ya que se basan en el lenguaje universal de las imágenes y pueden ser producidos de acuerdo a las necesidades específicas de cada usuario.

En este proyecto se retoma la pregunta de las asociaciones de comunidades de peces a su hábitat pero se incorporan nuevos componentes a la respuesta, que son la definición espacial de los habitats y sus características a través de mapas en un Sistema de Información Geográfica (SIG) y la predicción espacial de la biomasa y diversidad de especies de peces, a la misma resolución y abarcando toda el área de estudio.

2. Objetivo General

Definir la estructura-función de las comunidades de peces asociadas a paisajes marinos del litoral de Sisal y caracterizarla de una manera espacialmente explícita a través de las temporadas climáticas del año.

2.1 Objetivos Particulares

1. Definir los diferentes paisajes marinos detectables a través de imágenes de satélite de resolución media-alta (píxeles de 28x28m o 30mx30m).
2. Caracterizar la composición temporal de las comunidades bentónicas asociadas a cada paisaje marino definido.
3. Caracterizar la composición temporal de las comunidades de peces asociadas a cada paisaje marino definido.
4. Analizar las asociaciones de la comunidad de especies a nivel de gremios tróficos y especies con los componentes bentónicos de cada paisaje marino y su cambio a través de las diferentes temporadas climáticas del año.
5. Generar mapas predictivos de biodiversidad, cobertura, biomasa y densidad de los componentes bióticos y abióticos de los paisajes marinos.
6. Incorporar la información obtenida en un Sistema de Información Geográfica, con fines de apoyo a la investigación científica y al manejo de la zona costera

3. Area de Estudio:

El area de interés en litoral de Sisal, se extiende 46 km a lo largo de en la costa norte del estado de Yucatán y abarca un área aproximada de 1,240 km² (Figura A). Forma parte de

la unidad sedimentaria conocida como tapete Progreso, definido por Logan (1969) como una capa de sedimentos marinos (arena de tamaño medio a fino) que va desde algunos centímetros hasta algunos metros de ancho (en la parte somera de la plataforma), compuesta principalmente por fragmentos angulares y subangulares de pelecípodos, gasterópodos, foraminíferos (principalmente *Peneroplie* y *Miliolidae*), placas de *Halimeda*, y fragmentos de algas coralinas. Con un contenido de limo y arcilla menor al 5%.

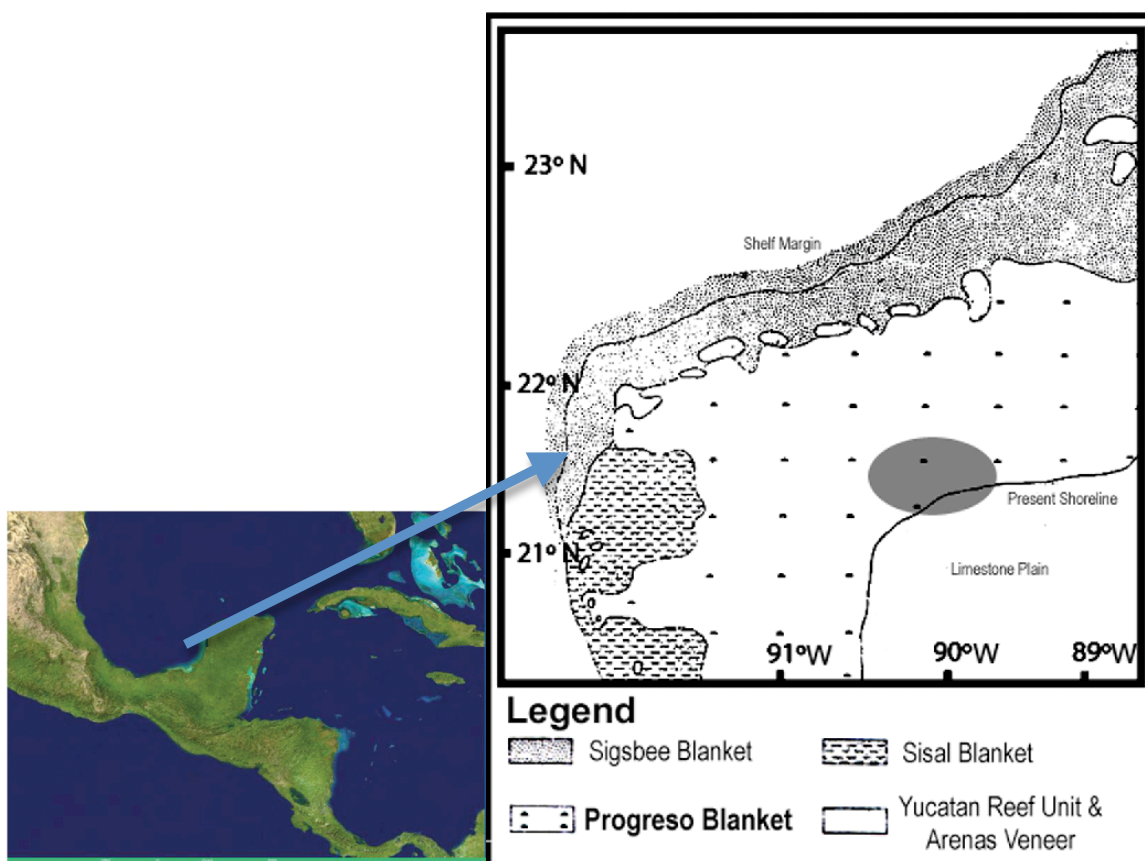


Figura A. Área de estudio, representada sobre el mapa de ambientes sedimentarios de la Península de Yucatán, modificado de Logan (1969).

Las condiciones climáticas predominantes en el sureste del Golfo de México se han definido en tres temporadas climáticas: la temporada seca (Marzo a Mayo) con temperaturas en el rango de de 36 a 38°C (y con registros en los últimos años de hasta 45°C) con una levada tasa de evaporación y precipitaciones mínimas (0 a 30mm),

referida en los subsiguiente como “secas”. La temporada lluviosa de Junio a Octubre con precipitaciones de hasta 125mm en promedio para el mes de septiembre (lluvias) y una temporada caracterizada por fuertes vientos provenientes del norte con el consiguiente aumento en el oleaje y turbidez del agua, bajas temperaturas y escasa precipitación (Noviembre a Febrero), nortes (Fuentes-Yaco et al. 2001, Tunnell, 1988).

4. Métodos

4.1 Diseño Muestral

Se realizó un procedimiento de clasificación no supervisada (9 clases) a una imagen multiespectral Landsat 7 ETM+ del año 2000 del área de estudio (row 21/path45), utilizando el software ENVI v.4.2 (ITT). La imagen clasificada resultante se utilizó como base para un diseño muestral estratificado al azar. Las estaciones seleccionadas en cada estrato se incorporaron en una capa vectorial de información geográfica y por requerimientos logísticos de trabajo en campo y tiempo de transporte se eliminaron las estaciones fuera de un radio de 40 km del Puerto de Sisal. A continuación se establecieron rutas de navegación con las 90 estaciones finales, cubriendo un patrón radial, que permitió la optimización de tiempo de lancha y combustible. Estas rutas de navegación se siguieron durante las tres temporadas climáticas del año para cumplir con la evaluación temporal de los paisajes.

4.2 Definición de Paisajes Bentónicos y caracterización de comunidades bentónicas asociadas.

4.2.1 Método de Video-Transectos para caracterización de comunidades bentónicas sésiles.

Por medio de un GPS se navegó hacia cada estación seleccionada en el diseño muestral y al llegar a las coordenadas se marcó el punto con una boya. Posteriormente se anclaba la embarcación en contra de la corriente para que al detenerse la lancha se quedara en el punto marcado por la boya o en la cercanía inmediata. Con ayuda de equipo SCUBA se realizaron inmersiones y el anclaje de la boya servía como soporte para desplegar un transecto de 50 m (cinta métrica de PVC) a contracorriente. A lo largo del transecto, con una cámara submarina (Sony HDR-HC9 de alta definición en un housing o estuche estanco submarino Light & Motion Stingray HD) se filmaba una toma perpendicular al substrato, a 40 cm de distancia, para mantener un área constante de filmación (de un ancho de 60 cm). En el comienzo y en el final de cada transecto se realizaron también tomas panorámicas de 360° con la cámara de video para ayudar en la interpretación visual de los videos en laboratorio. El área filmada sobre el transecto abarca un mínimo de 30 m² (50m x 0.6m).

Las grabaciones de los videotransectos se archivan principalmente en el medio original: cassettes mini-DV y se etiquetan con las fechas de grabación para fácil identificación. Para el análisis de los videos, se importó cada uno de los transectos en formato de video digital (archivos .mov) a una resolución de 960x540, utilizando el software iMovie '08 en una computadora Apple iMac con sistema operativo MacOS X 10.5. Este formato permite un acceso inmediato y eficiente por medio de la utilidad de previsualización del sistema

operativo o a través de la lectura del archivo usando el software Quicktime v.7.6. Cada videotransecto se analizó siguiendo la propuesta de Garza Pérez et al. (2004) que consiste en efectuar 40 pausas espaciadas regularmente a lo largo de la filmación de cada transecto, identificando el substrato o tipo de cobertura bajo 13 puntos repartidos sistemáticamente sobre cada toma. La identificación del substrato y de su cobertura se basó en las categorías de grupos taxonómicos y morfológicos (tabla A), modificados a partir de Garza-Pérez y Arias González (1999). El área muestreada sobre cada videotransecto es de aproximadamente de 10 m² (40 pausas o cuadros de 0.25 m²).

Tabla A. Correspondencia de Grandes Grupos taxonómicos y géneros o especies. * Arena representa la parte gruesa de los sedimentos y la categoría sedimento se refiere a la porción fina o de lodo del sedimento.

Grupo principal	Grupo taxonómico	Género o especie
Coral Pétreo	coral incrustante	<i>Siderea siderea</i> , <i>Siderastrea radians</i> , <i>Solenastrea hyades</i> , <i>Stephanocoenia mechelinni</i> , <i>Solenastrea bournoni</i>
Octocoral	Octocoral Ramoso	Genero <i>Pseudoplexaura</i> , <i>Plexaurella nutans</i> , <i>Pterogorgia citrina</i>
Esponjas	Esponja incrustante	<i>Calyx podatypa</i> , <i>Anthosigmella varians</i>
	Esponja semiesférica	<i>Cinachyra sp.</i>
Algas	Algas de forma filamentosa	<i>algas verde-azules</i>
	Algas pardas	<i>Padina jamaicensis</i> , <i>Lobophora variegata</i> <i>Dictyota ciliolata</i> , <i>Dictyota Sargassum fluitans</i> , <i>Sargassum platycarpum cervicornis</i> , <i>Dictyoperis</i> <i>jamaicensis</i>
	Algas Verdes	<i>Penicillus pyriformis</i> <i>Caulerpa sertularioides</i> <i>Caulerpa serrulata</i> , <i>Neomeris annulata</i> , <i>Avrainvillea asarifolia</i> , <i>Udotea cyathiformi</i> <i>Rhipocephalus phoenix</i> , <i>Acetabularia calyculus</i> , <i>Bryopsis plumosa</i> , <i>Caulerpa mexicana</i> , <i>Caulerpa prolifera</i> , <i>Avrainvillea longicaulis</i>
	Algas Calcáreas/Articuladas verdes	<i>Halimeda monile</i> , <i>Halimeda incrassata</i> , <i>Halimeda tuna</i> , <i>Halimeda discoidea</i>
	Algas Rojas	<i>Halymenia duchassaingii</i> , <i>Bostrychia tenella</i> , <i>Wrightiella blodgettii</i> , <i>Digenia simplex</i> <i>Laurencia papillosa</i> , <i>Acanthophora spicifera</i> , <i>Bryothamnion triquetrum</i> , <i>Gracilaria curtissiae</i> , <i>Euclima isiforme</i>
Pastos marinos	Pastos	<i>Syringodium filiforme</i> , <i>Halodule beaudettei</i> , <i>Thalassia testudinum</i>
Zoantídeos/Tunicados	Zoantídeos/Tunicados	<i>Palythoa caribaeorum</i>
Tipos de fondo	Arena*	substrato 100% de arena suelta
	Sedimento	Sedimento suave de carbonatos
	Pavimento calcáreo	Fondo duro

4.2.2 Análisis Estadístico para definición de paisajes.

Las tendencias de las coberturas por estaciones a través de las temporadas se exploraron por medio de un análisis de escalamiento multidimensional (MDS, Clarke y Warwick 2001, PRIMER 6, Primer LTD.), utilizando las bases de datos de porcentaje de cobertura. Por medio de un análisis de similitud (ANOSIM; Clarke y Green, 1988) se definió la diferencia en coberturas entre temporadas. Este análisis utiliza una matriz de similitud (Bray-Curtis), y es un análogo del análisis de varianza (ANOVA), dado que ambas pruebas parten de la hipótesis nula que no hay diferencias entre los grupos o muestras especificados. Posteriormente se aplicó un análisis SIMPER (Clarke y Warwick, 2001), que definió los tipos de cobertura que representan la mayor variabilidad y similaridad entre temporadas y determinó la contribución de las coberturas a la similaridad de los paisajes en cada temporada climática.

Estos análisis fueron seguidos por un análisis aglomerativo jerárquico por temporada por medio del cual se definieron los paisajes constantes en las tres temporadas. Finalmente se realizó un análisis MDS para representar la fluctuación de las coberturas de cada paisaje a través de las temporadas.

4.3 Caracterización de comunidades de peces.

4.3.1 Método censos visuales para caracterización de comunidades de peces.

La caracterización de las comunidades de peces se llevó a cabo a través de censos visuales de peces, siguiendo una modificación al método propuesto por Nuñez-Lara et al. (2005), en este caso se hizo un transecto de 50 x 2 m (100m²) sobre el mismo transecto en donde se filmó el video. Esto, con la finalidad de poder establecer las relaciones de los

peces con el tipo de fondo y cobertura. Con los censos se registraron las observaciones del numero de individuos por especie y sus tallas respectivas.

4.3.2 Análisis de la comunidad de peces.

A partir de los datos de campo se generaron bases de datos con especies de peces, numero de individuos por especie y sus tallas siguiendo la siguiente escala:

Talla I	0 – 10 cm	Talla VII	61 – 70 cm
Talla II	11 – 20 cm	Talla VIII	71 – 80 cm
Talla III	21 – 30 cm	Talla IX	81 – 90 cm
Talla IV	31 – 40 cm	Talla X	90 – 100 cm
Talla V	41 – 50 cm	Talla XI	> 101 cm
Talla VI	51 – 60 cm		

Estas bases de datos fueron utilizadas posteriormente para calcular la biomasa por especie por transecto, expresada en gramos por metro cuadrado utilizando las siguiente fórmula:

Biomasa por individuo

$$W = aL^b,$$

En donde W es el peso (gramos),

L is the longitud (cm),

a y b son parámetros estimados regresiones lineales de datos de peso-longitud transformados logarítmicamente.

Las constantes a y b se obtuvieron de los registros de FishBase (www.fishbase.org), y en algunos casos en los que no existían registros para la especie, se tomaron constantes de especies similares, del mismo género y de la misma área geográfica.

Se sumaron los cálculos de cada clase de talla por especie para obtener la biomasa por especie por transecto y se dividió entre 100 para obtener la biomasa por especie por metro cuadrado.

Las bases de datos originales también se utilizaron para calcular los valores del índice de diversidad de Shannon y de Equidad de Pielou, para cada transecto, con las siguientes fórmulas:

Shannon:

$$H = - \sum_{i=1}^S (P_i)(\log^2 P_i)$$

En donde,

H= índice de diversidad por especie

S= Número de especies

p_i = proporción del total de la muestra que corresponde a la especie i

Equidad o Igualdad:

$$J = H / H_{max}.$$

En donde,

J= Equidad o Igualdad (gama de 0 a 1).

H= Diversidad de especies observada.

H_{max} = diversidad de especies máxima = $\log_2 S$.

4.4 Análisis de relación de las comunidades de peces con los paisajes submarinos.

Para explorar la relación de las comunidades de peces con los paisajes submarinos se realizaron dos tipos de análisis con las bases de datos de peces por paisajes por temporada. Un análisis MDS se utilizó para asociar las biomásas totales y riqueza de especies por paisajes por temporadas y un análisis de correspondencia canónica –CCA– (terBraak 1994, CANOCO v.4.0, Biometris) para explorar las asociaciones de especies a los tipos de sustrato, también por temporadas.

4.5 Generación de modelos batimétricos digitales.

Se realizaron barridos con una ecosonda (Garmin GPSMAP 76) siguiendo las rutas de navegación establecidas en el diseño muestral e incorporando nuevas rutas. A partir de estos barridos se obtuvieron bases de datos georreferidas de profundidad. Las bases de datos de profundidad se utilizaron para generar modelos batimétricos a través de técnicas de geoestadística (kriging) y para derivar la profundidad a través de un modelo predictivo sobre una imagen de satélite, utilizando la técnica de GRASP (Análisis de Regresión Generalizada y Predicción Espacial, Lehmann et al. 2002).

4.6 Mapeo de Paisajes por medio de clasificación supervisada.

Utilizando el esquema de clasificación de los paisajes submarinos definidos por el análisis jerárquico aglomerativo, se crearon semillas para definir las firmas espectrales de cada paisaje, utilizando las estaciones asociadas a cada paisaje. Posteriormente se aplicó una clasificación supervisada (ENVI v.4.7, ITT) por la regla de decisión de máxima verosimilitud.

4.7 Predicción Espacial.

Se utilizó la técnica de GRASP (Lehmann 2002, Garza et al. 2003) para la generación de mapas predictivos de componentes bióticos. Esta técnica se basa en la utilización de modelos aditivos generalizados (GAMs, Hastie & Tibshirani 1990, Yee & Mitchell 1991) para modelar la relación entre variables predictivas en forma de superficies continuas (bandas de imágenes de satélite y mapas batimétricos) y variables de respuesta en forma de puntos discretos. Los modelos se generan utilizando el script GRASP para S-Plus (v.6.0 y 2000) el cual provee con una interfase gráfica para seleccionar las opciones de modelación. El resultado de la modelación son las gráficas de validación y validación cruzada, de aporte de variables, del modelo predictivo y de la respuesta de las variables. Además se obtiene una tabla de asignación (Look-up table) que se importa al software ArcView v.3.x (ESRI Inc.) por medio de otro script (grasplut.ave) y con esto se generan las predicciones espaciales, en forma de mapas predictivos, utilizando las superficies de las variables predictivas (en forma de GRIDS). Cada píxel de los mapas predictivos posee un dato de valor de la variable de respuesta (en la unidad asociada a esa variable, tal como, metros de profundidad, porcentaje de cobertura, biomasa por metro cuadrado, riqueza específica, diversidad de Shannon, etc.)

