



# Evaluación del monitoreo de la Zona de Refugio Pesquero de Celestún 2023

The  
**Rufford**  
Foundation  
[www.rufford.org](http://www.rufford.org) @ruffordgrants 



Omar Sánchez Becerril  
Raúl R. Villanueva Poot  
Leopoldo E. Palomo Cortés  
Universidad Marista de Mérida

Comité de la Zona de Refugio Pesquero de Celestún y Federación de Cooperativas Pesqueras,  
Acuícolas y de Servicios Turísticos de Celestún S.C. de R.L. de C.V.

Este documento debe citarse como:

Sánchez-Becerril, O., Villanueva-Poot, R. R., Palomo, L. E. 2024. Evaluación del monitoreo de la Zona de Refugio Pesquero de Celestún 2023. Universidad Marista de Mérida.

## **Resumen Ejecutivo**

La Zona de Refugio Pesquero (ZRP) de Celestún, establecida en 2019, ha sido objeto de esfuerzos de monitoreo en el año 2023, con la participación de pescadores locales, a pesar de las complicaciones como la pandemia de COVID-19, que afectaron el tiempo de vigencia de cinco años destinado para su evaluación. Dos enfoques metodológicos, el monitoreo académico y el monitoreo institucional, fueron empleados para examinar la diversidad de las principales especies comerciales en esta ZRP.

Los resultados obtenidos revelan que, aunque el tipo de fondo o sustrato no parece ser un factor determinante en la distribución de las especies de interés comercial, se evidencia una escasa presencia de estructuras bióticas como corales o praderas marinas. Sin embargo, se destaca la congruencia en la evaluación de la diversidad biológica a través del índice de diversidad de Shannon-Weaver, a pesar de las disparidades metodológicas entre los dos tipos de monitoreo.

Además, se anticipa un panorama prometedor para la ZRP de Celestún en términos de crecimiento, reclutamiento y diversidad biológica a lo largo de una escala temporal más amplia. Aunque las estimaciones de biomasa no pudieron ser comparables entre los dos métodos de monitoreo debido a las diferencias en el diseño y enfoque, se espera que esta variable también muestre mejoras significativas en el tiempo. Esta proyección se fundamenta en la comprensión de los procesos ecológicos y las dinámicas poblacionales, así como en la participación de pescadores locales en la implementación de medidas de protección y gestión adecuadas para la conservación de este ecosistema marino.

Este trabajo resume los hallazgos clave de los esfuerzos de monitoreo realizados en la ZRP de Celestún en 2023, proporcionando una visión general de la situación actual y las perspectivas futuras para la gestión y conservación de esta importante área protegida.

## Índice

Resumen Ejecutivo .....	3
Introducción .....	8
Metodología .....	9
Monitoreos biológicos.....	9
Monitoreo académico .....	9
Diseño del monitoreo.....	9
Técnica de monitoreo .....	11
Monitoreo institucional.....	11
Diseño del monitoreo.....	11
Técnica de monitoreo.....	13
Estimación de indicadores ecológicos para especies de importancia comercial .....	14
Estimación del índice de riqueza (S) y curva de rarefacción .....	14
Estimación de la biomasa.....	15
Biomasa total por especie por zona .....	15
Biomasa total por especie .....	16
Biomasa total por zona.....	16
Análisis estadístico del indicador de biomasa .....	16
Índice de diversidad de Shannon-Weaver.....	17
Análisis estadístico del índice de Shannon-Weaver .....	17
Estimación del número de invertebrados .....	18
Tipo de fondo .....	18
Resultados .....	18
Riqueza (curva de acumulación de especies): monitoreo académico e institucional .....	19
Biomasa (monitoreo académico) .....	21
Biomasa total por especie por zona .....	21
Biomasa total por especie .....	23
Biomasa total por zona.....	25
Biomasa (monitoreo institucional).....	26
Biomasa total por especie por zona .....	26
Biomasa total por especie .....	28
Biomasa total por zona.....	30

Índice de diversidad de Shannon-Weaver (monitoreo académico) .....	31
Análisis entre las diferentes zonas principales (SR y SC) .....	31
Análisis del índice de diversidad entre los SR y SC .....	33
Índice de diversidad de Shannon-Weaver (monitoreo institucional).....	34
Análisis entre las diferentes zonas principales para SR .....	34
Invertebrados .....	36
Registro total de invertebrados por especie .....	36
Tipo de fondo .....	37
Conclusiones .....	39
Referencias .....	40
Anexos .....	41
Coordenadas monitoreo académico .....	41
Coordenadas monitoreo institucional.....	42
Evidencia fotográfica .....	43

## Índice de figuras

Figura 1. Delimitación geográfica de la Zona de Refugio Pesquero de Celestún. ....	9
Figura 2. Diseño del monitoreo académico en la ZRP de Celestún. ....	10
Figura 3. Transecto de banda lineal empleado en el monitoreo académico. ....	11
Figura 4. Diseño del monitoreo institucional en la ZRP de Celestún. ....	12
Figura 5. Transecto de banda lineal en el monitoreo institucional. ....	13
Figura 6. Técnica de buceo errante empleada en el monitoreo institucional. ....	14
Figura 7. Curva de acumulación de especies para la zona dentro del refugio. (Monitoreo académico = 15 puntos de muestreo; Monitoreo institucional = 12 puntos de muestreo, Extrapolación a 25 puntos de muestreo, IC = 95%). ....	20
Figura 8. Curva de acumulación de especies para la zona dentro del refugio. (Monitoreo académico = 9 puntos de muestreo; Monitoreo institucional = 3 puntos de muestreo, Extrapolación a 15 puntos de muestreo, IC = 95%). ....	21
Figura 9. Distribución de la biomasa total por especie por zona dentro de la ZRP en el monitoreo académico. (DE $\pm$ ). ....	22
Figura 10. Distribución de la biomasa total por especie por zona en la zona control de la ZRP en el monitoreo académico. (DE $\pm$ ). ....	23
Figura 11. Biomasa total por especie para los SR bajo un orden de prioridad comercia en el monitoreo académico. ....	24
Figura 12. Biomasa total por especie para los SC bajo un orden de prioridad comercia en el monitoreo académico. ....	24
Figura 13. Distribución de la biomasa total por zona para los SR en el monitoreo académico. (DE = $\pm$ ). ....	25
Figura 14. Distribución de la biomasa total por zona para los SC en el monitoreo académico. (DE = $\pm$ ). ....	26
Figura 15. Distribución de la biomasa total por especie por zona dentro de la ZRP en el monitoreo institucional. (DE $\pm$ ). ....	27
Figura 16. Distribución de la biomasa total por especie por zona en la zona control de la ZRP en el monitoreo institucional. (DE $\pm$ ). ....	28
Figura 17. Biomasa total por especie para los SR bajo un orden de prioridad comercia en el monitoreo institucional. ....	29
Figura 18. Biomasa total por especie para los SC bajo un orden de prioridad comercia en el monitoreo institucional. ....	29
Figura 19. Distribución de la biomasa total por zona para los SR en el monitoreo institucional. (DE = $\pm$ ). ....	30
Figura 20. Distribución de la biomasa total por zona para los SC en el monitoreo institucional. (DE = $\pm$ ). ....	31