5. Resultados

Se obtuvo un diseño muestral de 90 estaciones en un área de 1,240 km², que fueron asignadas a 9 rutas de navegación. Las estaciones fueron monitoreadas con videotransectos y censos de peces a través de las temporadas climáticas del año de secas, lluvias y nortes (figura 1).

A partir de los videotransectos obtenidos en cada estación, se obtuvieron tanto el tipo de sustrato predominante, como los porcentajes de coberturas de organismos sésiles bentónicos, por temporada. Esta base de datos se analizó mediante un escalamiento multi-dimensional no paramétrico (MDS) para establecer los patrones temporales de coberturas bentónicas entre las temporadas (figura 2).

Posteriormente esta misma base de datos se analizó por medio de las pruebas de ANOSIM y SIMPER. La prueba de ANOSIM encontró diferencias significativas entre las coberturas de la temporada de nortes con las coberturas de las temporadas de secas y lluvias, sin diferencias significativas entre estas últimas (tabla 2).

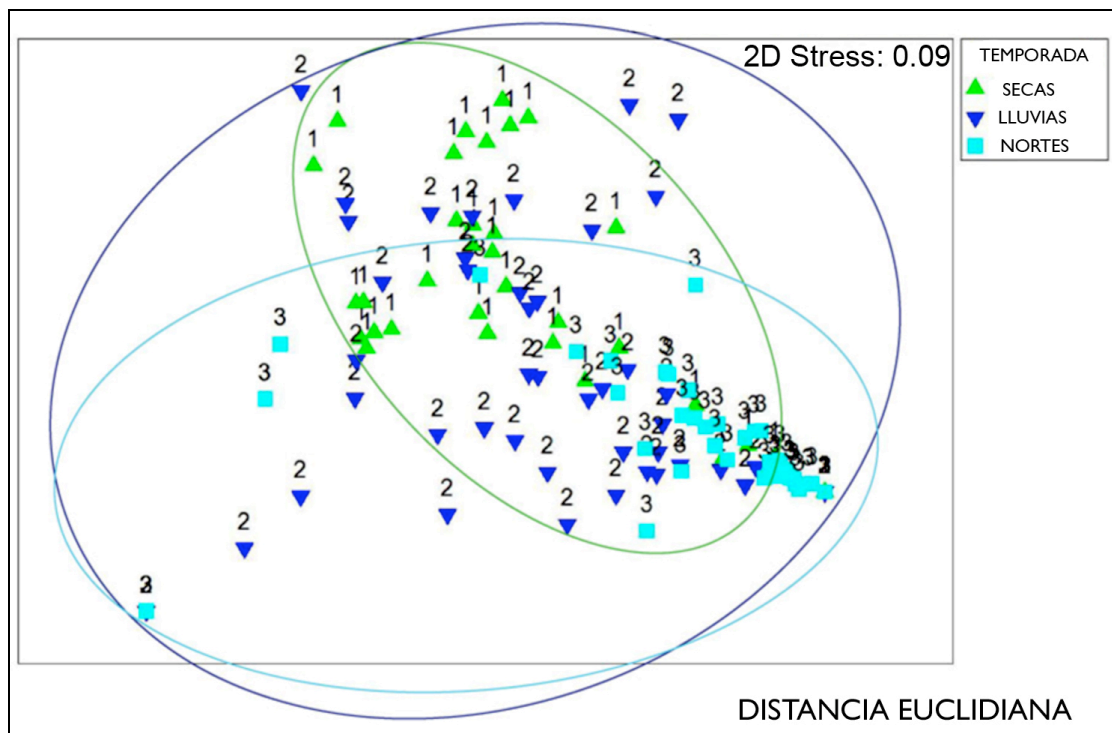
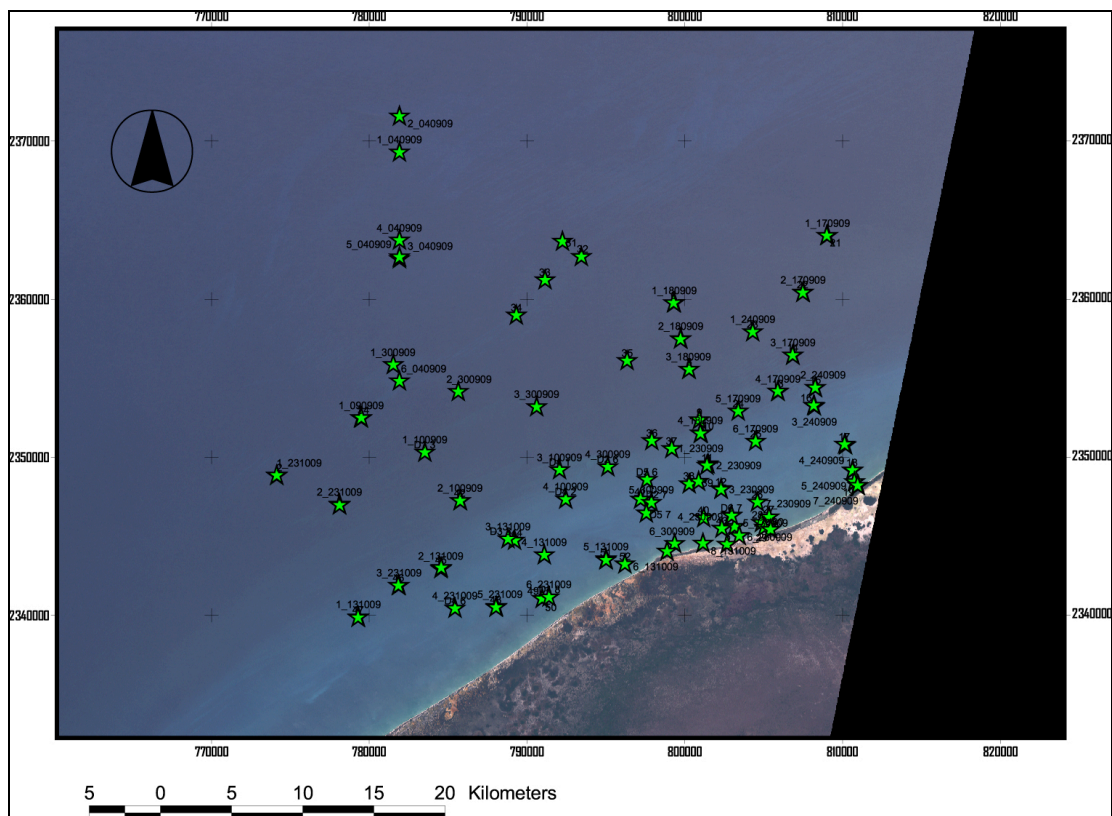


Tabla 1. Análisis de similaridad de una vía (ANOSIM) para las coberturas bentónicas entre temporadas climáticas.

Grupos	R estadístico	Nivel de significancia %	Diferencia significativa	Permutaciones posible	Permutaciones en este análisis	Número $\geq$ observado
secas, lluvias	0.068	1	No	Muy grande	999	9
secas, nortes	0.423	0.1	Si	Muy grande	999	0
lluvias, nortes	0.152	0.1	Si	Muy grande	999	0

La prueba de SIMPER por una parte definió las variables (tipos de cobertura bentónica en porcentaje) que otorgan la similaridad (por la métrica del índice de similaridad de Bray-Curtis) entre estaciones de cada temporada (tabla 3). Para la temporada de secas la variable de cobertura bentónica que otorgó mas similaridad fue la de Algas Rojas con un 48%, para la temporada de lluvias y de nortes la cobertura que otorgó la similaridad fue la de Arena con un 62% y un 92% respectivamente.

Por otra parte la prueba de SIMPER definió las variables que causan diferencias entre las tres temporadas (tabla 4). La variable mas importante fue Arena con porcentajes de contribución a la diferencia entre estaciones de 33.20% a 42.28%. Entre la temporada de secas y lluvias el porcentaje de disimilaridad fue de 61.31%, entre secas y nortes de 67.13% y entre lluvias y nortes de 55.69%.

Tabla 3. El análisis SIMPER utilizando una matriz de similitud de Bray-Curtis, definió las variables que contribuyen a la similitud en cada temporada.

Secas		
Porcentaje de similitud=47.64		
cobertura bentónica	Contribución%	%Ac
Algas Rojas	48.41	48.41
Arena	20.89	69.3
Algas Fil/Par	13.71	83.01
Lluvias		
Porcentaje de similitud=41.11		
cobertura bentónica	Contribución%	%Ac
Arena	62.36	62.36
Algas Verdes	16.14	78.5
Algas Rojas	14.31	92.81
Nortes		
Porcentaje de similitud:=61.60		
cobertura bentónica	Contribución%	%Ac
Arena	92.76	92.76

Tabla 4. El análisis SIMPER utilizando una matriz de similitud de Bray-Curtis, definió las variables que contribuyen a la disimilaridad entre temporadas.

secas y lluvias		
porcentaje de disimilaridad=61:31		
cobertura bentónica	Contribución%	%Ac
Arena	33.2	33.2
Algas Rojas	24.66	57.86
Algas Fil/Par	14.7	72.56
Algas Verdes	12.2	84.76
Sedimento	8.73	93.49
secas y nortes		
porcentaje de disimilaridad=67.13		
cobertura bentónica	Contribución%	%Ac
Arena	42.28	42.28
Algas Rojas	22.59	64.86
Algas Fil/Par	12.5	77.36
Sedimento	10.12	87.48
Algas Verdes	8.55	96.03
lluvias y nortes		
porcentaje de disimilaridad=55.69		
cobertura bentónica	Contribución%	%Ac
Arena	42.06	42.06
Algas Rojas	17.91	59.96
Algas Verdes	12.91	72.88
Sedimento	12.79	85.67
Algas Fil/Par	6.78	92.45

Utilizando los valores de porcentaje de coberturas bentónicas y de tipo de sustrato de cada estación por temporada, se hicieron tres análisis aglomerativos jerárquicos (figura 3), uno para cada temporada climática, y se obtuvo un esquema de clasificación de 6 clases constantes a través de las tres temporadas climáticas.

- Paisaje 1. Algas rojas con parches de algas verdes sobre arena
- Paisaje 2. Praderas de algas mixtas dominada por algas filamentosas/pardas sobre arena
- Paisaje 3. Arenal
- Paisaje 4. Algas verdes sobre arena
- Paisaje 5. Algas rojas con parches de algas verdes sobre sedimento blando
- Paisaje 6. Algas filamentosas/pardas con parches de algas verdes sobre arena.

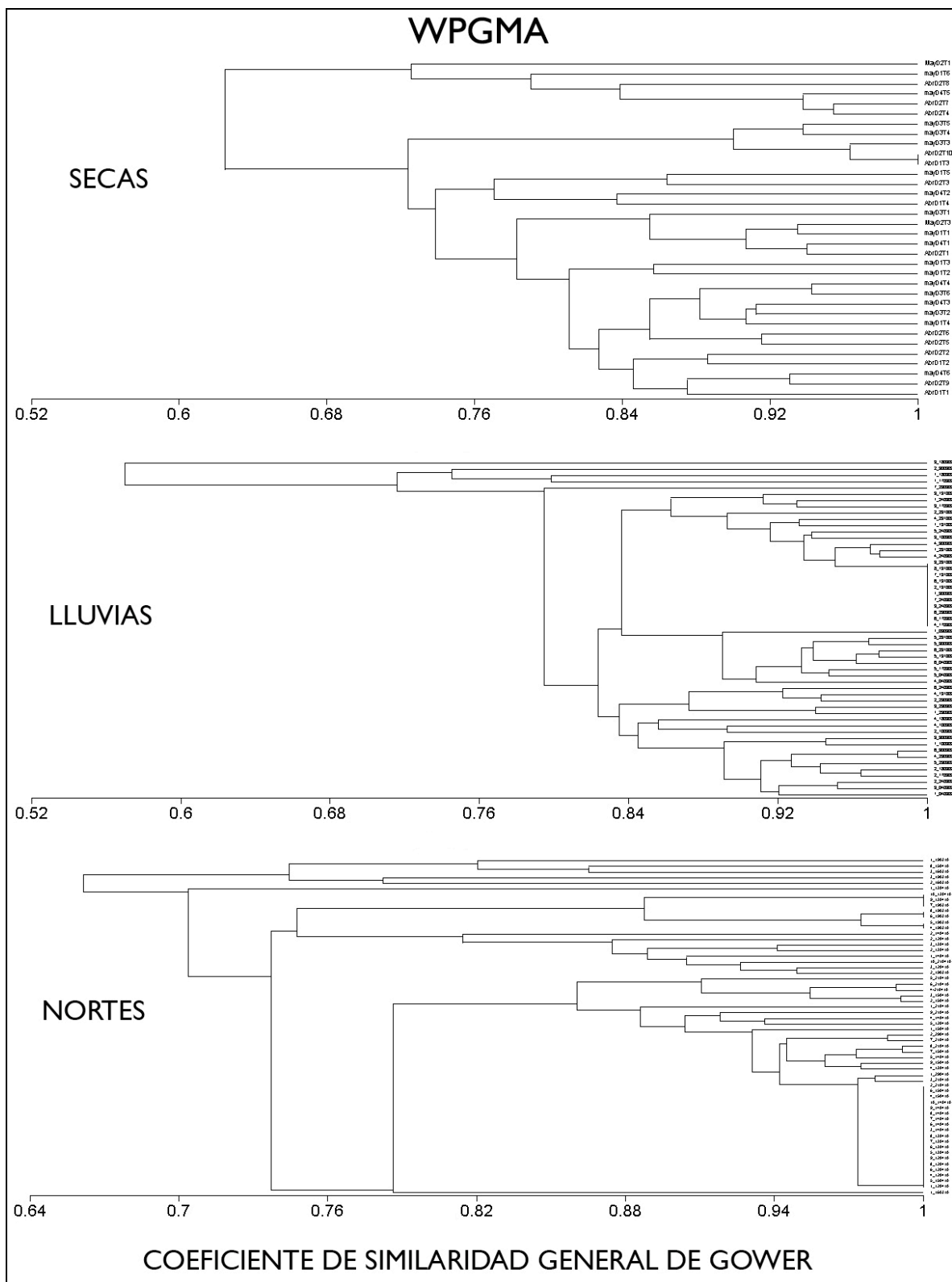


Figura 3. Análisis aglomerativos jerárquicos de las estaciones por temporadas de secas, lluvias y nortes.

Paisaje 1.

La cobertura dominante en las tres temporadas es la de algas rojas con un promedio de 42.93% (secas), 10.07% (lluvias) y 4.52% (nortes), con una proporción menor de cobertura promedio de algas verdes con 10.58% (secas), 12.9% (lluvias) y 3.26% (nortes). Estas coberturas están asociadas al substrato arena, que fluctúa de 5.45% en secas, a 63.72% en lluvias y a 85.97% en nortes (tabla 5, figura 4).

Tabla 5. Coberturas promedio del paisaje 1 para las tres temporadas, la cobertura predominante se resalta en negritas y en cursivas la cobertura con mayor variación.

Paisaje 1. Algas rojas con parches de algas verdes sobre arena				
COBERTURA/SUBSTRATO		SECAS	LLUVIAS	NORTES
Cobertura biótica	Coral Pétreo	0.52%± 0.62 D.E	0.26%± 0.51 D.E	0.21%± 0.33 D.E
	Octocoral	0%± 0 D.E	0.03%± 0.12 D.E	0%± 0 D.E
	Algas Filamentosas/Pardas	<i>23.21%± 20.44 D.E</i>	<i>1.92%± 3.8 D.E</i>	<i>0.27%± 0.51 D.E</i>
	Algas Verdes	10.58%± 9.09 D.E	12.9%± 6.95 D.E	3.26%± 3.83 D.E
	Algas Calcáreas/Articuladas	1.71%± 1.99 D.E	4.65	0.13%± 0.4 D.E
	Algas Rojas	42.93%± 20.74 D.E	10.07%± 14.71 D.E	4.52%± 5.46 D.E
	Esponjas	0.01%± 0.04 D.E	0.17%± 0.4 D.E	2.67%± 2.07 D.E
	Pastos	0.27%± 0.65 D.E	6.12%± 7.19 D.E	1.4%± 2.34 D.E
	Zoantídeos/Tunicados	0%± 0 D.E	0%± 0 D.E	0%± 0 D.E
Substrato inerte	Arena	15.45%± 15.68 D.E	63.72%± 15.19 D.E	85.97%± 9.05 D.E
	Sedimento	5.03%± 7.67 D.E	0.14%± 0.46 D.E	1.56%± 6.79 D.E
	Pedacería	0.01%± 0.04 D.E	0%± 0 D.E	0%± 0 D.E
	Roca/Pavimento	0.28%± 0.52 D.E	0%± 0 D.E	0%± 0 D.E

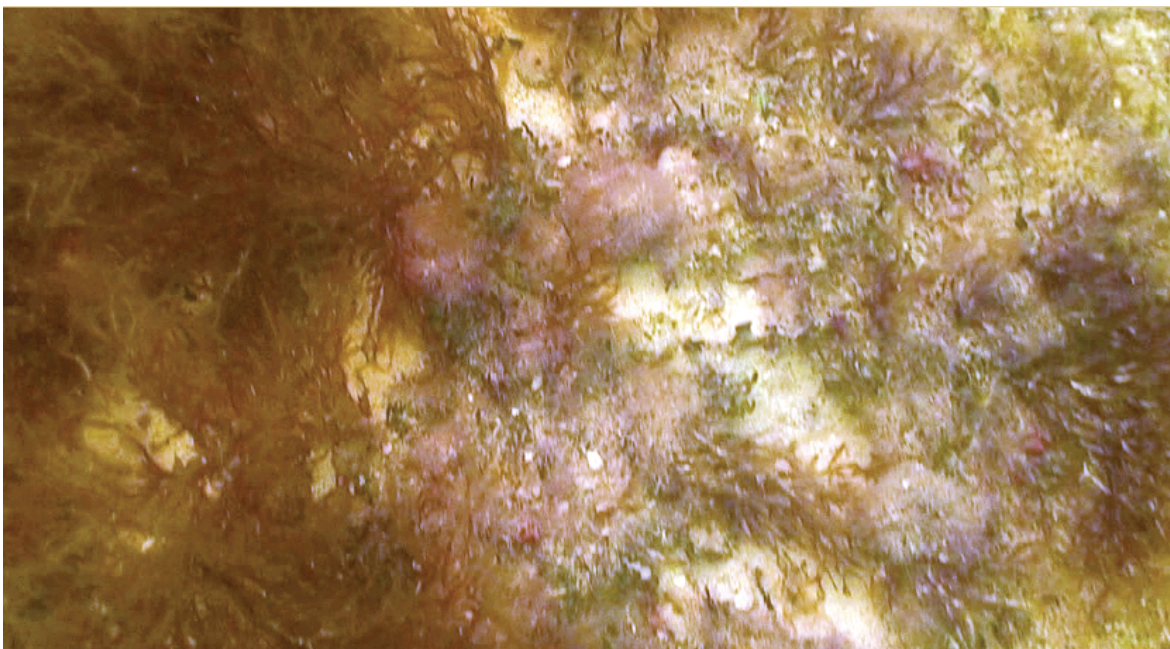


Figura 4. Vista representativa del paisaje 1, para la temporada de lluvias (detalle del fondo, mostrando tipos de cobertura y sustrato).

Paisaje 2.

La cobertura dominante en las tres temporadas es la de la asociación de algas pardas y filamentosas con un promedio de 23.22% (secas), 22.12% (lluvias) y 11.92% (nortes), con una proporción menor de cobertura de algas verdes con 6.01% (secas), 1.73% (lluvias) y 2.12% (nortes). Estas coberturas se encuentran asociadas al sustrato arena, que fluctúa de 31.68% en secas, a 24.33% en lluvias y 81.73% en nortes (tabla 6, figura 5).

Tabla 6. Coberturas promedio del paisaje 2 para las tres temporadas, la cobertura predominante se resalta en negritas y en cursivas la cobertura con mayor variación.

Paisaje 2. Praderas de algas mixtas dominada por algas filamentosas/pardas sobre arena				
COBERTURA/SUBSTRATO		SECAS	LLUVIAS	NORTES
Cobertura Biótica	Coral Pétreo	0.29%±0.19 D.E	0%	0%
	Octocoral	0%±0 D.E	3.85%	0.58%
	Algas Filamentosas/Pardas	23.22% ±24.23 D.E	22.12%	11.92%
	Algas Verdes	6.01%±3.35 D.E	1.73%	2.12%
	Algas Calcáreas/Articuladas	0.87%±0.73 D.E	37.88%	0%
	Algas Rojas	<i>35.34%±16.58</i>	<i>0%</i>	<i>3.65%</i>
	Esponjas	0.63%±0.18D.E	10.19%	0%
	Pastos	0.63%±1.25 D.E	0%	0%
	Zoantídeos/Tunicados	0%±0 D.E	0%	0%
Substrato Inerte	Arena	31.68%±27.48 D.E	24.23%	81.73%
	Sedimento	0.05%±0.10 D.E	0%	0%
	Pedacería	0.10%±0.19 D.E	0%	0%
	Roca/Pavimento	1.20%±1.39 D.E	0%	0%

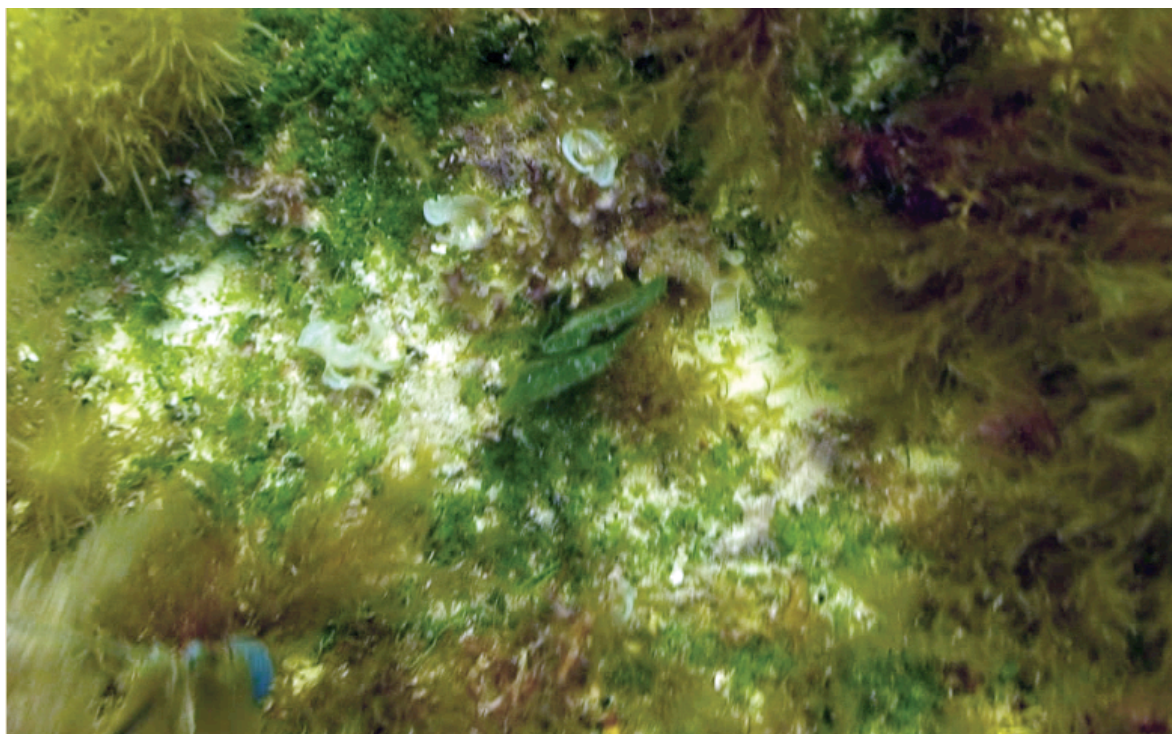


Figura 5. Vista representativa del paisaje 2, durante la temporada de secas (detalle del fondo, mostrando tipos de cobertura y sustrato).

Paisaje 3.

El paisaje 3 está comprendido por extensos arenales sin cobertura algal (tabla 7, figura 6).

Tabla 7. Coberturas promedio del paisaje 3 para las tres temporadas.

Paisaje 3. Arena				
COBERTURA/SUBSTRATO		SECAS	LLUVIAS	NORTES
Cobertura Biótica	Coral Pétreo	0%	0%	0%
	Octocoral	0%	0%	0%
	Algas Filamentosas/Pardas	0%	0%	0%
	Algas Verdes	0%	0%	0%
	Algas Calcáreas/Articuladas	0%	0%	0%
	Algas Rojas	0%	0%	0%
	Esponjas	0%	0%	0%
	Pastos	0%	0%	0%
	Zoantídeos/Tunicados	0%	0%	0%
Substrato Inerte	Arena	100%	100%	100%
	Sedimento	0%	0%	0%
	Pedacería	0%	0%	0%
	Roca/Pavimento	0%	0%	0%



Figura 6. Vista representativa del paisaje 3 (detalle del fondo, mostrando el tipo de sustrato).

Paisaje 4.

La cobertura dominante en las tres temporadas es la algas verdes con un promedio de 4.81% (secas), 40.98% (lluvias) y 12.65% (nortes), estas algas se encuentran asociadas al substrato arena, que fluctúa de 31.68% en secas, a 24.33% en lluvias y 81.73% en nortes (tabla 8, figura 7).

Tabla 8. Coberturas promedio del paisaje 4 para las tres temporadas, la cobertura predominante se resalta en negritas y en cursivas la cobertura con mayor variación.

Paisaje 4. Algas verdes sobre arena				
COBERTURA/SUBSTRATO		SECAS	LLUVIAS	NORTES
Cobertura Biótica	Coral Pétreo	0%±0 D.E	0.3%±0.44 D.E	3.46%±2.9 D.E
	Octocoral	0%±0 D.E	0.02%±0.06 D.E	0%±0 D.E
	Algas Filamentosas/Pardas	1.79%±2.06 D.E	2.61%±3.82 D.E	0.12%±0.26 D.E
	Algas Verdes	4.81 %±5.85D.E	40.98 %±11.1 D.E	12.65 %±10.44 D.E
	Algas Calcáreas/Articuladas	0.06%±0.11 D.E	2.39%±1.95 D.E	1.96%±2.18 D.E
	Algas Rojas	4.42%±3.74 D.E	11.37%±8.72 D.E	5.62%±7 D.E
	Esponjas	0%±0 D.E	0.06%±0.14 D.E	0.58%±1.19 D.E
	Pastos	<i>8.08%±5.54 D.E</i>	<i>1.62%±3.78 D.E</i>	<i>0.85%±1.89 D.E</i>
	Zoantídeos/Tunicados	0%±0 D.E	0%±0 D.E	0.08%±0.17 D.E
Substrato Inerte	Arena	80.83%±6.59 D.E	40.64%±12.74 D.E	73.92%±13.34D.E
	Sedimento	0%±0 D.E	0%±0 D.E	0%±0 D.E
	Pedacería	0%±0 D.E	0%±0 D.E	0%±0 D.E
	Roca/Pavimento	0%±0 D.E	0%±0 D.E	0.77%±1.09 D.E



Figura 7. Vista representativa del paisaje 5 en temporada de lluvias (detalle del fondo, mostrando tipos de cobertura y sustrato).

Paisaje 5.

La cobertura dominante en las tres temporadas es la de algas rojas con un promedio de 39.92% (secas), 37.92% (lluvias) y 27.56% (nortes), con una proporción menor de cobertura de algas verdes con 28.88% (secas), 13.24% (lluvias) y 4.72% (nortes). Estas coberturas se encuentran asociadas al sustrato lodo, que fluctúa de 24.71% en secas, a 18.54% en lluvias y 34.73% en nortes (tabla 9, figura 8).

Tabla 9. Coberturas promedio del paisaje 5 para las tres temporadas, la cobertura predominante se resalta en negritas y en cursivas la cobertura con mayor variación.

Paisaje 5. Algas rojas con parches de algas verdes sobre sedimento blando				
COBERTURA/SUBSTRATO		SECAS	LLUVIAS	NORTES
Cobertura Biótica	Coral Pétreo	0.19%±0.33 D.E	0.22%±0.42 D.E	0.09%±0.22 D.E
	Octocoral	0%±0 D.E	0.01%±0.05 D.E	0%±0 D.E
	Algas Filamentosas/Pardas	4.08%±3.73 D.E	11.01%±17.21 D.E	3.15%±5.15 D.E
	Algas Verdes	<i>28.88%±7.07 D.E</i>	<i>13.24%±10.97 D.E</i>	<i>4.72%±6.14 D.E</i>
	Algas Calcáreas/Articuladas	1.81%±0.62 D.E	2.67%±3.86 D.E	0.46%±0.87 D.E
	Algas Rojas	39.92%±7.78 D.E	37.92%±29.82 D.E	27.56%±17.31 D.E
	Esponjas	0.08%±0.17 D.E	0.12%±0.21 D.E	1.1%±1.83 D.E
	Pastos	0%±0 D.E	1.25%±2.28 D.E	0%±0 D.E
	Zoantídeos/Tunicados	0.04%±0.09 D.E	0%±0 D.E	0%±0 D.E
Substrato Inerte	Arena	0%±0 D.E	10.52%±12.84 D.E	27.94%±29.51 D.E
	Sedimento	24.73%±5.02 D.E	18.54%±30.68 D.E	34.73%±41.5 D.E
	Pedacería	0%±0 D.E	0%±0 D.E	0%±0 D.E
	Roca/Pavimento	0.27%±0.6 D.E	0%±0 D.E	0.08%±0.3 D.E

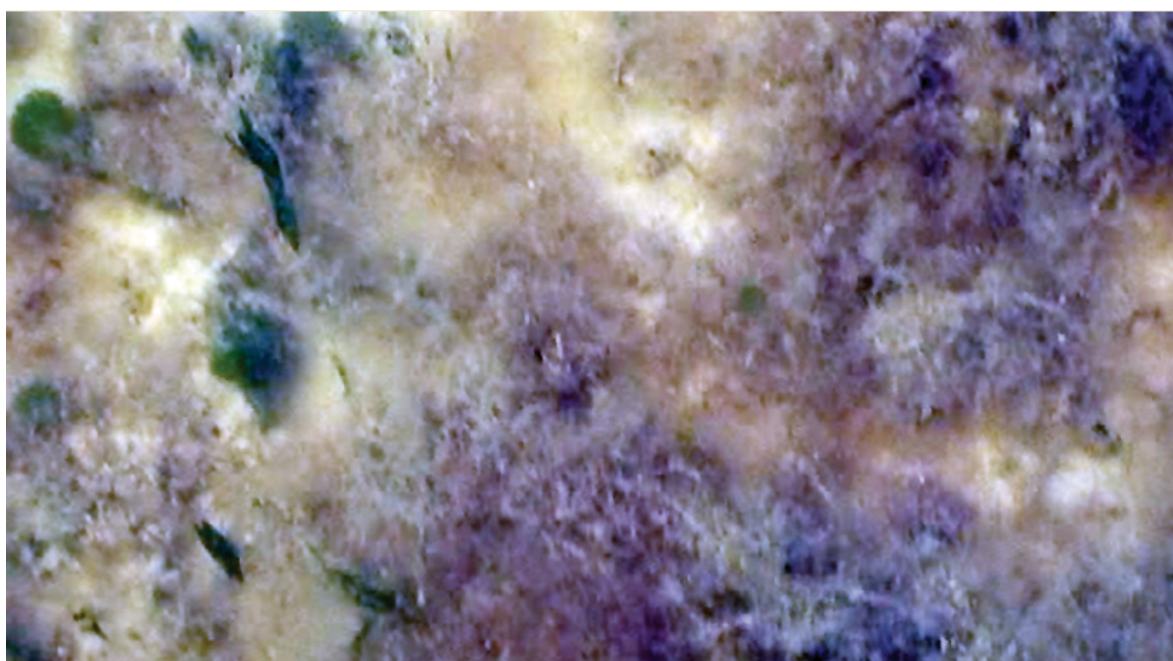


Figura 8. Vista representativa del paisaje 5 para la temporada de lluvias (detalle del fondo, mostrando tipos de cobertura y sustrato).

Paisaje 6.

La cobertura dominante en las tres temporadas es la de la asociación de algas Pardas y Filamentosas con un promedio de 14.81% (secas), 11.01% (lluvias) y 36.35% (nortes), con una proporción menor de cobertura de algas verdes con 34.62% (secas), 13.24% (lluvias) y 2.69% (nortes). Estas coberturas se encuentran asociadas al sustrato arena, que fluctúa de 15% en secas, 24.49% en lluvias y 49.04% en nortes (tabla 10, figura 9).

Tabla 10. Coberturas promedio del paisaje 6 para las tres temporadas, la cobertura predominante se resalta en negritas y en cursivas la cobertura con mayor variación.

Paisaje 6. Algas filamentosas/pardas con parches de algas verdes sobre arena				
COBERTURA/SUBSTRATO		SECAS	LLUVIAS	NORTES
Cobertura Biótica	Coral Pétreo	1.73%	0.22%±0.42 D.E	0.96%
	Octocoral	0%	0.01%±0.05 D.E	0%
	Algas Filamentosas/Pardas	14.81%	11.01%±17.21 D.E	36.35%
	Algas Verdes	34.62%	13.24%±10.97 D.E	2.69%
	Algas Calcáreas/Articuladas	6.35%	2.67%±3.86 D.E	0.38%
	Algas Rojas	26.54%	37.92%±29.82 D.E	0%
	Esponjas	0.38%	0.12%±0.21 D.E	9.81%
	Pastos	0.19%	1.25%±2.28 D.E	0%
	Zoantídeos/Tunicados	0%	0%±0 D.E	0%
Substrato Inerte	Arena	15%	26.49%±16.29 D.E	49.04%
	Sedimento	0%	0%±0 D.E	0%
	Pedacería	0%	0%±0 D.E	0%
	Roca/Pavimento	0%	0.1%±0.19 D.E	0.77%

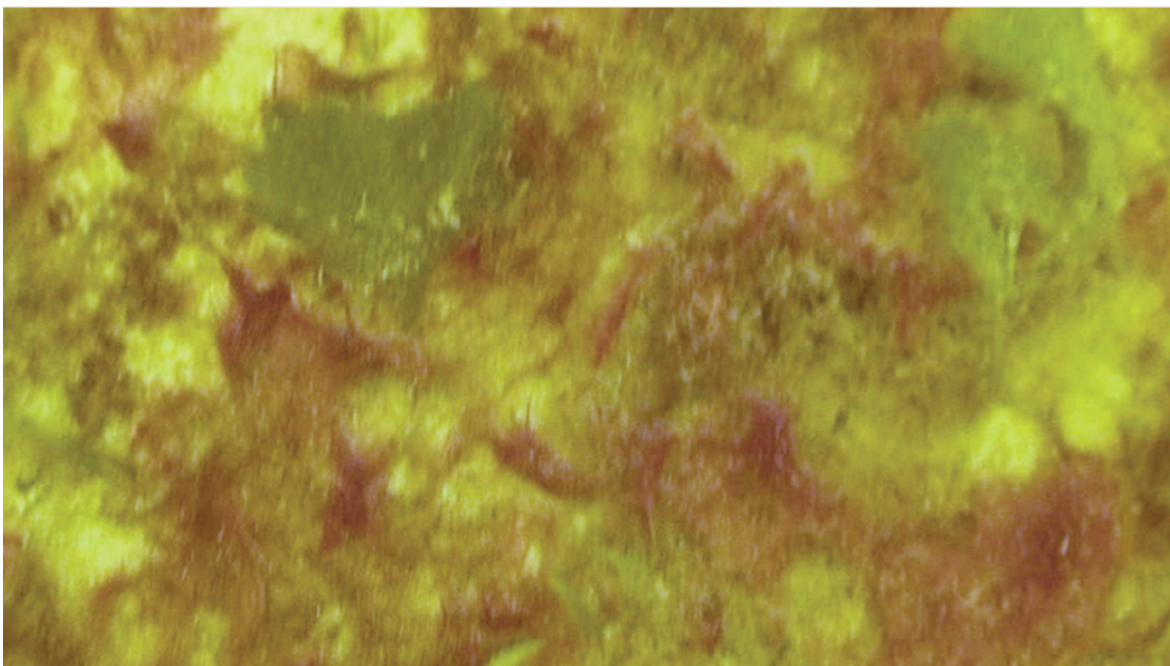


Figura 9. Vista representativa del paisaje 6, durante la temporada de lluvias (detalle del fondo, mostrando tipos de cobertura y sustrato).