Figura 21. Comparación del índice de diversidad de Shannon-Weaver por zona para los SR en el monitoreo académico. (diversidad baja < 2; diversidad media 2 a 3; diversidad alta > 3). .....	32
Figura 22. Comparación del índice de diversidad de Shannon-Weaver por zona para los SC en el monitoreo académico. (diversidad baja < 2; diversidad media 2 a 3; diversidad alta > 3). .....	33
Figura 23. Comparación del índice de Shannon-Weaver entre los SR y SC en el monitoreo académico. (diversidad baja < 2; diversidad media 2 a 3; diversidad alta > 3). .....	34
Figura 24. Comparación del índice de diversidad de Shannon-Weaver por zona para los SR en el monitoreo institucional. (diversidad baja < 2; diversidad media 2 a 3; diversidad alta > 3).....	35
Figura 25. Comparación del índice de Shannon-Weaver entre los SR y SC en el monitoreo institucional. (diversidad baja < 2; diversidad media 2 a 3; diversidad alta > 3).....	36
Figura 26. Número de invertebrados por hectárea para los SR bajo un orden de prioridad comercial. ....	37
Figura 27. Número de invertebrados por hectárea para los SC bajo un orden de prioridad comercial. ....	37
Figura 28. Distribución del tipo de fondo marino entre las diferentes zonas principales de la ZRP. 38	
Figura 29. Observación de langostas espinosa dentro de la ZRP.....	43
Figura 30. Observación de tiburón gata dentro de la ZRP. ....	43
Figura 31. Grupo de monitoreo institucional y pescadores de la localidad de Celestún. ....	44
Figura 32. Planeación y diseño del monitoreo académico.....	44
Figura 33. Presentación de resultados del monitoreo académico al grupo de la ZRP de Celestún. .	45
Figura 34. Presentación de resultados del monitoreo académico al grupo de la ZRP de Celestún. .	45
Figura 35. observación de pargo mulato dentro de la ZRP.....	46
Figura 36. observación de pepino de mar peluche dentro de la ZRP. ....	46

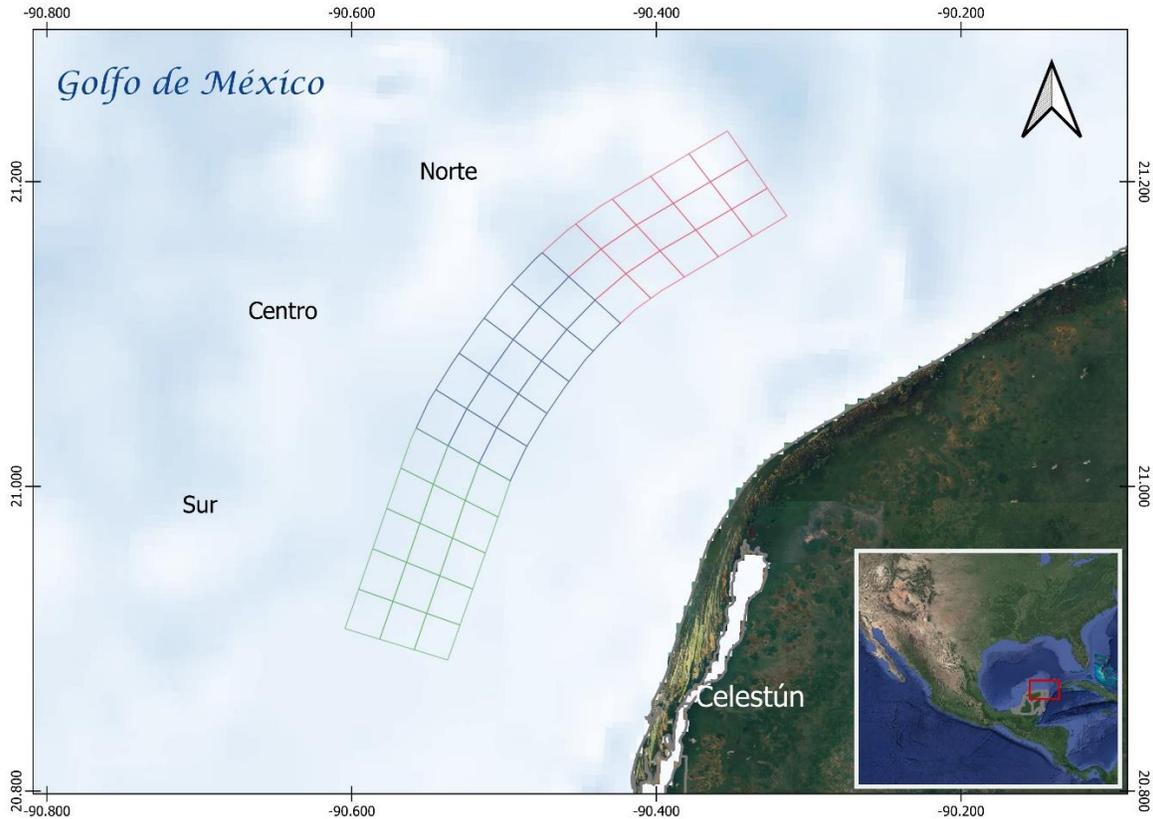
## Introducción

El 2 de octubre de 2019, se oficializó la creación de la Zona de Refugio Pesquero (ZRP)<sup>1</sup> de Celestún a través del Diario Oficial de la Federación. Esta iniciativa fue impulsada por la Federación de Cooperativas Pesqueras, Acuícolas y de Servicios Turísticos de Celestún S.C. de R.L. de C.V. La ZRP, representada en la **Figura 1**. Se estableció en una modalidad parcial según lo estipulado en el (DOF, 2014). Bajo esta modalidad, se autorizan ciertas actividades comerciales, como la pesca de pulpo durante la temporada de pesca y utilizando el arte de pesca conocido como "*gareteo*", así como la pesca de sierra y carito mediante la técnica de "*troleo*". Además, se permiten actividades turísticas, como el buceo, con la condición de que no impliquen extracción de recursos.

La Zona de Refugio Pesquero (ZRP) está ubicada frente a la localidad de Celestún, Yucatán, aproximadamente a 8 millas náuticas desde la costa hacia el vértice más cercano. Con unas dimensiones de 4 millas náuticas de ancho y 22 millas náuticas de largo, la ZRP abarca una extensión de 32,400 hectáreas (**Figura 1**). Su principal objetivo es la recuperación de las poblaciones de las principales especies de importancia comercial, entre las que se incluyen el pepino de mar (*Isostichopus badionotus*), el pulpo rojo (*Octopus maya*), el mero rojo (*Epinephelus morio*) y la langosta espinosa (*Panulirus argus*).

---

<sup>1</sup> "Las Zonas de Refugio Pesquero son áreas delimitadas de jurisdicción federal, con el propósito primordial de conservar y contribuir, de manera natural, al desarrollo de los recursos pesqueros por su reproducción, crecimiento o reclutamiento, así como preservar y proteger el medio ambiente que las rodea" (DOF, 2014).



***Figura 1. Delimitación geográfica de la Zona de Refugio Pesquero de Celestún.***

## **Metodología**

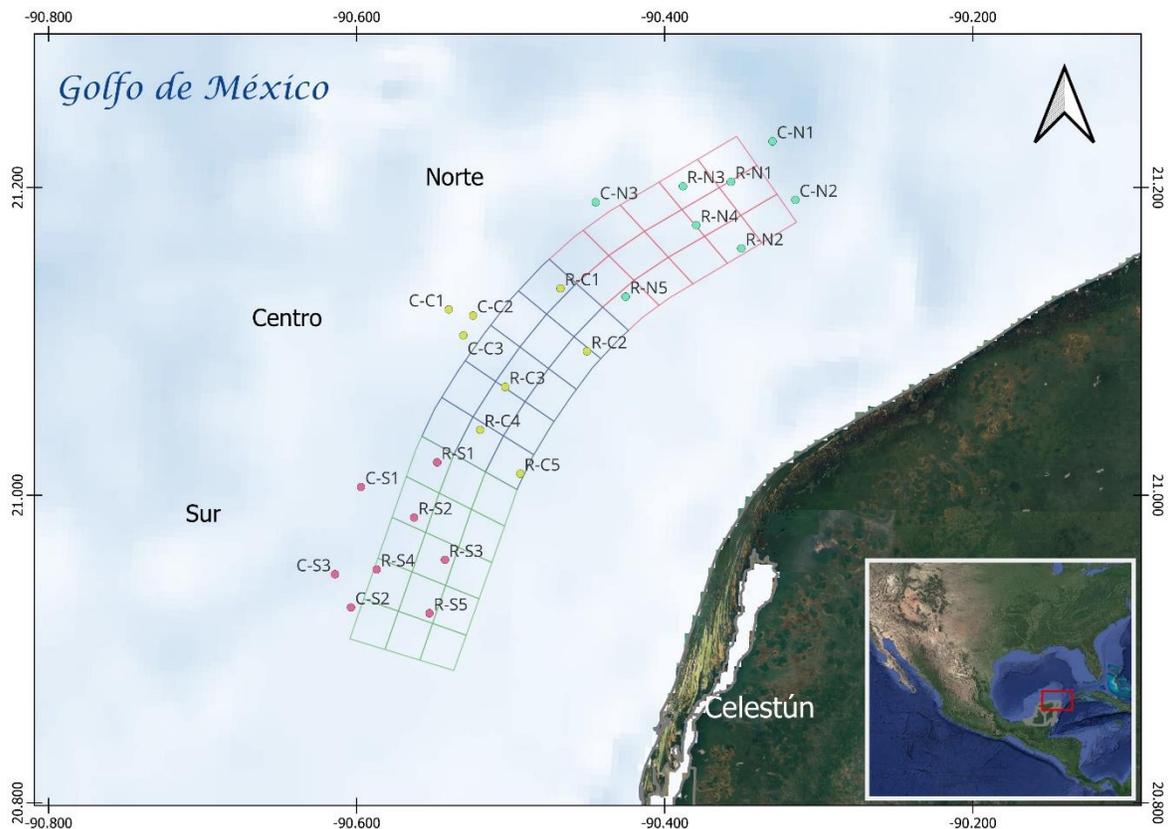
### Monitoreos biológicos

Con el propósito de evaluar los principales indicadores ecológicos (riqueza, biomasa, diversidad) de la Zona de Refugio Pesquero (ZRP), se llevaron a cabo dos monitoreos en el transcurso del año 2023. El primero (*monitoreo académico*) tuvo lugar del 8 al 10 de agosto de 2023 y fue coordinado por la Universidad Marista de Mérida, con el respaldo de la Rufford Foundation, como parte del proyecto "*Assessment of biological and socioeconomic effects in a Fishery Refuge Zone in Yucatan, Mexico*". Por otro lado, el segundo monitoreo (*monitoreo institucional*) se realizó del 29 de septiembre al 2 de octubre de 2023, siendo diseñado y coordinado por el Instituto Mexicano de Investigación en Pesca y Acuicultura (IMIPAS), en colaboración con Comunidad y Biodiversidad A. C. (COBI). Los detalles acerca del diseño y las técnicas empleadas en cada monitoreo se presentan a continuación.

### Monitoreo académico

#### Diseño del monitoreo

El diseño del monitoreo implicó la división del polígono de la Zona de Refugio Pesquero (ZRP) en tres zonas principales: Norte, Centro y Sur. Cada una de estas regiones fue subdividida en 15 celdas, dando un total de 45 celdas en toda la extensión del polígono. Se establecieron 5 puntos de monitoreo dentro de cada zona principal del refugio, designados como "sitios refugio" (SR). Además, se seleccionaron 3 sitios en la zona adyacente al refugio para cada zona principal, los cuales fueron identificados como "sitios control" (SC). Los detalles de esta disposición se muestran en la **Figura 2**.



*Figura 2. Diseño del monitoreo académico en la ZRP de Celestún.*

Los puntos incluidos en el censo del monitoreo fueron seleccionados mediante un muestreo dirigido (Rolim et al., 2019; Amador-Castro et al., 2021). Esta metodología tuvo en cuenta el conocimiento empírico de los pescadores locales, quienes identificaron sitios con potencial biológico, como áreas de agregación de especies objetivo y/o asociadas.

Asimismo, siguiendo el enfoque de (da Silva et al., 2015), se garantizó que tanto los sitios dentro del refugio como los sitios control compartieran características topográficas similares, con el fin de facilitar las comparaciones entre ellos. Esto resultó en un total de 24 sitios evaluados, con 15

ubicados dentro del polígono de la Zona de Refugio Pesquero (ZRP) y 9 en las zonas adyacentes al polígono.

#### Técnica de monitoreo

Se empleó la técnica de transecto de banda, basada en el protocolo de monitoreo para reservas marinas propuesto por Hernández-Velasco et al. (2018). Esta metodología implicó el despliegue de un transecto lineal de banda con una longitud de 30 m para cada sitio de muestreo. Durante el registro, se contabilizaron los peces observados en un área de 2 m de ancho, comprendida entre el fondo marino y una altura de 2 m sobre este, abarcando la columna de agua (**Figura 3**). Además de los peces, se registraron otros organismos de importancia ecológica e invertebrados, así como especies bentónicas comerciales presentes en los transectos.



Figura 3. Transecto de banda lineal empleado en el monitoreo académico.

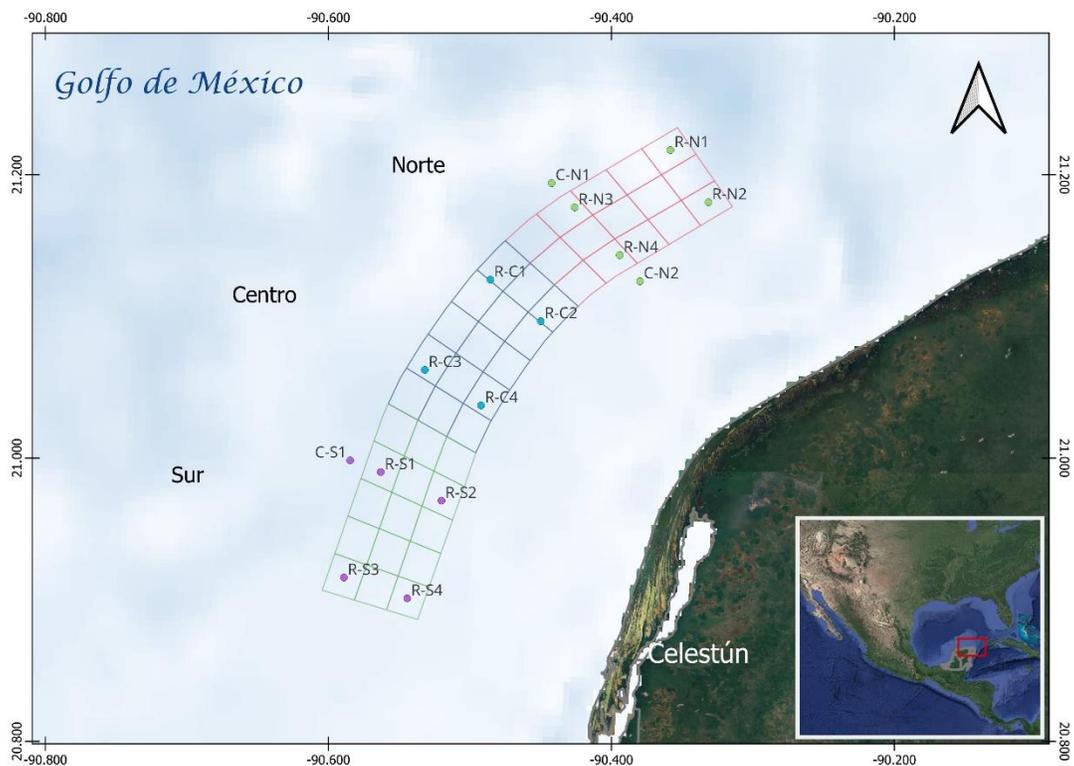
#### Monitoreo institucional

#### Diseño del monitoreo

El diseño del monitoreo institucional, desarrollado por IMIPAS y COBI, contó con la colaboración de una variedad de instituciones, tanto gubernamentales como académicas y organizaciones no gubernamentales (ONG). Entre estas instituciones se incluyen la Secretaría de Pesca y Acuicultura Sustentables de Yucatán (SEPASY), la Alianza Kanan Kay, la Universidad Marista de Mérida y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), así como el apoyo del comité de manejo de la ZRP de Celestún.