Una vez definidos los paisajes constantes entre temporadas se analizó la similitud y las diferencias (SIMPER) entre los paisajes en cada temporada utilizando la bases de datos de coberturas por estaciones asociadas a cada paisaje. Este análisis definió las variables mas importantes que contribuyen a la disimilaridad entre los paisajes y entre las temporadas (tabla 11), se presentan las coberturas promedio por paisaje para una comparación visual (figuras 10. 11 y 12).

Tabla 11. Resultados del análisis SIMPER para definir las variables mas importantes de cobertura que aportan la disimilaridad entre paisajes y temporadas. Todos los valores están expresados en porcentaje de disimilaridad.

	Paisaje 1	Paisaje 2	Paisaje 3	Paisaje 4	Paisaje 5	Paisaje 6
Secas vs Lluvia	Disim. 63% Alga Roja 27% Alga Parda 17% Alga Verde 7%	Disim. 64% Halimeda 28% Alga Roja 27% Alga Parda 12%	Disim. 8% Alga Verde 32% Alga Roja 15%	Disim. 50% Alga Verde 37% Alga Roja 8% Pasto Marino 7%	Disim. 48% Alga Roja 26% Alga Verde 19% Brown Algae 11%	Disim. 57% Alga Parda 20% Alga Verde 14% Alga Roja 12%
Secas vs Nortes	Disim. 74% Alga Roja 25% Alga Parda 15% Alga Verde 6%	Disim. 53% Alga Roja 29% Alga Parda 16%	Disim. 0%	Disim. 27% Alga Roja 27% Seagrass 16% Alga Verde 12%	Disim. 57% Alga Verde 21% Alga Roja 15%	Disim. 87% Alga Roja 18% Alga Parda 16%
Lluvias vs. Nortes	Disim. 30% Alga Roja 17% Alga Verde 16% Pasto Marino 9%	Disim. 61% Halimeda 30% Esponjas 8% Alga Parda 8%	Disim. 8% Alga Verde 32% Alga Roja 15%	Disim. 43% Alga Verde 34% Alga Roja 10% Coral 3%	Disim. 62% Alga Roja 23% Alga Verde 9% Alga Parda 8%	Disim. 50% Alga Parda 24% Alga Roja 20% Alga Verde 13%

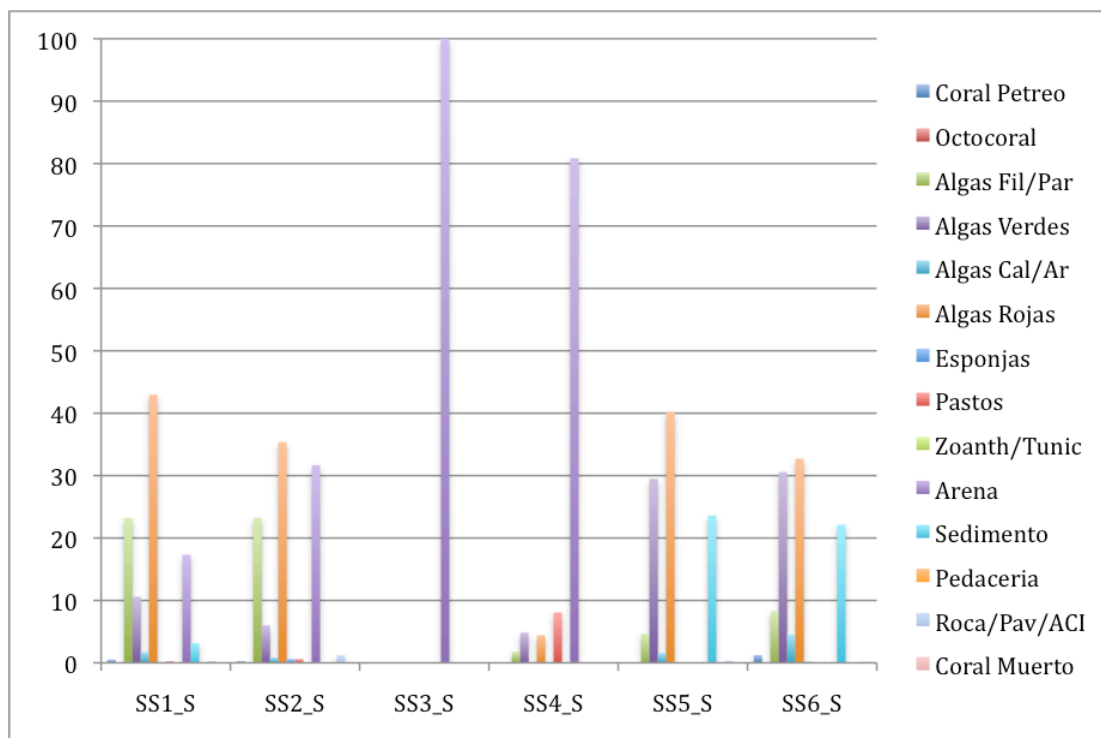


Figura 10. Coberturas promedio por paisaje para la temporada de secas (SS1_S = Paisaje 1 en temporada de secas, SS2_S = Paisaje 2 en temporada de secas, SS3...etc).

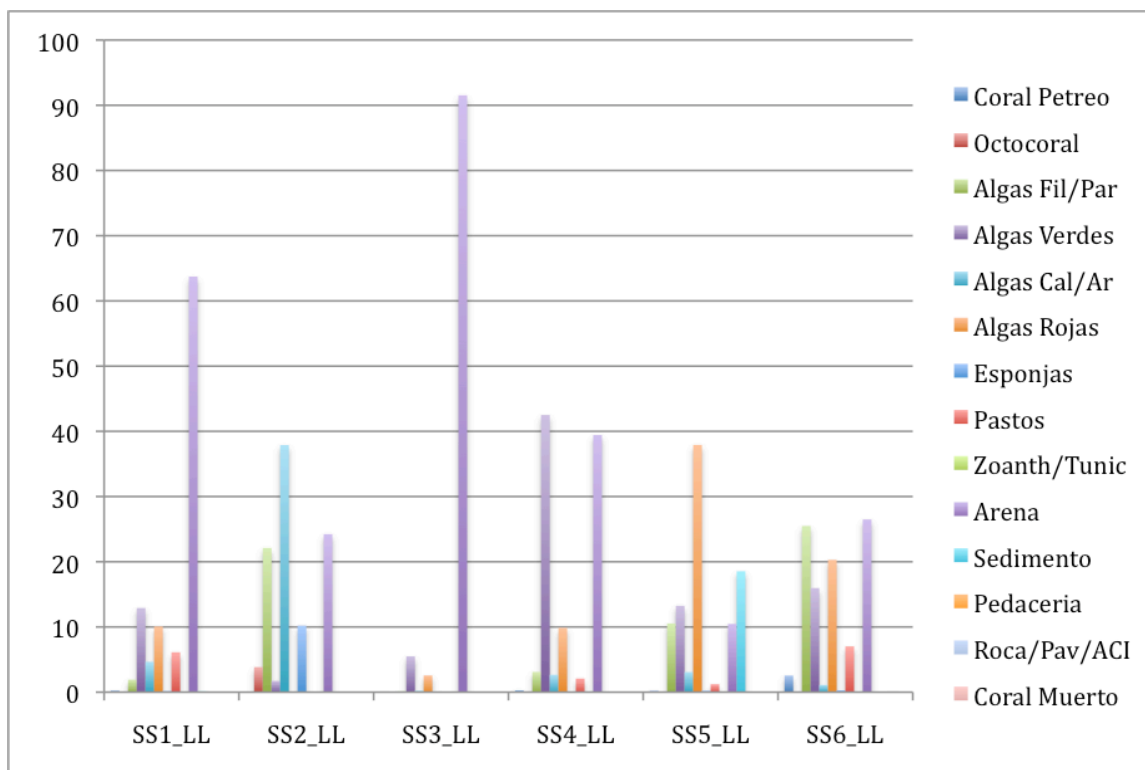


Figura 11. Coberturas promedio por paisaje para la temporada de lluvias (SS1_LL = Paisaje 1 en temporada de lluvias, SS2_S = Paisaje 2 en temporada de lluvias, SS3...etc).

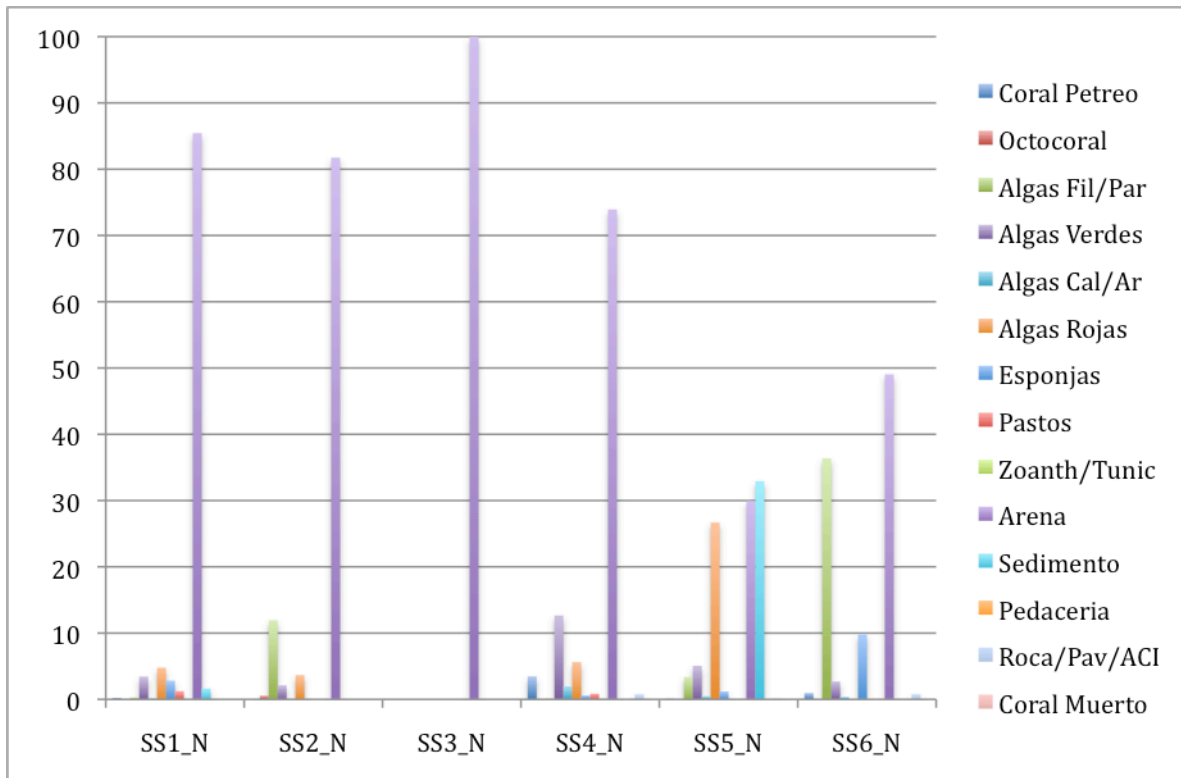


Figura 12. Coberturas promedio por paisaje para la temporada de nortes (SS1_S = Paisaje 1 en temporada de nortes, SS2_S = Paisaje 2 en temporada de nortes, SS3...etc)

Por medio de un análisis MDS se exploraron las tendencias de similitud de las coberturas de los paisajes entre las tres temporadas (figura13). Utilizando todas las variables de substrato y cobertura se representaron la evolución de cada uno de los seis paisajes a través de las tres temporadas climáticas. El estrés del diagrama MDS es de 0.05 lo cual indica un ajuste muy bueno en la representación de cada uno de los paisajes en las tres temporadas.

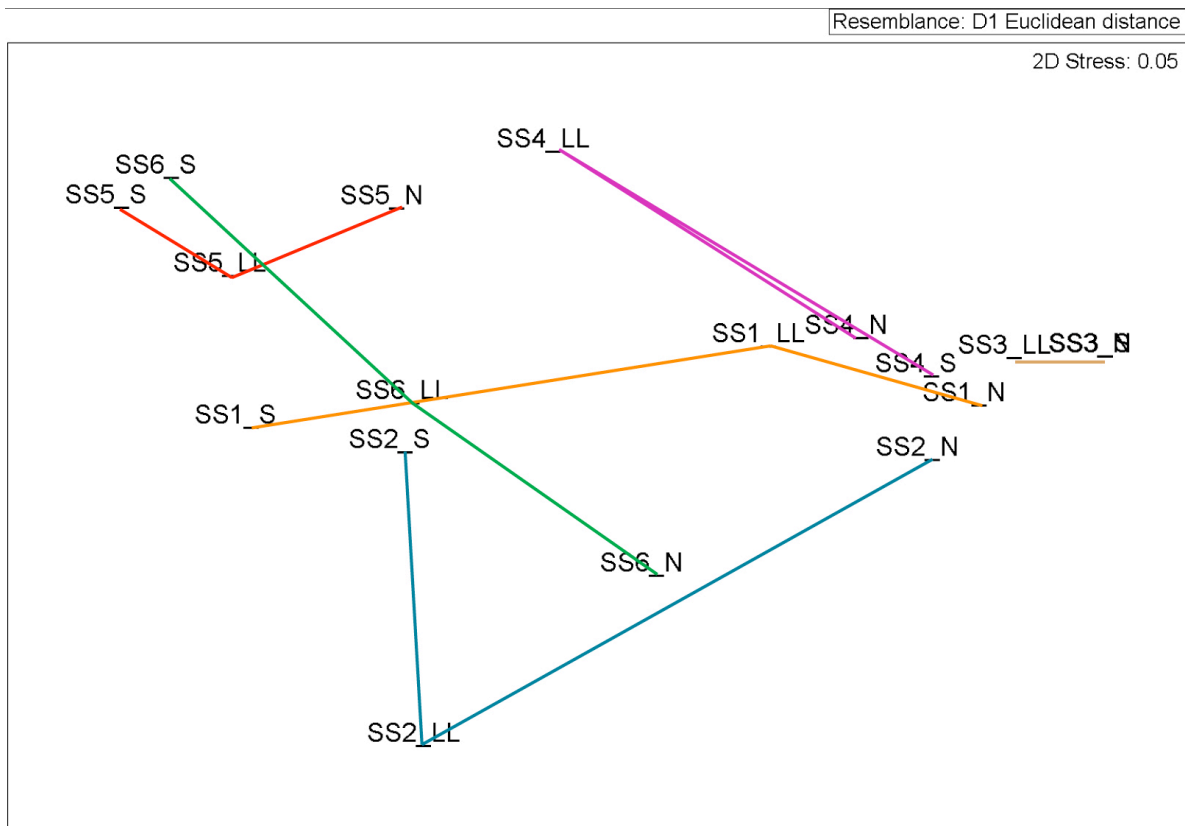


Figura 13. Diagrama MDS que representa la evolución de las coberturas de los seis paisajes (SS1, SS2, etc), en las tres temporadas (SSx_S –secas- SSx_LL -lluvias- y SSx_N -nortes-). En el diagrama, la evolución los paisajes a través de las distintas temporadas se denota por líneas de colores.

Este mismo análisis MDs permitió visualizar el comportamiento individual de las variables más importantes (substratos y coberturas bentónicas) (figuras 14 a 22). En los diagramas se representa con burbujas la magnitud del valor de cobertura promedio, esto permite una comparación visual de la dinámica de cada variable en cada paisaje a través de las temporadas climáticas.

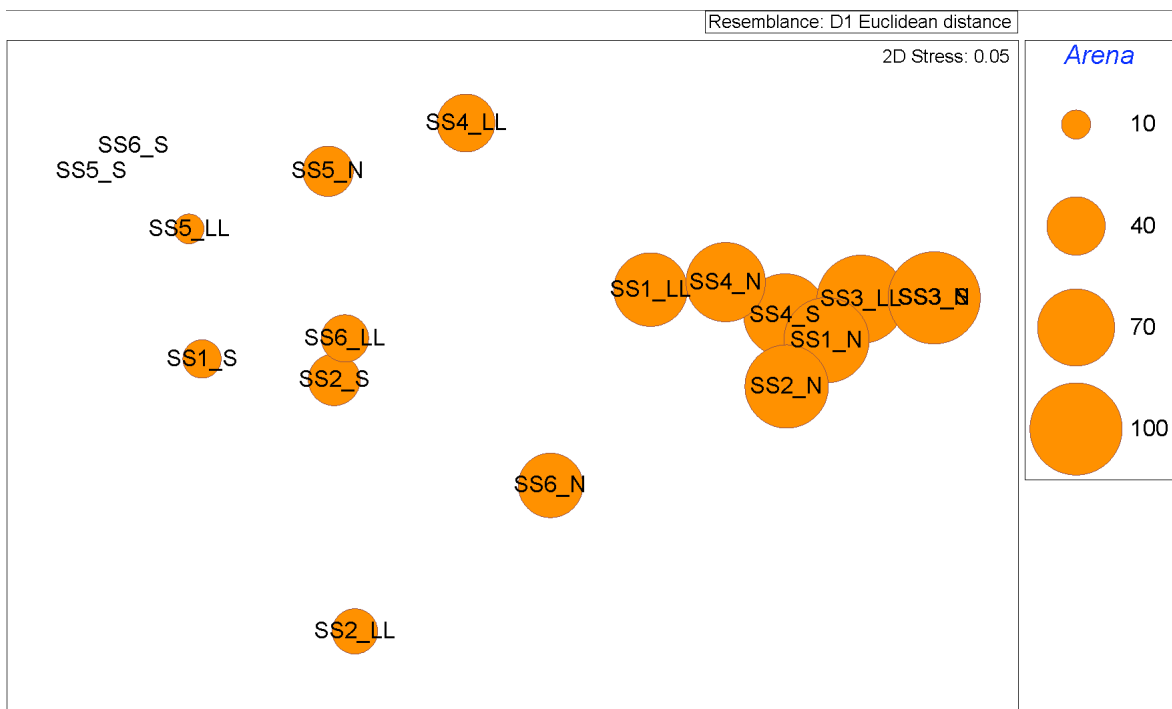


Figura 14. Diagrama MDS representando la dinámica del sustrato Arena, en cada paisaje a través de las tres temporadas climáticas (valores expresados en porcentaje de cobertura).