En contraste con el enfoque de muestreo dirigido utilizado en el monitoreo académico, el monitoreo institucional adoptó un diseño sistemático, con enfoque de muestreo aleatorio, el cual se basa en el supuesto de una distribución homogénea (Hernández-Sampieri et al., 2014).

En el diseño de este monitoreo se aseguró una representatividad en todo el polígono, examinando las tres zonas principales mencionadas previamente en el muestreo académico (Norte, Centro y Sur). Se establecieron 4 puntos de monitoreo dentro de cada una de las zonas principales del refugio, manteniendo la misma nomenclatura (SR). Además, se seleccionaron 3 puntos en la zona adyacente, de los cuales 2 se ubicaron en la zona Norte y uno en la zona Sur, designados como sitios control (SC) (Figura 4).



*Figura 4. Diseño del monitoreo institucional en la ZRP de Celestún.*

Esto resultó en un total de 15 sitios evaluados, con 12 ubicados dentro del polígono de la ZRP y 3 en las zonas adyacentes al mismo.

#### Técnica de monitoreo

De igual manera, se empleó la técnica de transecto de banda, basada en el protocolo de monitoreo para reservas marinas propuesto por Hernández-Velasco et al. (2018). Esta metodología consistió en el despliegue de 4 transectos lineales de banda, cada uno con una longitud de 50 m, en cada sitio de muestreo. En cada sitio, dos parejas de buzos llevaron a cabo el muestreo en el punto exacto designado, mientras que las otras dos parejas de buzos realizaron el muestreo a una distancia aproximada de entre 800 m y 1 km del punto exacto. Durante el registro, se contabilizaron los peces observados en un área de 2 m de ancho, comprendida entre el fondo marino y una altura de 2 m sobre este, abarcando la columna de agua (**Figura 5**). Además de los peces, se registraron otros organismos de importancia ecológica e invertebrados, así como especies bentónicas comerciales presentes en los transectos.



*Figura 5. Transecto de banda lineal en el monitoreo institucional.*

Además, como complemento en cada sitio de muestreo, se aplicó la técnica de buceo errante. Esta metodología implica el registro de especies comerciales menos frecuentes. Bajo este enfoque, el buzo nada libremente durante 30 minutos, permitiendo el registro de diversas especies de peces e invertebrados comerciales (**Figura 6**).



Figura 6. Técnica de buceo errante empleada en el monitoreo institucional.

Finalmente, se realizó el registro del tipo de fondo submarino. Durante cada transecto, un buzo llevó a cabo un registro de la cobertura del fondo, anotando el tipo de sustrato presente cada 50 cm a lo largo de todo el transecto.

#### Estimación de indicadores ecológicos para especies de importancia comercial

Se llevó a cabo la evaluación de diversos indicadores ecológicos, incluyendo el índice de riqueza, la estimación de la biomasa y el índice de diversidad de Shannon-Weaver, los cuales consideraron exclusivamente especies de importancia comercial. La metodología empleada para calcular cada uno de estos indicadores fue idéntica tanto en el monitoreo académico como en el institucional. A continuación, se detalla el procedimiento utilizado para calcular estos indicadores.

#### Estimación del índice de riqueza (S) y curva de rarefacción

Se calculó el índice de riqueza y la curva de rarefacción para las especies de peces comerciales y algunas especies de importancia ecológica como indicador de salud del ecosistema utilizando la paquetería “vegan” de la plataforma RStudio. Los datos de abundancia de especies se organizaron en una matriz, donde las filas representaban las diferentes ubicaciones o puntos de muestreo (SR y SC), y las columnas representaban las distintas especies comerciales con sus respectivas abundancias.

El índice de riqueza representó el conteo del número total de especies únicas presentes en cada muestreo. Los resultados se expresaron como un vector donde cada elemento representaba la riqueza de especies para una ubicación específica, incluyendo tanto los SR y SC.

La curva de rarefacción calculó la riqueza de especies esperada para diferentes tamaños de muestra mediante muestreo aleatorio sin reemplazo. La curva de rarefacción muestra cómo la riqueza de especies estimada cambia a medida que se incrementa el tamaño de la muestra.

El intervalo de confianza (CI) alrededor de la curva de rarefacción se estimó utilizando el método de “**bootstrapping**”. Se realizaron muestreos repetidos de las muestras originales con reemplazo para obtener múltiples estimaciones de riqueza de especies para cada tamaño de muestra. A partir de estas estimaciones, se calcularon los intervalos de confianza al 95%.

Prontamente, se realizó una extrapolación de la curva de rarefacción y del CI a partir de 25 muestreos para los sitios refugio (SR) y 15 muestreos para los sitios control (SC), tanto en el monitoreo académico como en el institucional. Esto se basó en el número de muestreos realizados para cada tipo de monitoreo: 15 muestreos en SR y 9 muestreos en SC para el monitoreo académico, y 12 muestreos en SR y 3 muestreos en SC para el monitoreo institucional.

Esta extrapolación posibilitó la estimación de la riqueza de especies esperada utilizando un tamaño de muestra común para ambas áreas en cada monitoreo. Esto facilitó una comparación más precisa y equitativa entre los puntos de monitoreo de sitios refugio (SR) y sitios control (SC). Es importante destacar que esta estimación del indicador permitió una comparación entre ambos monitores en función del esfuerzo de muestreo realizado en cada uno de ellos.

#### Estimación de la biomasa

La biomasa individual de las diferentes especies de peces comerciales y algunas especies de importancia ecológica registrados en SR y SC se calculó mediante la conversión alométrica longitud peso:

$$W = aLT^b$$

donde  $a$  y  $b$  son constantes específicas de la especie,  $LT$  es la longitud total en cm y  $W$  es el peso en gramos (g). Los parámetros de ajuste longitud-peso fueron obtenidos a través de FishBase.

#### Biomasa total por especie por zona

Para calcular la biomasa total por especie por zona para los SR y SC, se sumaron los valores de biomasa de cada especie. Estos valores se dividieron por el área de muestro para obtener la biomasa en (g/m<sup>2</sup>). La función se expresa de la siguiente manera:

$$B(g/m^2) = \frac{\text{Biomasa total por especie por zona}}{\text{área}^2}$$

En ambos casos se calculó la desviación estándar de la biomasa por especie por zona con la intención de observar la variabilidad de la biomasa entre las especies presentes en cada zona.

#### Biomasa total por especie

Para calcular la biomasa total por especie para los SR y SC, se sumaron los valores de biomasa de cada especie. Estos valores se dividieron por el área de muestro total para obtener la biomasa en (g/m<sup>2</sup>). La función se expresa de la siguiente manera:

$$B(g/m^2) = \frac{\text{Biomasa total por especie}}{\text{área}^2}$$

En ambos casos se le asignó un nivel de prioridad comercial (1 a 3) a cada especie, basándose en listado de especies comerciales realizado por el IMIPAS en la elaboración de la propuesta para el establecimiento de la ZRP). Siendo del nivel 1 aquellas especies consideradas prioritarias para su conservación con base en su valor comercial, ecológico y cultural.