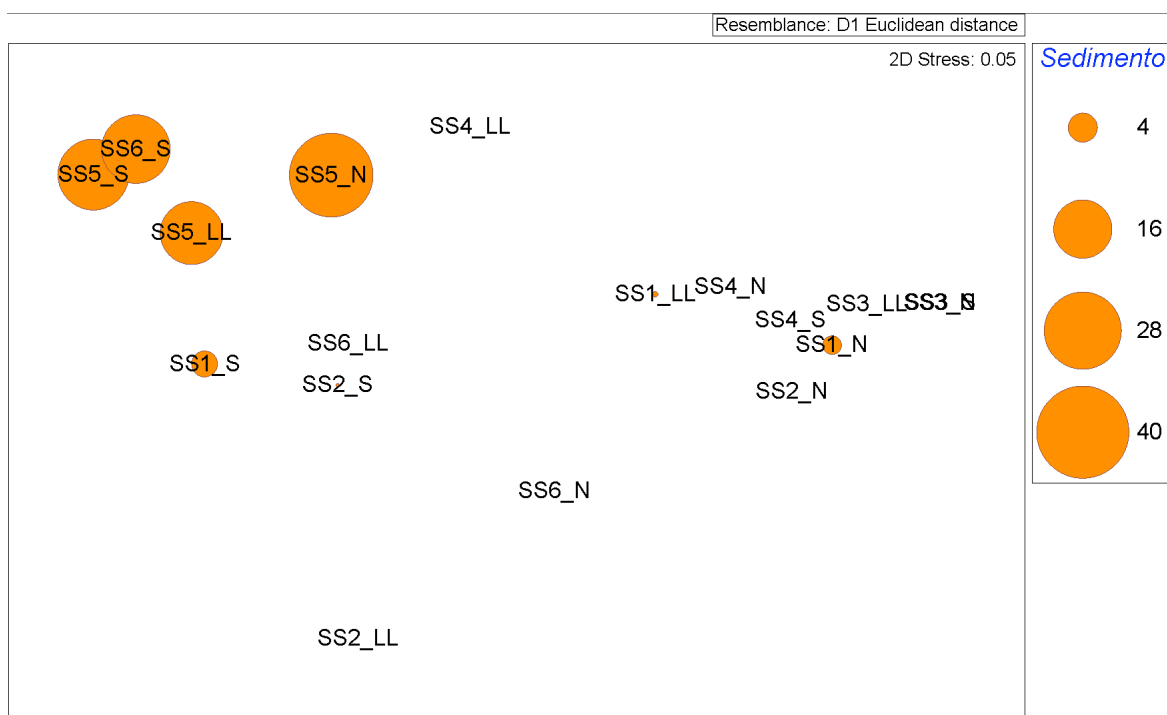


Figura 15. Diagrama MDS representando la dinámica del sustrato Lodo (sedimento fino), en cada paisaje a través de las tres temporadas climáticas (valores expresados en porcentaje de cobertura).

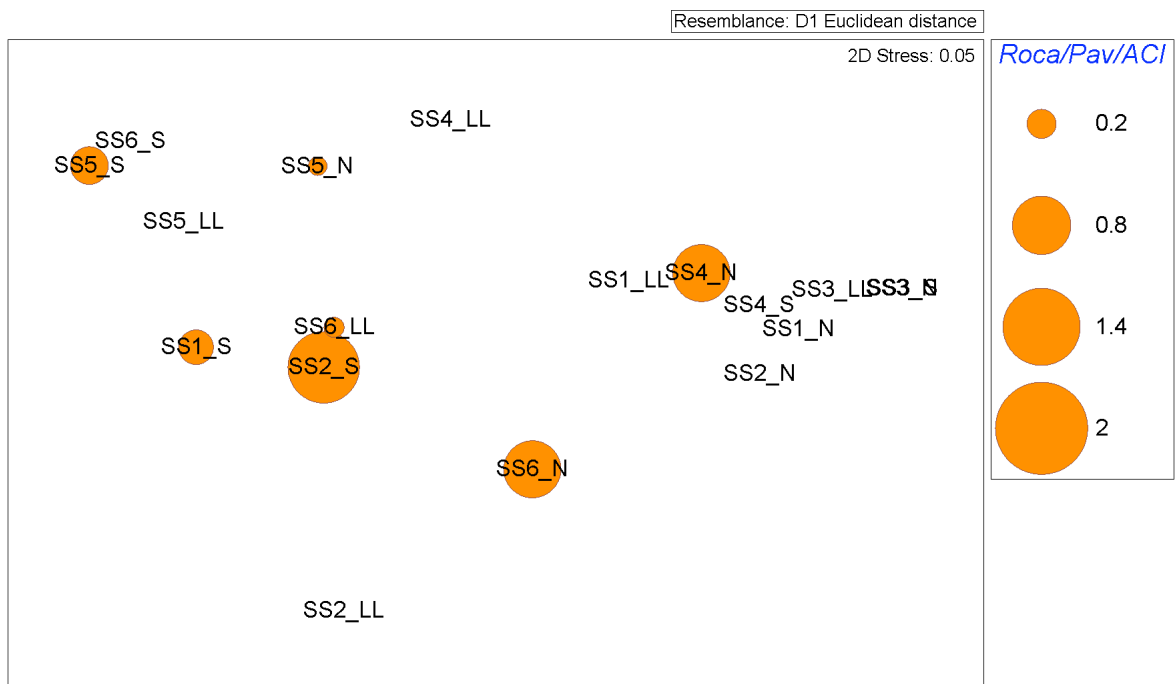


Figura 16. Diagrama MDS representando la dinámica del sustrato Pavimento Calcáreo, en cada paisaje a través de las tres temporadas climáticas (valores expresados en porcentaje de cobertura).

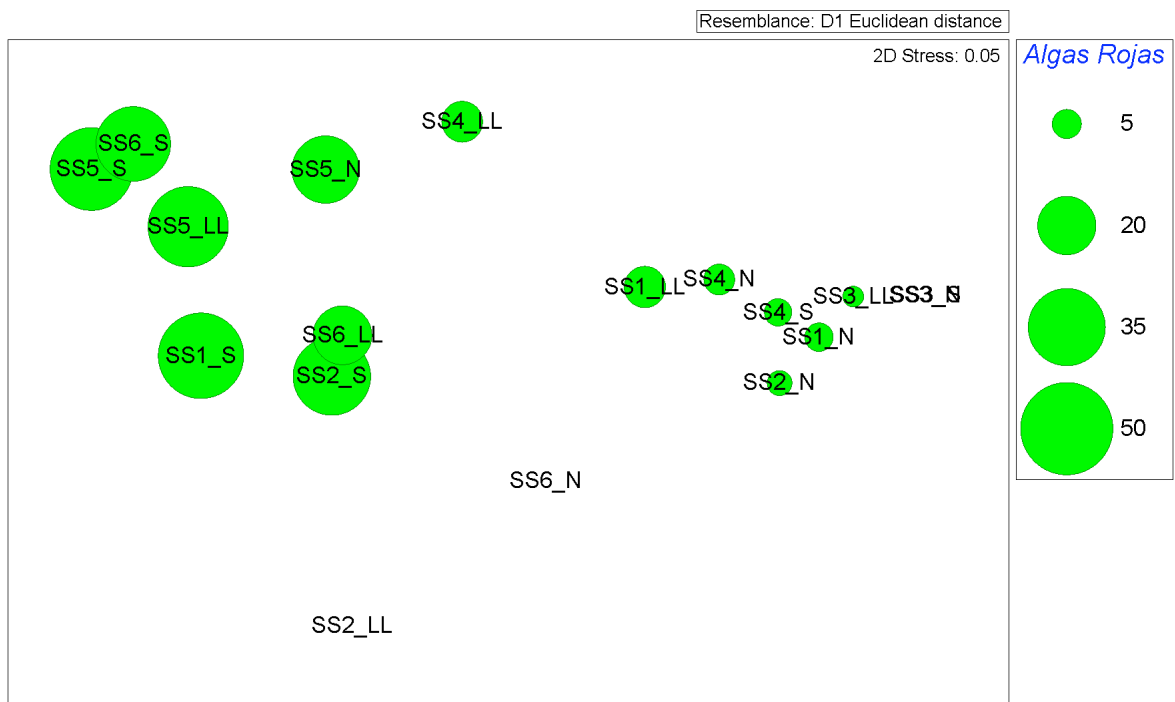


Figura 17. Diagrama MDS representando la dinámica de la variable Algas Rojas, en cada paisaje a través de las tres temporadas climáticas (valores expresados en porcentaje de cobertura).

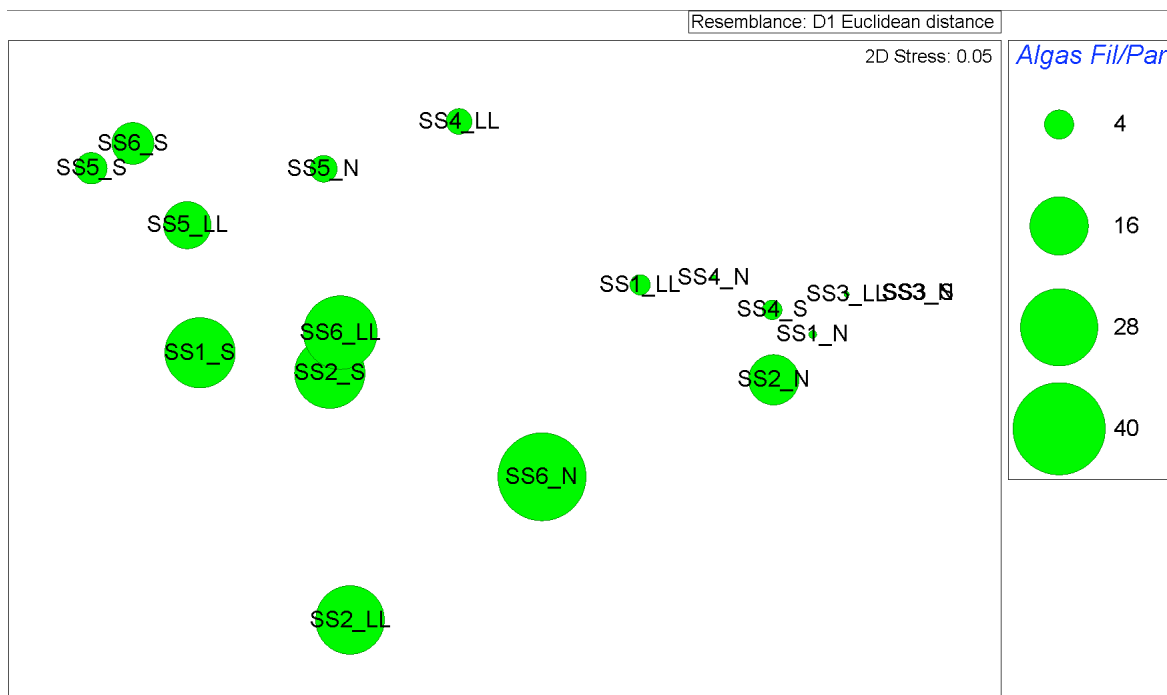


Figura 18. Diagrama MDS representando la dinámica de la variable Algas Pardas y Filamentosas, en cada paisaje a través de las tres temporadas climáticas (valores expresados en porcentaje de cobertura).

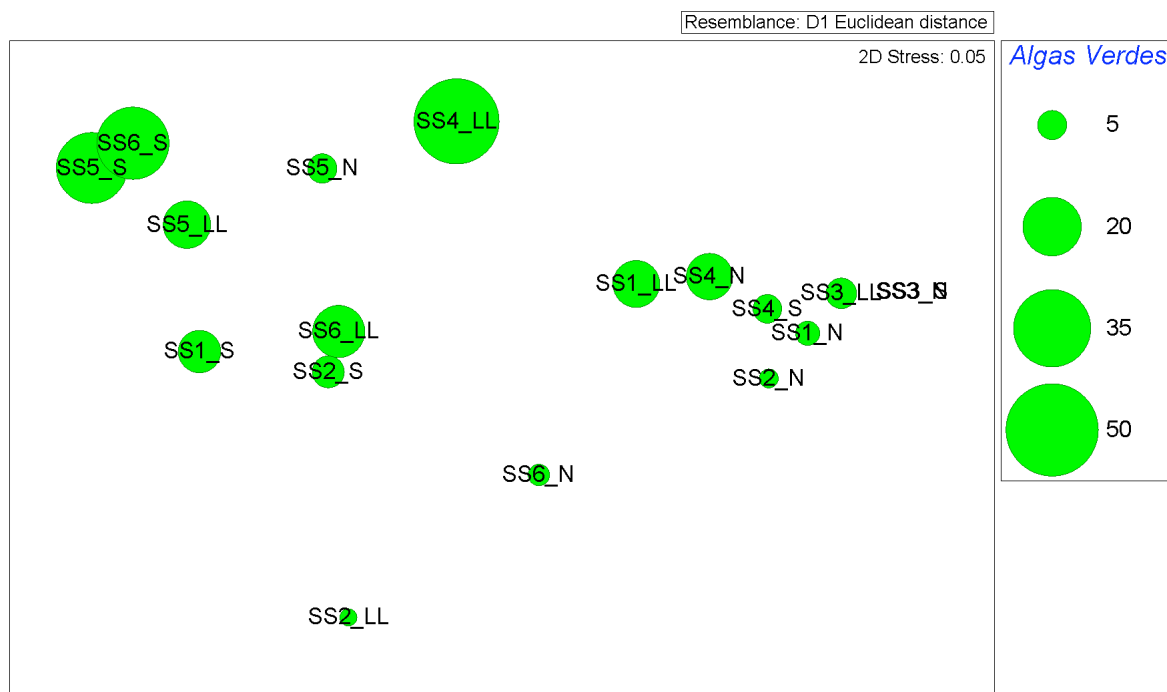


Figura 19. Diagrama MDS representando la dinámica de la variable Algas Verdes, en cada paisaje a través de las tres temporadas climáticas (valores expresados en porcentaje de cobertura).

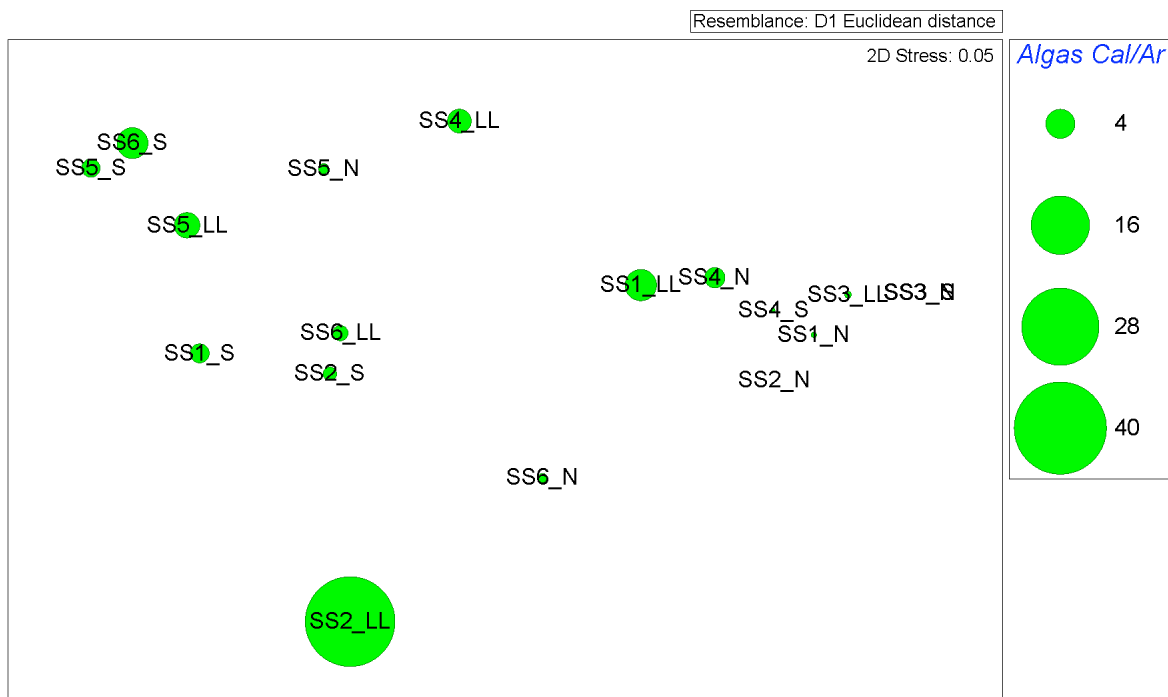


Figura 20. Diagrama MDS representando la dinámica de la variable Algas Calcáreas Articuladas (Género *Halimeda*), en cada paisaje a través de las tres temporadas climáticas (valores expresados en porcentaje de cobertura).