#### Biomasa total por zona

Para calcular la biomasa total por especie para los SR y SC, se sumaron los valores de biomasa total por cada especie presente en cada zona. Estos valores se dividieron por el área de muestro para obtener la biomasa en (g/m<sup>2</sup>). La función se expresa de la siguiente manera:

$$B(g/m^2) = \frac{\text{Biomasa total por zona}}{\text{área}^2}$$

#### Análisis estadístico del indicador de biomasa

Para evaluar posibles diferencias significativas en la biomasa entre las distintas zonas (Norte, Centro y Sur), así como entre los sitios refugio (SR) y control (SC), se realizaron pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk. Estas pruebas se utilizaron para verificar si los datos seguían una distribución normal. Una vez establecida la normalidad de los datos, se aplicaron pruebas paramétricas para la comparación de medias en la biomasa. En caso de que los datos no cumplieran con los supuestos de normalidad, se recurrió a pruebas no paramétricas.

Posteriormente, en caso de que se observaran diferencias significativas entre las zonas principales, se procedió a realizar un análisis post hoc de Tukey con el fin de identificar los grupos específicos que mostraban variaciones significativas en términos de biomasa. Esta prueba se aplicó para una comprensión más detallada y precisa de las discrepancias entre los grupos, permitiendo una interpretación exhaustiva de los resultados obtenidos.

En cuanto a la evaluación de posibles diferencias significativas en la biomasa entre las zonas (Norte y Sur) del monitoreo institucional para los sitios control (SC), no fue factible debido a que no se cumplieron los requisitos de normalidad de la distribución de datos. Esto se debe a que la muestra solo consta de 2 observaciones, insuficientes para aplicar la prueba de normalidad Shapiro-Wilk, la cual requiere un mínimo de 3 observaciones para su realización.

#### Índice de diversidad de Shannon-Weaver

Se llevó a cabo el análisis de diversidad de las diferentes zonas (Norte, Centro y Sur) en los SR y SC. Para ello, se calculó el índice de diversidad de Shannon-Weaver para cada muestra. El índice de Shannon se basa en la abundancia y la diversidad de las especies y se calculó a través de la siguiente función:

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i$$

donde  $S$  es el número total de especies presentes en la comunidad y  $p_i$  es la proporción de individuos de la especie  $i$  con respecto al total de la comunidad.

#### Análisis estadístico del índice de Shannon-Weaver

Para evaluar si existían diferencias significativas en la diversidad de Shannon entre las diferentes zonas y entre los SR y SC, se realizaron pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk para cada zona. Si los datos seguían una distribución normal, se realizaron pruebas paramétricas para comparar las medias de los valores de Shannon. En el caso de que los datos no cumplieran con los supuestos de normalidad, se aplicaron pruebas no paramétricas.

En cuanto a la evaluación de posibles diferencias significativas en el índice de Shannon-Weaver entre las zonas (Norte y Sur) del monitoreo institucional para los sitios control (SC), no fue factible debido a que no se cumplieron los requisitos de normalidad de la distribución de datos. Esto se debe a que la muestra solo consta de 2 observaciones, insuficientes para aplicar la prueba de normalidad Shapiro-Wilk, la cual requiere un mínimo de 3 observaciones para su realización.

### Estimación del número de invertebrados

En este caso particular, se pudo incluir el conteo de invertebrados en ambos monitoreos (académico e institucional). Dado el corto intervalo de tiempo entre un monitoreo y otro, se supuso que la temporalidad no afectaría el registro de las especies de invertebrados observadas en las diferentes zonas principales (Norte, Centro y Sur).

Posteriormente, se calculó la densidad de invertebrados por hectárea (ha) para las diferentes zonas principales dentro del refugio, utilizando la siguiente fórmula:

$$Org/ha = \frac{\text{Número de invertebrados registrados}}{\text{área (m)}^2}$$

Este cálculo no fue realizado para las zonas control, debido a que este monitoreo submarino no evaluó puntos de muestreo en la zona adyacente en la zona Centro de la ZRP. Aunque fue posible un conteo de organismos de invertebrados totales en SC que se describe a continuación.

Finalmente, se realizó una sumatoria de la densidad de organismo por hectárea registrados tanto en los SR como SC (sin contar la zona Centro) para obtener el total de invertebrados tanto en SR como en SC.

### Tipo de fondo

Se llevó a cabo una distribución de frecuencias de los distintos tipos de sustrato registrados en cada zona principal (Norte, Centro y Sur) de la ZRP, mediante el registro del tipo de fondo marino en los diversos transectos.

### **Resultados**

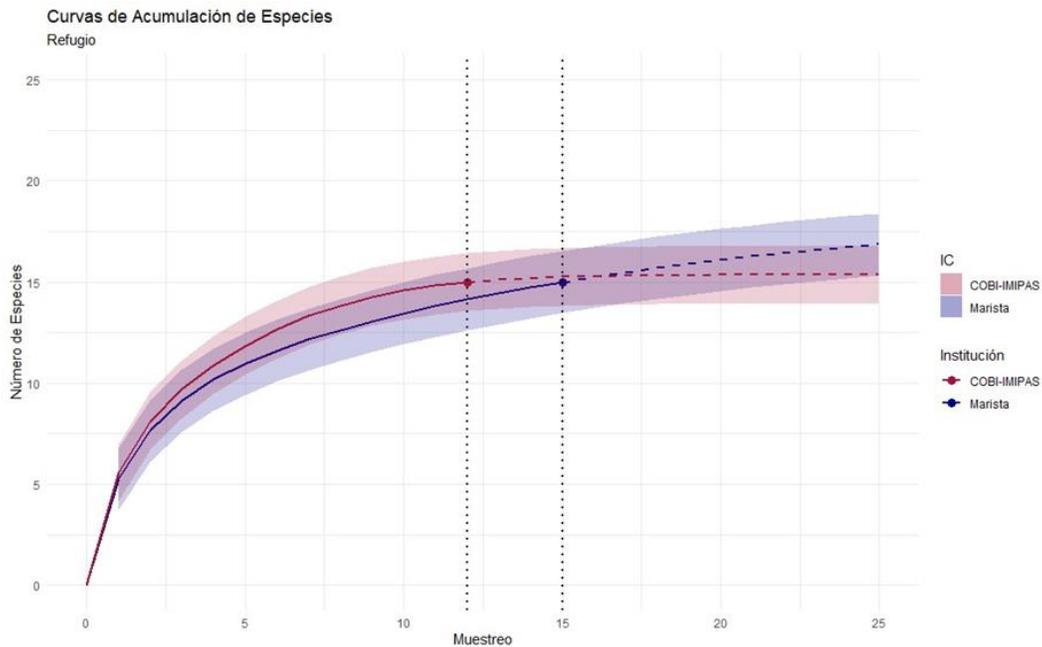
En este apartado se exponen los datos correspondientes a los indicadores ecológicos clave, incluyendo la riqueza, biomasa y diversidad, derivados de dos diferentes tipos de monitoreo submarino: monitoreo académico y monitoreo institucional. Se proyectaba disponer de información recopilada desde la instauración de la Zona de Refugio Pesquero (ZRP) de Celestún en 2019 y a lo largo de su período de vigencia. Sin embargo, debido a circunstancias externas, como la pandemia de COVID-19, no fue factible realizar evaluaciones durante todo el período previsto. No obstante, los resultados obtenidos durante el año 2023 en ambos monitoreos pueden considerarse como una caracterización actual de la ZRP, que podría establecerse como una nueva línea base para futuras comparaciones durante los próximos programas de monitoreo. Esto resulta especialmente relevante en el contexto de una posible renovación de la ZRP, donde se anticipa un mayor crecimiento de los

organismos marinos de valor comercial y un incremento en la diversidad ecológica a lo largo del tiempo.

#### Riqueza (curva de acumulación de especies): monitoreo académico e institucional

Respecto al índice de riqueza, el análisis de las curvas de rarefacción derivadas de dos monitoreos diferentes de peces proporcionó información valiosa sobre la riqueza de especies presentes en ambos monitoreos (académico e institucional). Las curvas de rarefacción permiten comparar de manera efectiva la riqueza de especies entre las dos muestras, controlando las diferencias en el esfuerzo de muestreo. A continuación, se presentan los resultados de las curvas de rarefacción para los dos monitoreos tanto para la zona dentro del refugio como para la zona control.