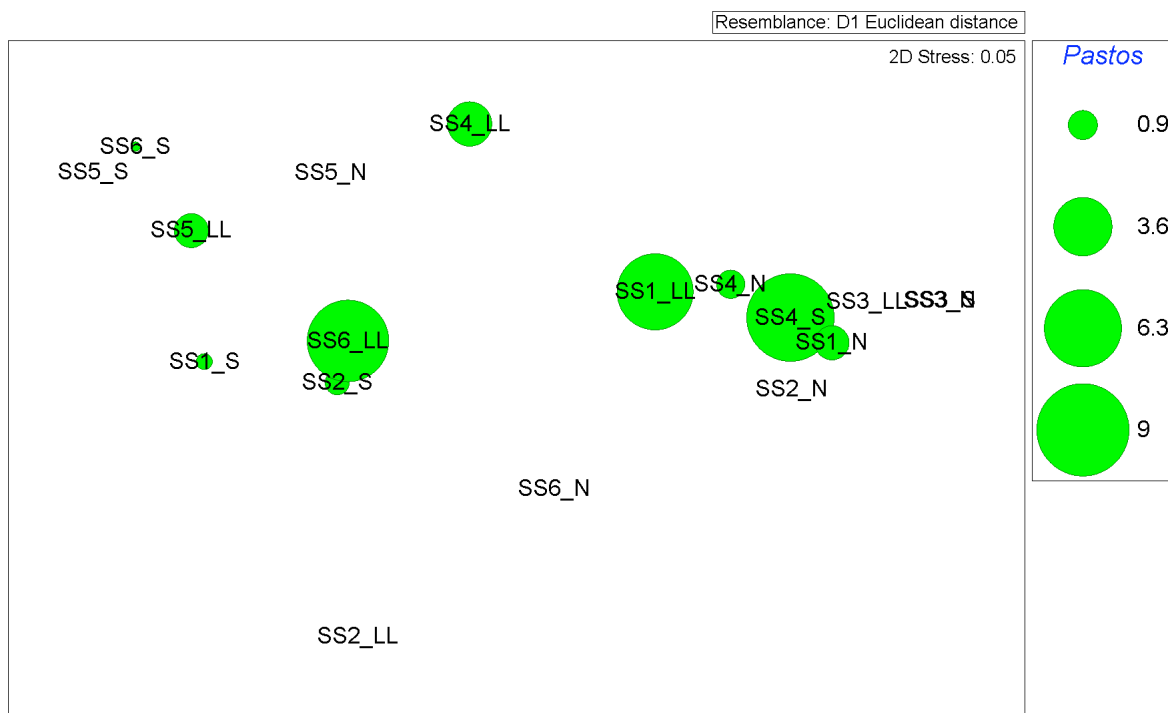


Figura 21. Diagrama MDS representando la dinámica de la variable Pastos Marinos, en cada paisaje a través de las tres temporadas climáticas (valores expresados en porcentaje de cobertura).

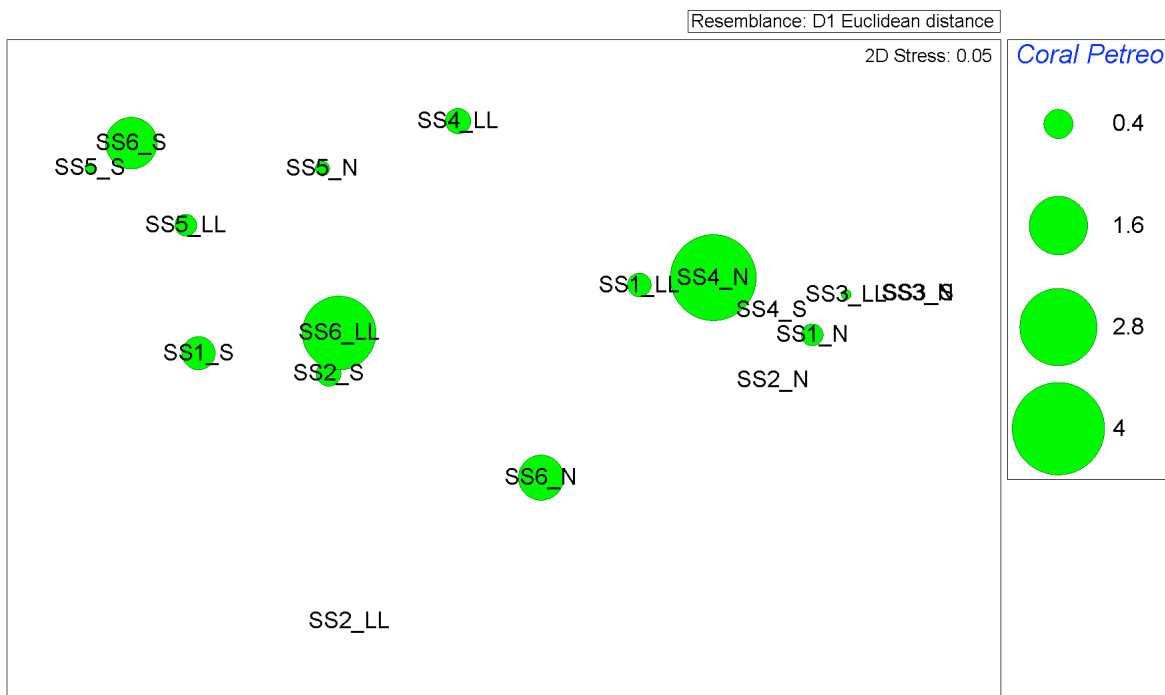


Figura 22. Diagrama MDS representando la dinámica de la variable Coral Escleractinio, en cada paisaje a través de las tres temporadas climáticas (valores expresados en porcentaje de cobertura).

Para el análisis de las comunidades de peces se obtuvieron las biomاسas por especie por estación, y tomando las estaciones asociadas a cada paisaje se obtuvieron los valores de biomasa promedio por paisaje, así como la riqueza de especies, el índice de diversidad de Shannon y el valor de equidad (figuras 23, 24 y 25). Para la temporada de secas la riqueza total de especies observada fue de 25, para la temporada de lluvias fue de 36 y para la de nortes fue de 21, este comportamiento es similar al de los valores totales de biomasa por temporada.

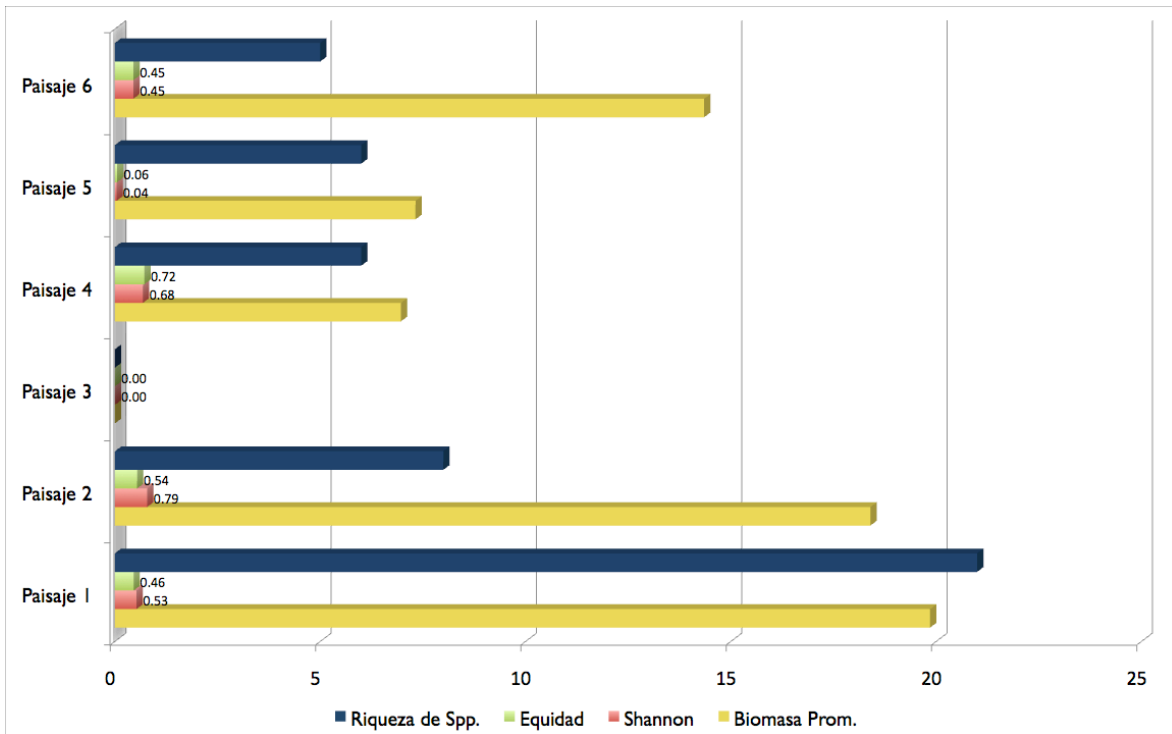


Figura 23. Comparación de biomasa promedio, diversidad, equidad y riqueza de especies para las temporadas de secas.

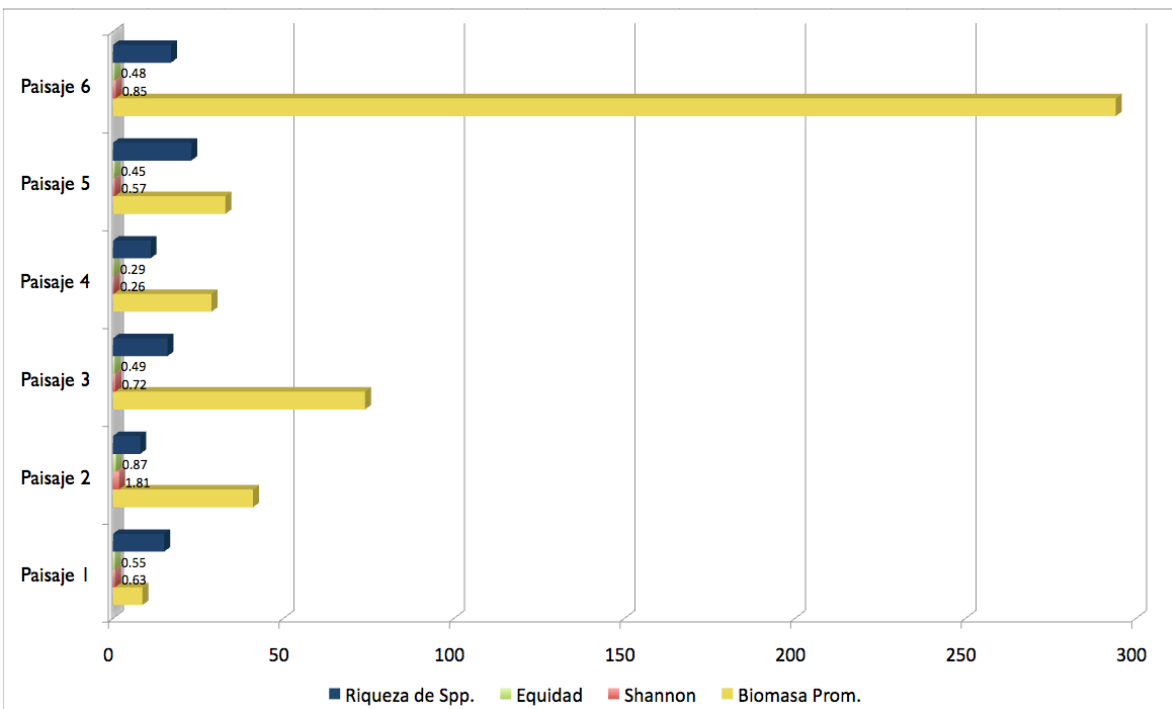


Figura 24. Comparación de biomasa promedio, diversidad, equidad y riqueza de especies para las temporadas de lluvias.

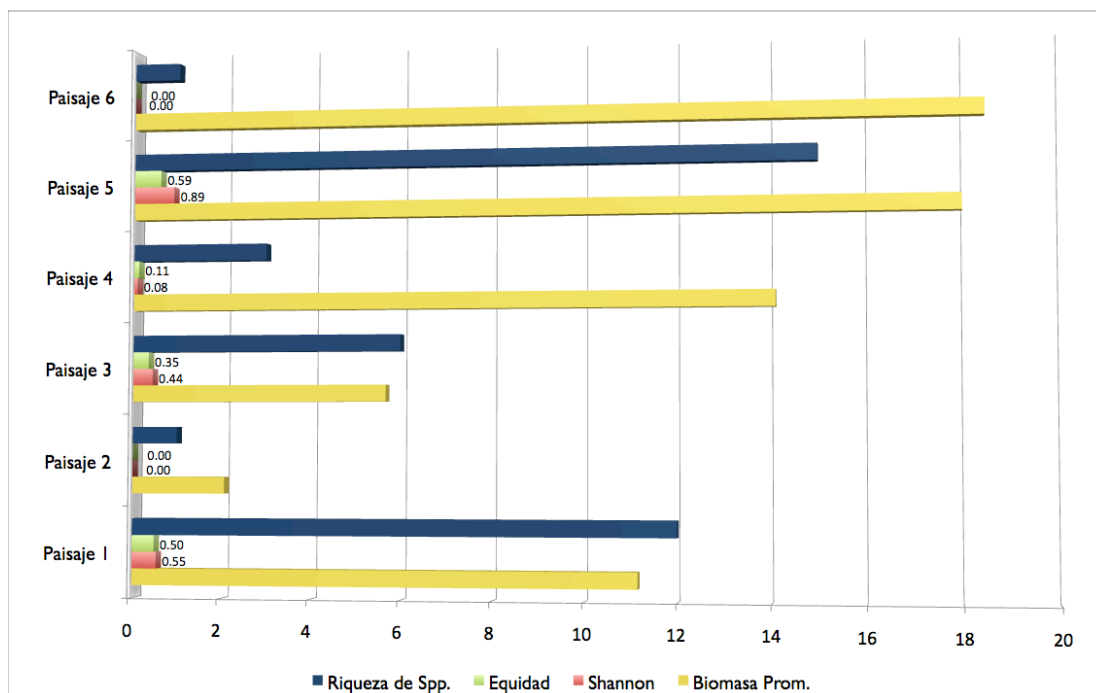


Figura 25. Comparación de biomasa promedio, diversidad, equidad y riqueza de especies para las temporadas de nortes.

Posteriormente se aplicó un análisis MDS para visualizar la relaciones de similitud de los valores de biomasa , diversidad de Shannon, equidad y riqueza de especies entre los diferentes paisajes a través de las tres temporadas (figuras 26, 27, 28 y 29), en una forma similar a la de las coberturas bentónicas.

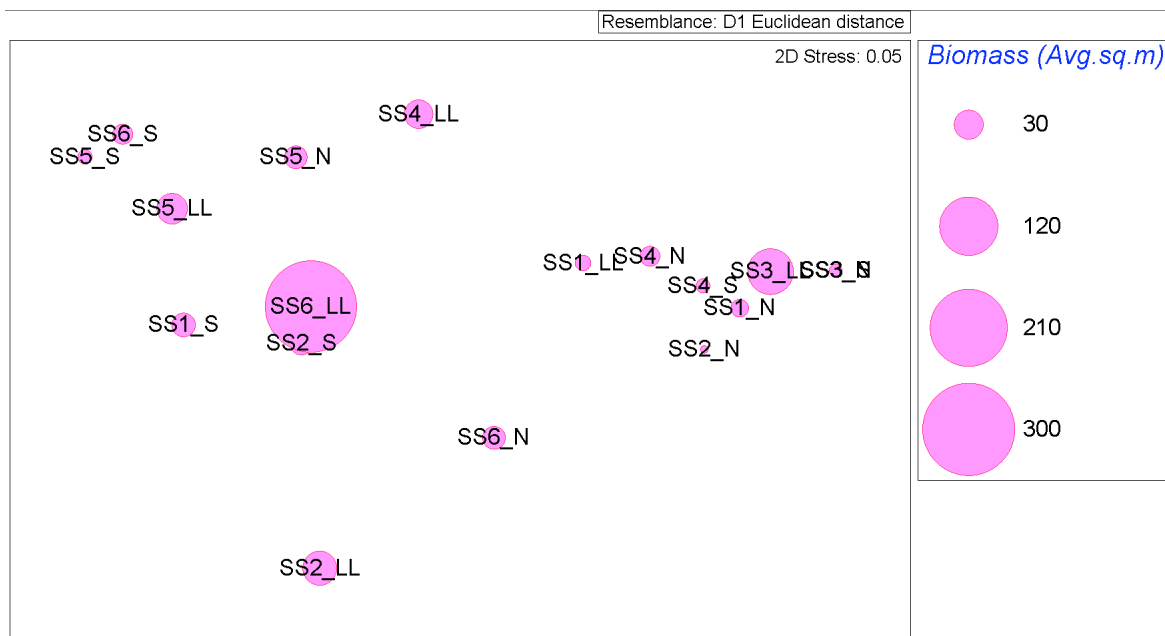


Figura 26. Diagrama MDS representando la dinámica de la biomasa total de peces, en cada paisaje a través de las tres temporadas climáticas (valores expresados en gramos por metro cuadrado).

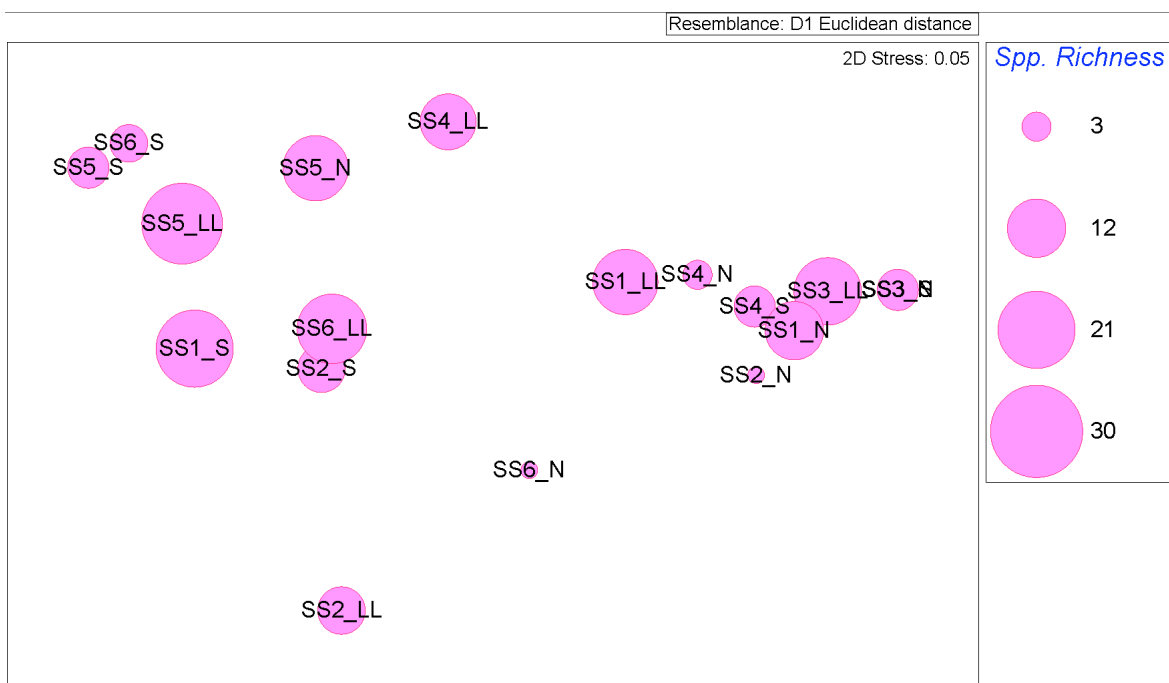


Figura 27. Diagrama MDS representando la dinámica de la riqueza de especies de peces por paisaje, por temporada climática (valores expresados en número total de especies).