Con respecto a la zona dentro del refugio el primer monitoreo submarino, realizado bajo los intereses alineados a los objetivos de esta investigación y que fue llevado a cabo por la Universidad Marista, la curva mostró una tendencia ascendente sostenida en la riqueza de especies hasta aproximadamente 15 individuos muestreados, donde se estabiliza progresivamente, indicando que se logró muestrear una parte significativa de la diversidad presente en la comunidad de peces (**Figura 7**). Mientras que el monitoreo diseñado por COBI-IMIPAS presentó una tendencia de incremento constante en la riqueza de especies hasta llegar a su meseta alrededor de 16 individuos muestreados. A partir de este punto, la riqueza se mantuvo relativamente constante (**Figura 7**).



***Figura 7.** Curva de acumulación de especies para la zona dentro del refugio. (Monitoreo académico = 15 puntos de muestreo; Monitoreo institucional = 12 puntos de muestreo, Extrapolación a 25 puntos de muestreo, IC = 95%).*

En general, ambas curvas de rarefacción revelaron tendencias similares en cuanto a la riqueza de especies, aunque el monitoreo institucional mostró una ligera ventaja en términos de riqueza total de especies estimada. Estos resultados sugieren que los dos monitoreos capturan una diversidad significativa de especies de peces en la región de estudio.

En cuanto a la zona control, el monitoreo realizado por la Marista mostró una tendencia sostenida de incremento hasta aproximadamente 12 individuos muestreados, donde comenzó a estabilizarse, indicando una representación significativa de la diversidad de la comunidad de peces (**Figura 8**). Mientras que el monitoreo diseñado por COBI-IMIPAS presentó un patrón similar, a diferencia de la primera curva, esta curva mostró una estabilización más temprana, a partir de aproximadamente 10 individuos muestreados (**Figura 8**).

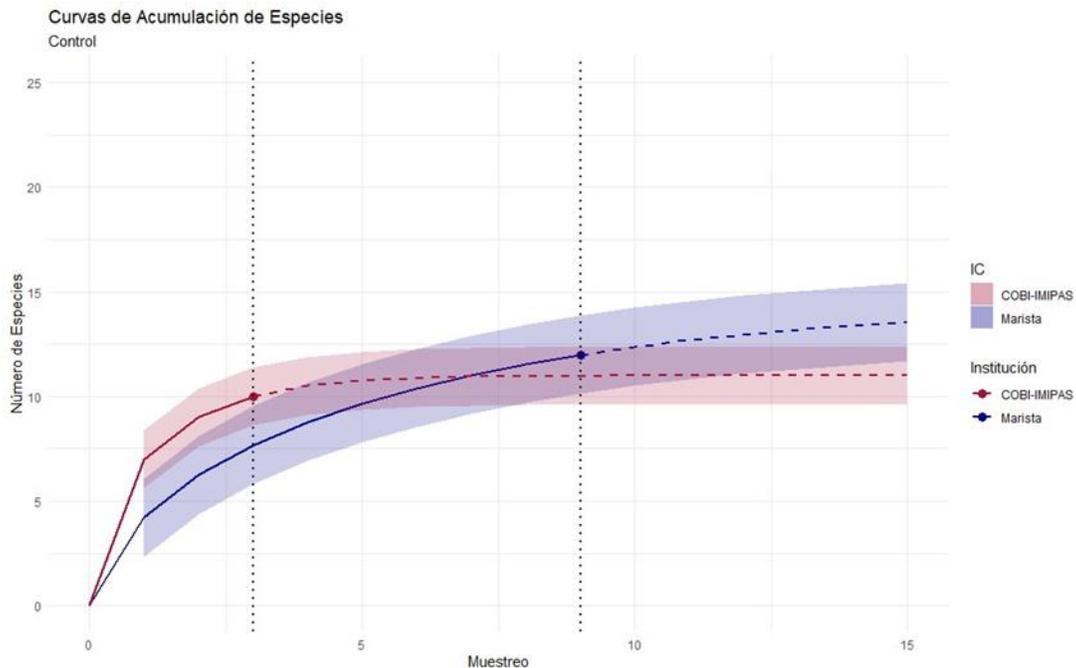


Figura 8. Curva de acumulación de especies para la zona dentro del refugio. (Monitoreo académico = 9 puntos de muestreo; Monitoreo institucional = 3 puntos de muestreo, Extrapolación a 15 puntos de muestreo, IC = 95%).

En contraste, ambas mostraron valores de riqueza de especies estimados más bajos en comparación con la zona dentro del refugio, con 12 especies y 10 especies respectivamente sobre el esfuerzo de muestreo.

Estos resultados sugieren que ambas metodologías capturan distintas representaciones de la diversidad de peces en la región de estudio. Las diferencias observadas pueden estar relacionadas con factores ambientales, geográficos o estacionales, o con variaciones en la estructura de las comunidades de peces entre las áreas muestreadas.

#### Biomasa (monitoreo académico)

##### Biomasa total por especie por zona

El análisis de biomasa total por especie por zona para los SR mostró una alta variabilidad en términos de biomasa entre las distintas zonas. Algunas especies exhibieron una mayor presencia en ciertas zonas. Por ejemplo, el coronado (*S. dumerii*) y la mojarra (*C. calamus*), que tuvieron mayor presencia en la zona Centro (**Figura 9**). Mientras que otras estuvieron más distribuidas uniformemente entre las diferentes zonas. Por ejemplo, el pargo canané (*O. chrysurus*) y el boquinete (*L. maximus*) (**Figura 9**).

Por otro lado, las especies con mayor abundancia en términos de concentración de biomasa entre las diferentes zonas fueron las especies de pargo can canané (*O. chrysurus*) y el boquinete (*L. maximus*) (**Figura 9**).

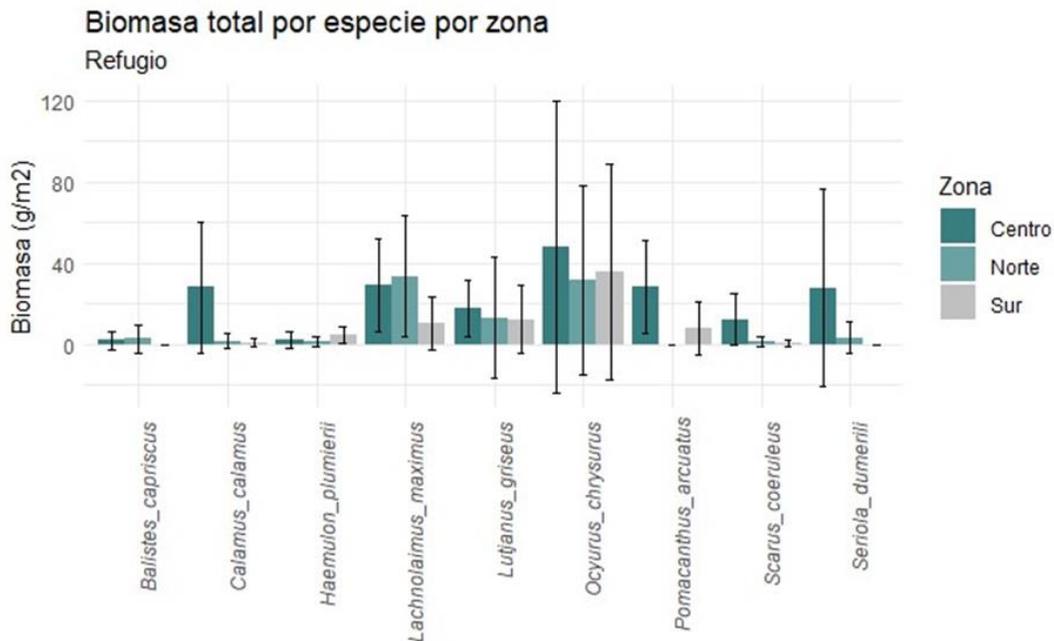


Figura 9. Distribución de la biomasa total por especie por zona dentro de la ZRP en el monitoreo académico. (DE ±).