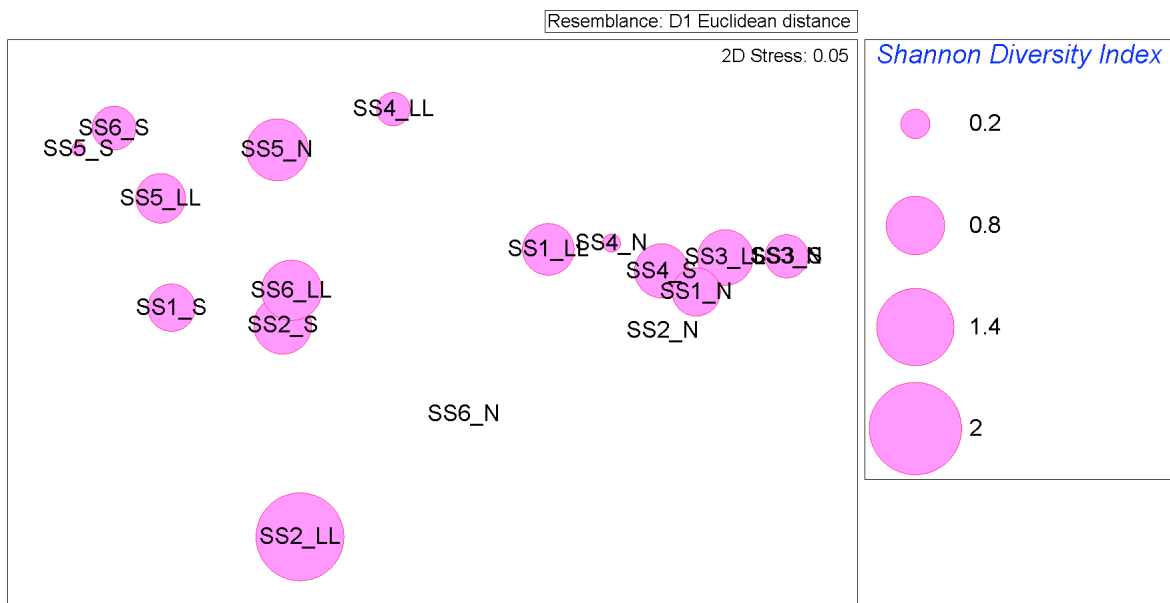


Figura 28. Diagrama MDS representando la dinámica de la diversidad de especies de peces por paisaje, por temporada climática (valores expresados unidades del índice de diversidad de Shannon).

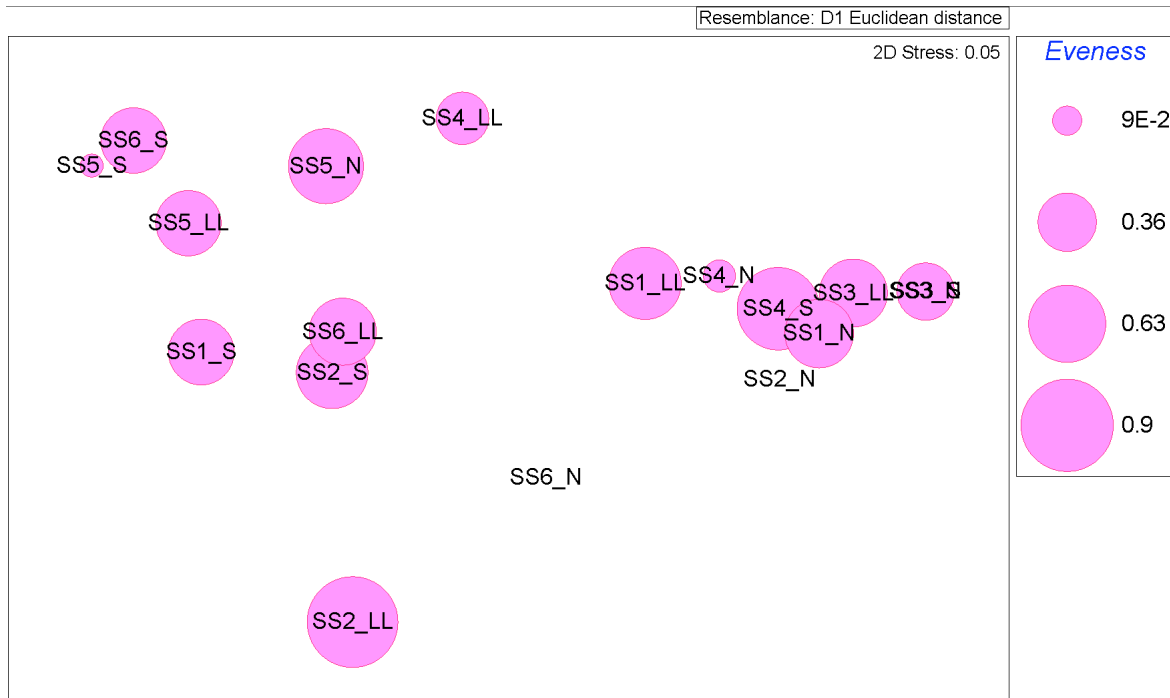


Figura 29. Diagrama MDS representando la dinámica de la equidad de especies de peces por paisaje, por temporada climática (valores expresados en índice de equidad de Pielou).

En los diagramas de dispersión (triplots) se pueden observar las diferentes especies de peces observadas y su relación a los tipos de fondos, y la magnitud de la importancia de la asociación. También se denota la posición de los diferentes paisajes en relación a las coberturas bentónicas y la importancia de la asociación de las especies de peces a los paisajes.

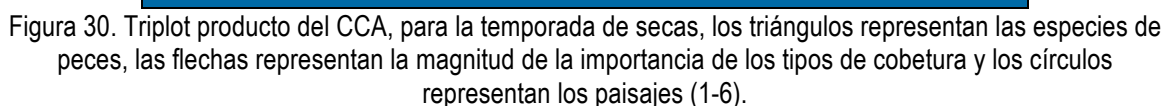




Figura 31. Triplot producto del CCA, para la temporada de lluvias, los triángulos representan las especies de peces, las flechas representan la magnitud de la importancia de los tipos de cobertura y los círculos representan los paisajes (1-6).

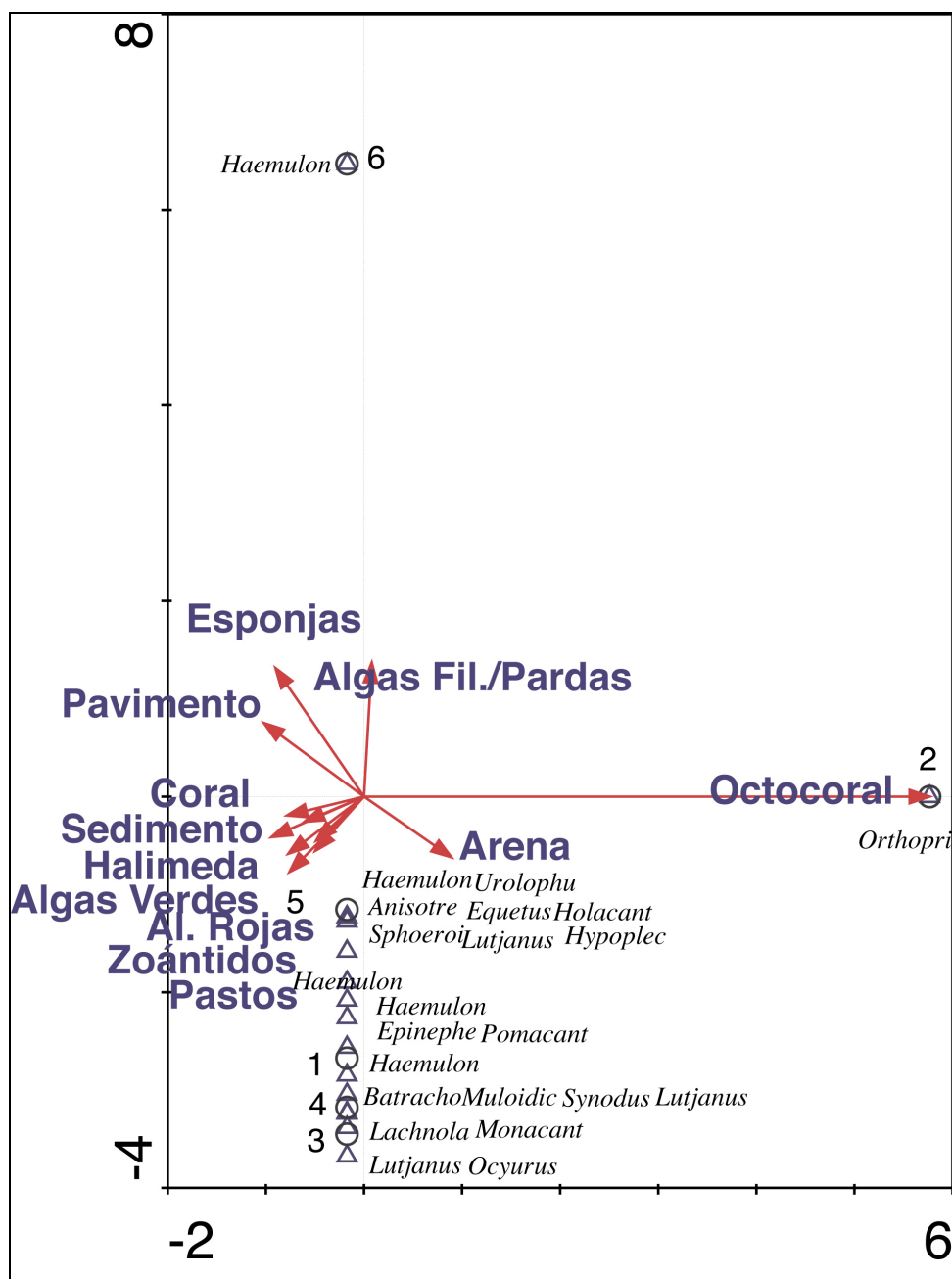


Figura 31. Triplot producto del CCA, para la temporada de nortes, los triángulos representan las especies de peces, las flechas representan la magnitud de la importancia de los tipos de cobertura y los círculos representan los paisajes (1-6).

Se generaron dos tipos diferentes de productos batimétricos a partir de los relevamientos (~20,000 puntos x,y,z) el primero fue el mapa batimétrico generado a partir de modelación geoestadística (kriging, figura 32) que presenta la desventaja de generar información que no existe entre un punto de medición y otro, pero que para esta aplicación en esta zona

sublitoral de bajo relieve y pendiente poco pronunciada produce resultados aceptables, para mapear la tendencia batimétrica de la zona y para mapear a detalle las estructuras llamadas “Bajas de Sisal.”

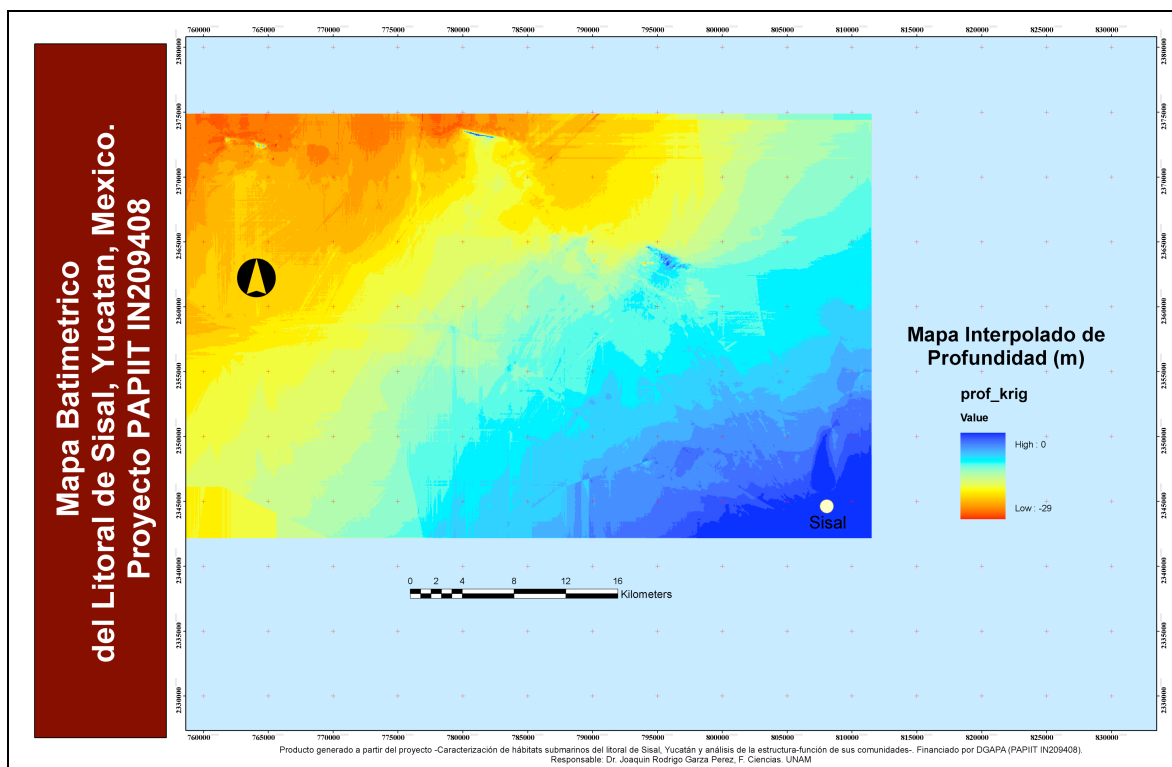


Figura 32. Mapa batimétrico de la zona litoral de Sisal Yucatán, generado por kriging. Con una resolución espacial (horizontal) de 30 x 30 m/píxel.

El segundo producto batimétrico se generó a utilizando la técnica de predicción espacial GRASP, con las bandas 1, 2 y 3 de una imagen de satélite Landsat ETM+ como variables predictivas y los registros de profundidad (x,y,z) como variable de respuesta. Se obtuvo un mapa predictivo de batimetría (Figuras 33 y 34) a la misma resolución espacial de la imagen de satélite (30 x 30m /píxel), la ventaja de este producto es la posibilidad de expandir la predicción a un área mayor que la de los muestreos y al estar basada en las bandas de la imagen satelital se mantienen los patrones espaciales del fondo. Una de las desventajas es la incertidumbre en la predicción producida por la turbidez del agua.

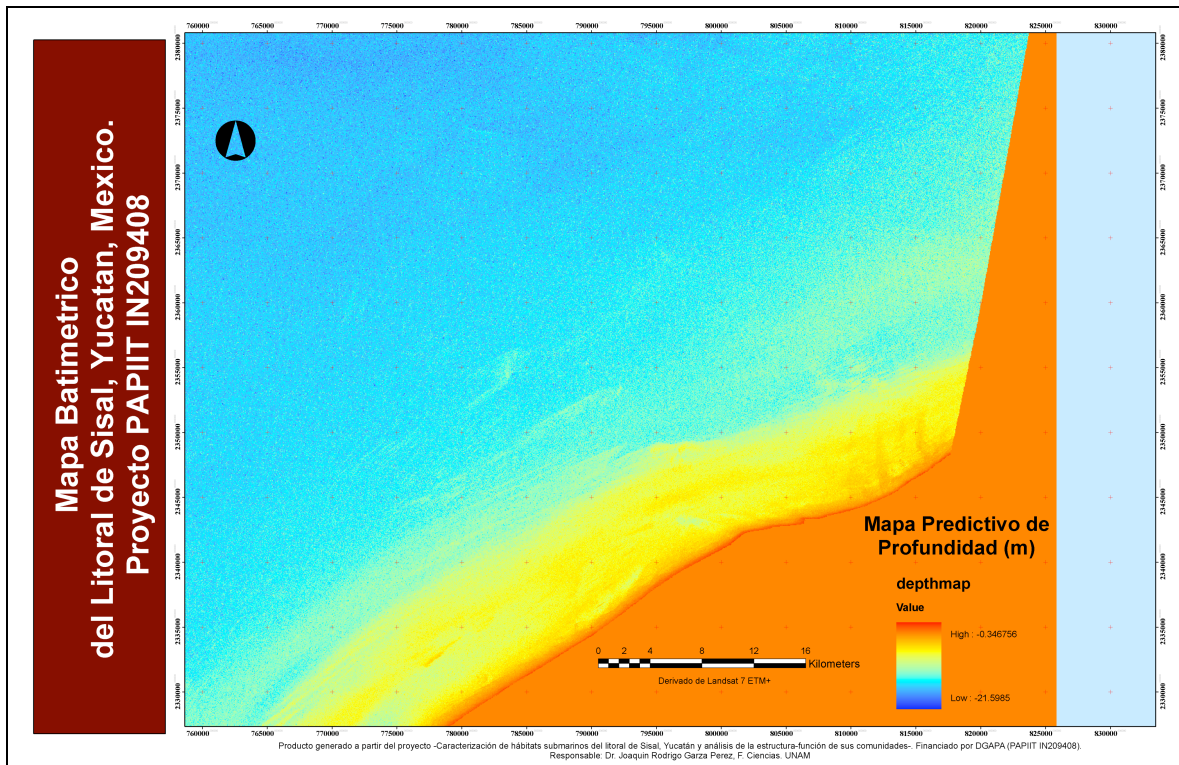


Figura 33. Mapa predictivo de profundidad del litoral de Sisal Yucatán, generado por medio de GRASP, con una resolución espacial de 30 x 30 m /píxel.