Mientras que la distribución de biomasa para los SC mostró un patrón de comportamiento similar a los SR, con una alta variabilidad entre las diferentes zonas. De igual manera, algunas especies exhibieron una mayor presencia en ciertas zonas. Por ejemplo, el coronado (*S. dumerii*) en la zona Centro. Mientras que la especie con mayor abundancia y concentración en términos de biomasa fue la especie de boquinete (*L. maximus*) (**Figura 10**).

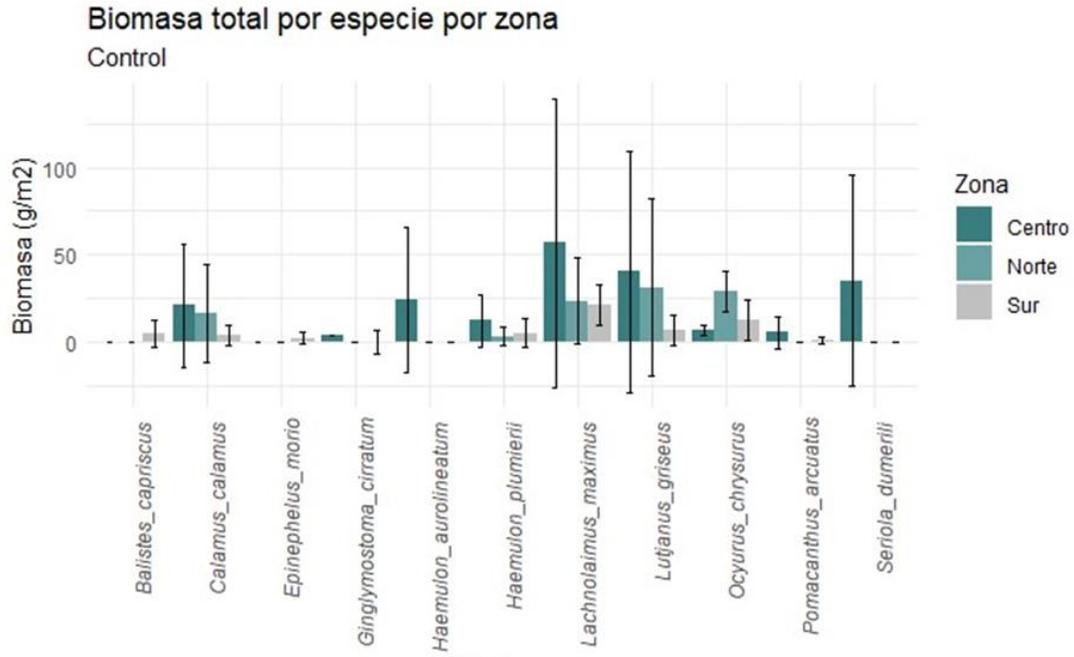


Figura 10. Distribución de la biomasa total por especie por zona en la zona control de la ZRP en el monitoreo académico. (DE ±).

Biomasa total por especie

El análisis de la biomasa total por especie para los SR y SC reveló la distribución de la biomasa de cada especie a lo largo de los distintos sitios muestreados. Estos valores son el producto de la sumatoria de la biomasa total para cada especie distribuidos en el área total muestreada. La especie de mayor prioridad comercial (catalogadas como nivel 1) para los SR es el pargo canané (*O. chrysurus*) con aproximadamente 38 g/m<sup>2</sup> (**Figura 11**). Mientras que, para los SC, la especie de mayor prioridad comercial fue el boquinete (*L. maximus*) con una concentración de biomasa de 34 g/m<sup>2</sup> (**Figura 12**).

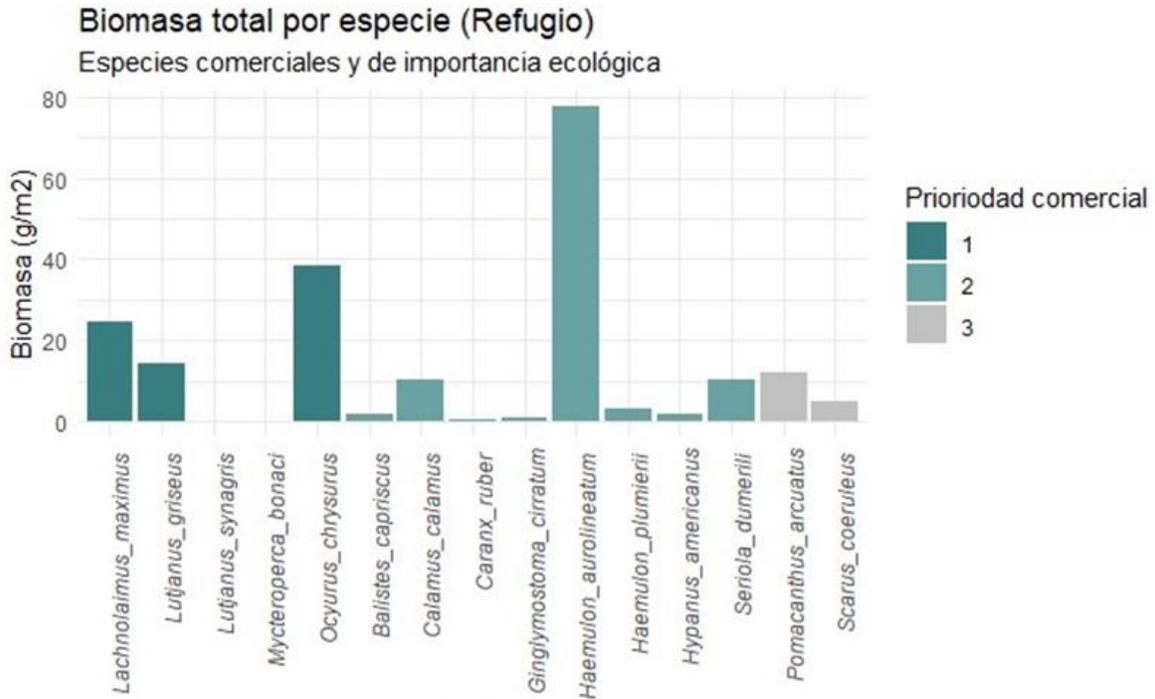


Figura 11. Biomasa total por especie para los SR bajo un orden de prioridad comercial en el monitoreo académico.