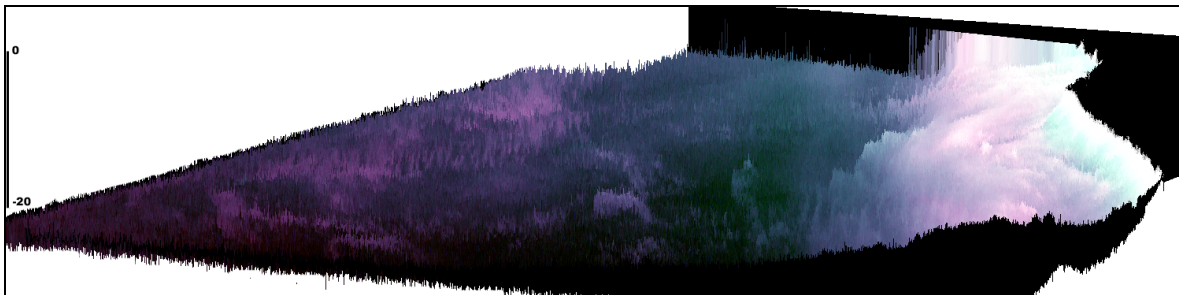


Figura 34. Modelo batimétrico en 3-D, generado por sobreposición de una imagen satelital Landsat 7ETM+ sobre el mapa predictivo de batimetría generado con GRASP.

Utilizando la misma imagen satelital Landsat 7 ETM+ del año 2000 se realizó una clasificación supervisada utilizando las estaciones de campo como semillas para definir las firmas espectrales de cada uno de los seis paisajes y se obtuvo un mapa temático a una resolución espacial de 30 x 30m /píxel (figura 35).

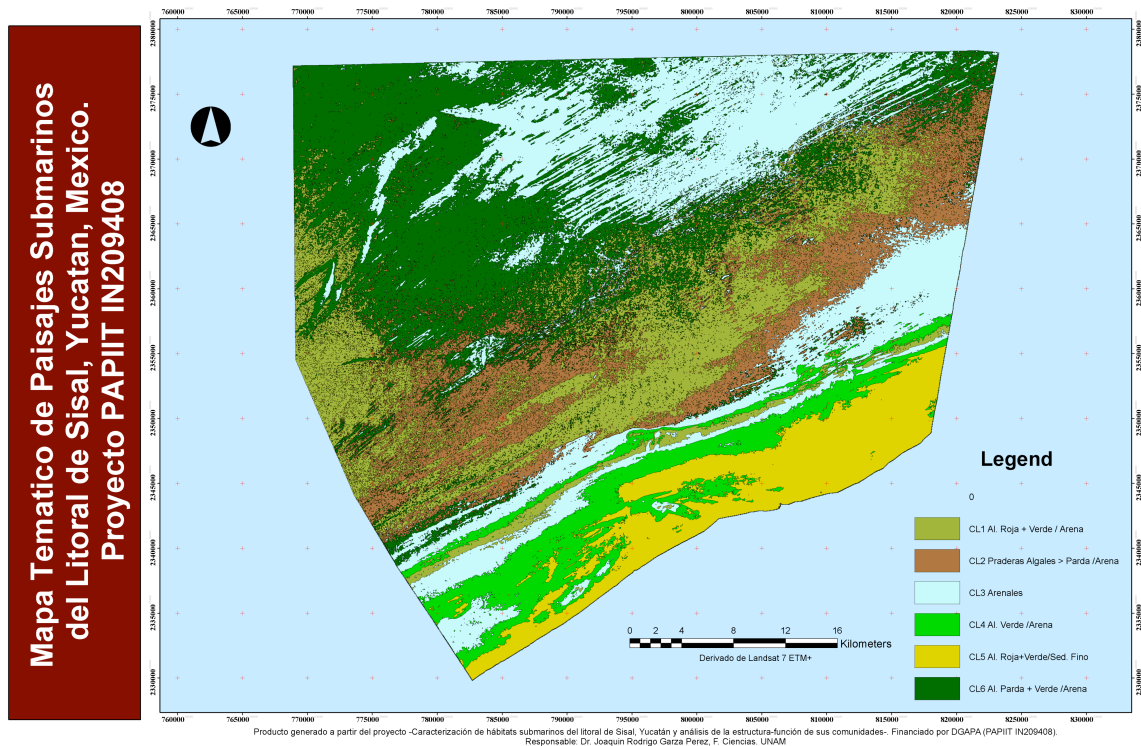


Figura 35. Mapa temático de los paisajes submarinos de Sisal, derivado de la clasificación supervisada de una imagen Landsat ETM+ con una resolución de 30 x 30 m/píxel.

Con las bases de datos de tipos de coberturas bentónicas por estación se realizaron modelaciones espaciales predictivas utilizando la técnica de GRASP. Las bandas 1,2 y 3 de la imagen del satélite en conjunto con la predicción espacial de batimetría se utilizaron como variables predictivas en los modelos. Las variables de cobertura bentónica que produjeron modelos predictivos satisfactorios fueron algas verdes (figura 36), algas pardas y filamentosas (figura 37) y algas calcáreas articuladas del género *Halimeda* (figura 38).

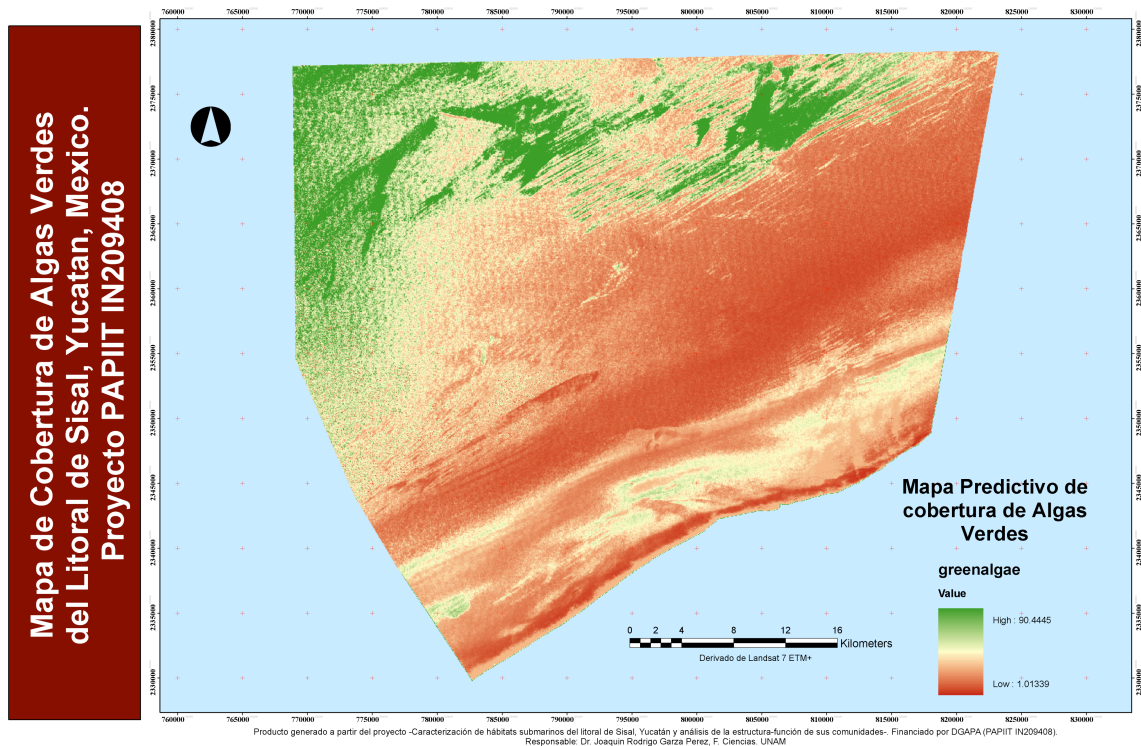


Figura 36. Mapa predictivo de cobertura de algas verdes para la zona de interés de Sisal.

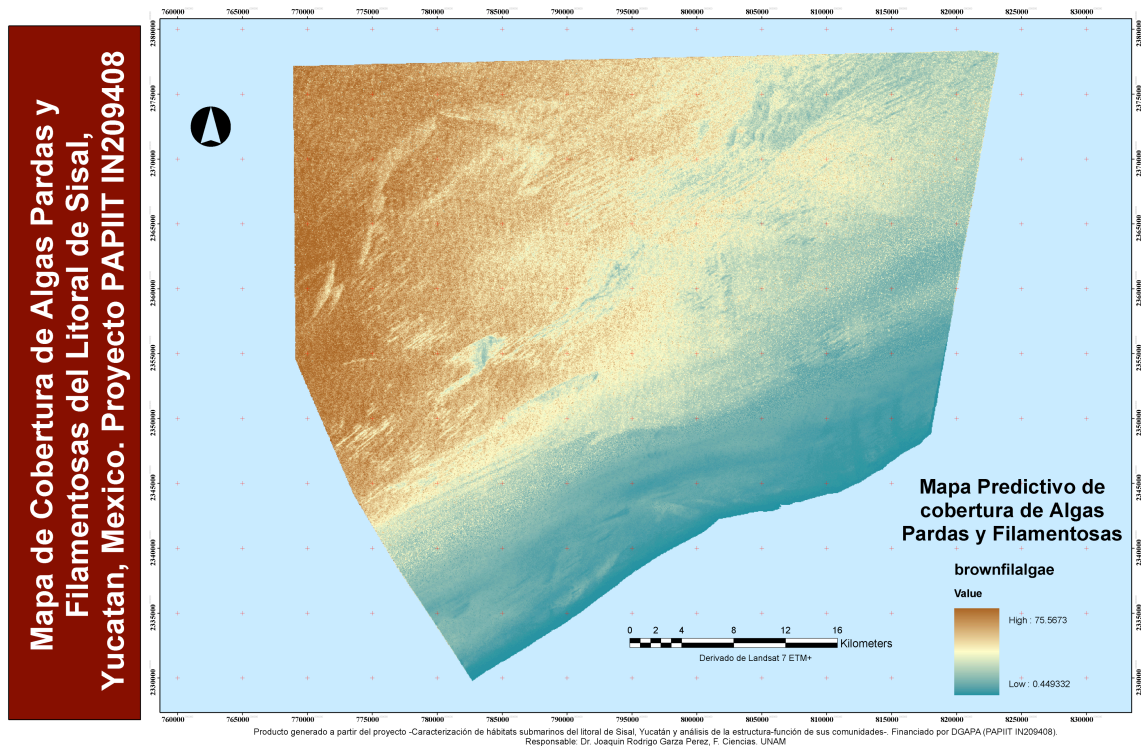


Figura 37. Mapa predictivo de cobertura de algas pardas y filamentosas para la zona de interés de Sisal.

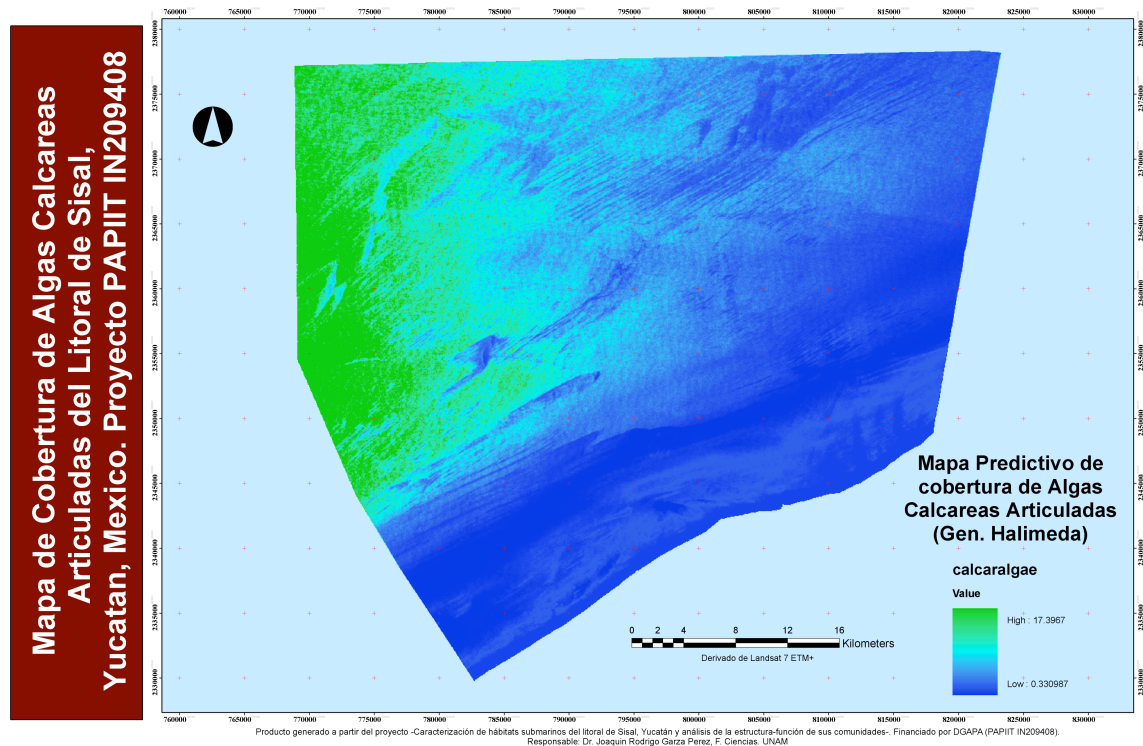


Figura 38. Mapa predictivo de cobertura de algas verdes para la zona de interés de Sisal.

6. Conclusiones y Recomendaciones

En vista de los resultados obtenidos en este proyecto de investigación, se emiten las siguientes conclusiones y recomendaciones para futuros estudios en el área.

1. Los productos batimétricos generados por este proyecto constituyen una base de información muy valiosa y usados en conjunto con el mapa temático de paisajes submarinos, se pueden plantear con mas objetividad diseños de muestreo con intereses específicos.
2. La variable mas importante a la que se asociaron tanto biomاسas como riqueza de especies de peces es la complejidad del hábitat. En la zona litoral de Sisal, con su

fondo marino de origen sedimentario, de topografía homogénea y suave pendiente esta complejidad está dada por la cobertura de algas que fluctúa de temporada a temporada climática y está completamente asociada a las condiciones ambientales de esas temporadas, tales como irradiación solar, temperatura, nubosidad, velocidad del viento, velocidad de corrientes marinas, intensidad de oleaje, el “upwelling” de la corriente del caribe sobre la plataforma de Yucatán, etc.

3. Para un estudio de las comunidades de peces más completo y con mayor precisión se recomienda el empleo de técnicas de captura, con apoyo de la comunidad de pescadores local, tomando en cuenta eficacias de los diferentes artes de pesca y el área de captura. Esto dará mejores estimaciones de biomasa, capacidad de carga del sistema, riqueza de especies y sobre todo de volúmenes de captura de las especies económicamente importantes.
4. Se recomienda enfocar este tipo de esfuerzos principalmente en las zonas pesqueras asociadas a las estructuras de carbonatos presentes en el litoral de Sisal, conocidas como “Bajas de Sisal,” que son las que funcionan como concentradoras de diversidad y biomasa durante todo el año.
5. Se desestima la utilización sistemática de imágenes satelitales, ya que se ha comprobado que las imágenes mas útiles se obtienen durante la época de secas y que los patrones espaciales de distribución de los paisajes submarinos permanecen constantes a lo largo del año y han sido constantes en al menos las últimas dos décadas. Por tanto una imagen clara y sin olas durante un período anual debe de ser suficiente para cualquier objetivo de mapeo de fondos y/o predicción espacial.

Bibliografía Citada:

- Arias-González JE, Done TJ, Page CA, Cheal A, Kininmonth S & Garza-Pérez JR. 2006. Towards a reefscape ecology: Relating biomass and trophic structure of fish assemblages to habitat at Davies Reef, Australia. *Marine Ecology Progress Series*, 320:29-41.
- Clarke KR, RH Green. 1988. Statistical design and analysis for a 'biological effects' study. *Maine Ecology* .46: 213-226.
- Clarke, K. R. & R. M. Warwick. 2001. Change in marine communities. An approach to statistical analysis and interpretation. Primer-E Ltd. Plymouth Marine Laboratory.
- Costanza R, Sklar FH, White ML. 1990. Modeling coastal landscape dynamics. *BioScience* 40: 91– 107
- Fuentes-Yaco CD, AS de Leon, MA Monreal-Gomez, F Vera-Herrera. 2001. Environmental forcing in a tropical estuarine ecosystem: the Palizada River in the southern Gulf of Mexico. *Marine and Freshwater Research*, (52): 735–744 pp.
- Garza Pérez JR. 2004. Información y Manejo para la Protección de la Biodiversidad de la Barrera Arrecifal de México: Evaluación de variables, Modelación Espacial del Hábitat y SIG. Tesis de Doctorado. CINVESTAV-IPN, unidad Mérida.
- Garza-Pérez JR, Lehmann A, & JE Arias-González. 2004. Spatial Prediction of Coral Reef Habitats: Integrating Ecology with Spatial Modeling and Remote Sensing. *Marine Ecology Progress Series* 269:141-152.
- Hastie T, Tibishirani R (1990) Generalized additive models. Chapman Hall, London
- Legendre P, Galzin R & ML Harmelin-Vivien. 1997 Relating behavior to habitat: Solutions to the fourth-corner-problem. *Ecology* 78 (2) 547-562
- Lehmann A, Overton JMC, Leathwick JR (2002) GRASP: Generalized Regression Analysis and Spatial Predictions. *Ecological Modelling*, 157: 189-207
- Logan W. 1969. Carbonate sediments and Reefs, Yucatán Shelf, Mexico. George Banta company, INC. Menasha, Wisconsin. 36-41pp.
- Núñez-Lara E, Arias-González JE, Legendre P (2005) Spatial patterns of Yucatan reef fish communities: Testing models using a multi-scale survey design. *J Exp Mar Biol* 15 Ecol 324: 157–169. 16
- ter Braak, C. J. F., and P. Smilauer. 1998. CANOCO Reference Manual and User's Guide to Canoco for Windows: Software for Canonical Community Ordination (version 4). Microcomputer Power (Ithaca, NY USA) 352 pp.
- Tunnell JR. Jr. 1988. Regional comparison of southwestern Gulf of Mexico to Caribbean Sea coral reefs. *Proceedings of the Sixth International Coral Reef Symposium*, (3):303-308pp.
- Turner MG, Gardner RH, 1991. Quantitative methods in landscape ecology: an introduction. *Ecological Studies*, 82: 3-14
- Turner MG, RH Gardner, RV O'Neill. 2001. Landscape ecology in theory and practice: pattern and process. Springer Ed. New York, E.U.A.
- Urban DL, O'Neill RV, Shugart, HH Jr. 1987. Landscape Ecology. *BioScience*, 37 (2) 119-127.
- Yee TW, Mitchell ND (1991) Generalized additive models in plant ecology. *Journal of Vegetation Science* 2: 587-602