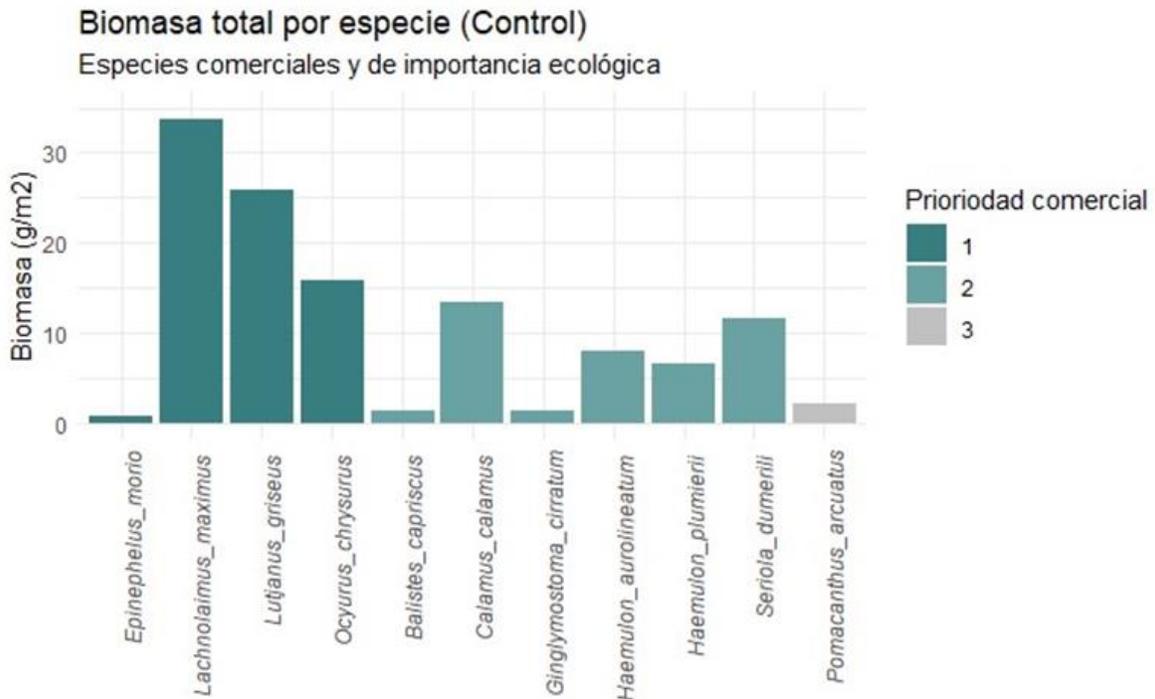


Figura 12. Biomasa total por especie para los SC bajo un orden de prioridad comercial en el monitoreo académico.

Biomasa total por zona

El análisis de biomasa total por zona tanto para los SR como SC mostró una alta variabilidad en la distribución de biomasa, y mayor concentración de biomasa en la zona Centro, tanto en los SR como en los SC con 531 y 200 g/m<sup>2</sup> respectivamente (**Figura 13**; **Figura 14**).

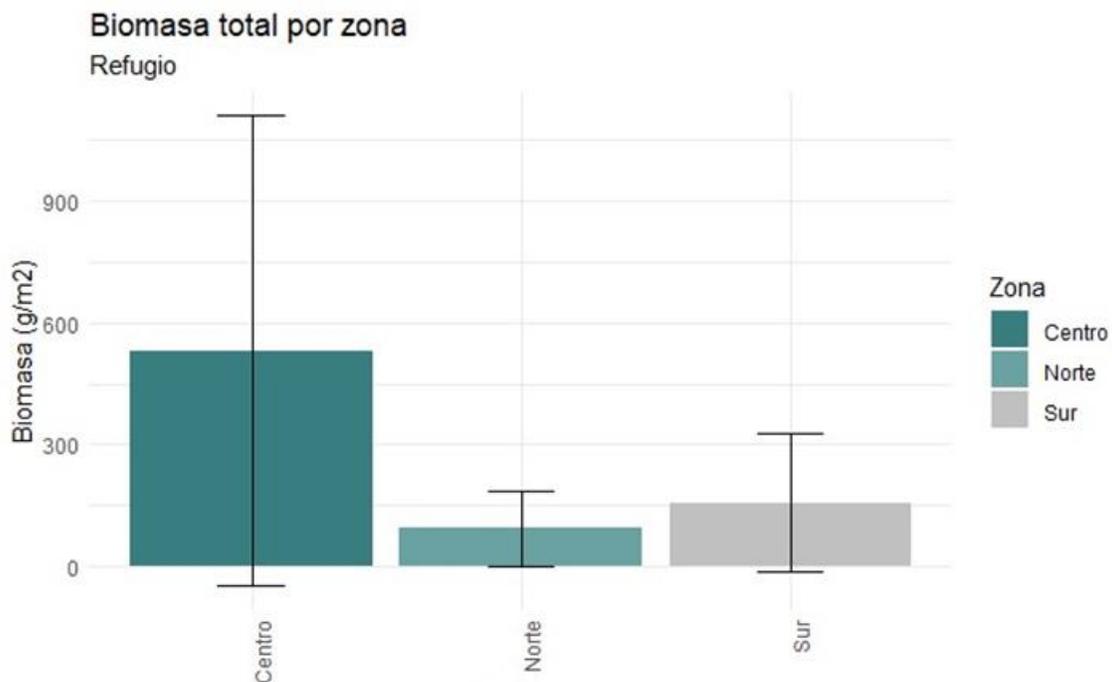
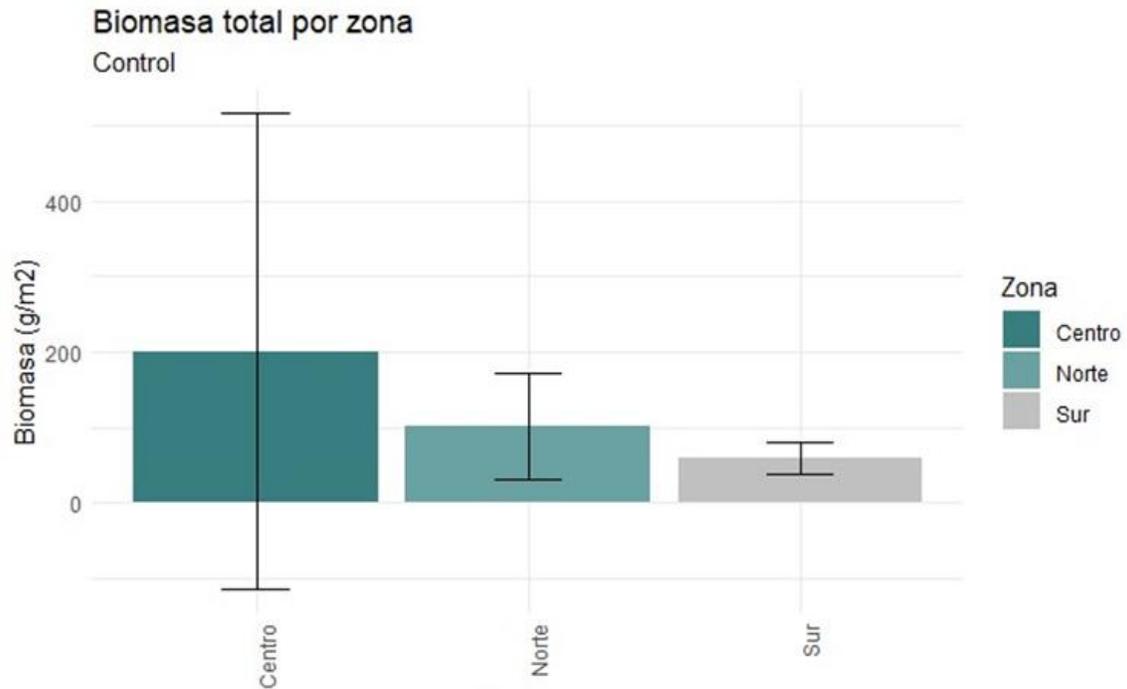


Figura 13. Distribución de la biomasa total por zona para los SR en el monitoreo académico. (DE = ±).



*Figura 14. Distribución de la biomasa total por zona para los SC en el monitoreo académico. (DE =  $\pm$ ).*

Biomasa (monitoreo institucional)

Biomasa total por especie por zona

El análisis de biomasa total por especie por zona para los SR mostró una gran heterogeneidad en términos de biomasa entre las distintas zonas. Algunas de las principales especies de mayor importancia comercial tuvieron mayor presencia en la zona Centro. Por ejemplo, el pargo canané (*O. chrysurus*), el boquinete (*L. maximus*), y el chac-chi (*H. plumierii*), destacándose los dos primeros como las especies con la mayor acumulación de biomasa entre las distintas zonas (**Figura 15**).

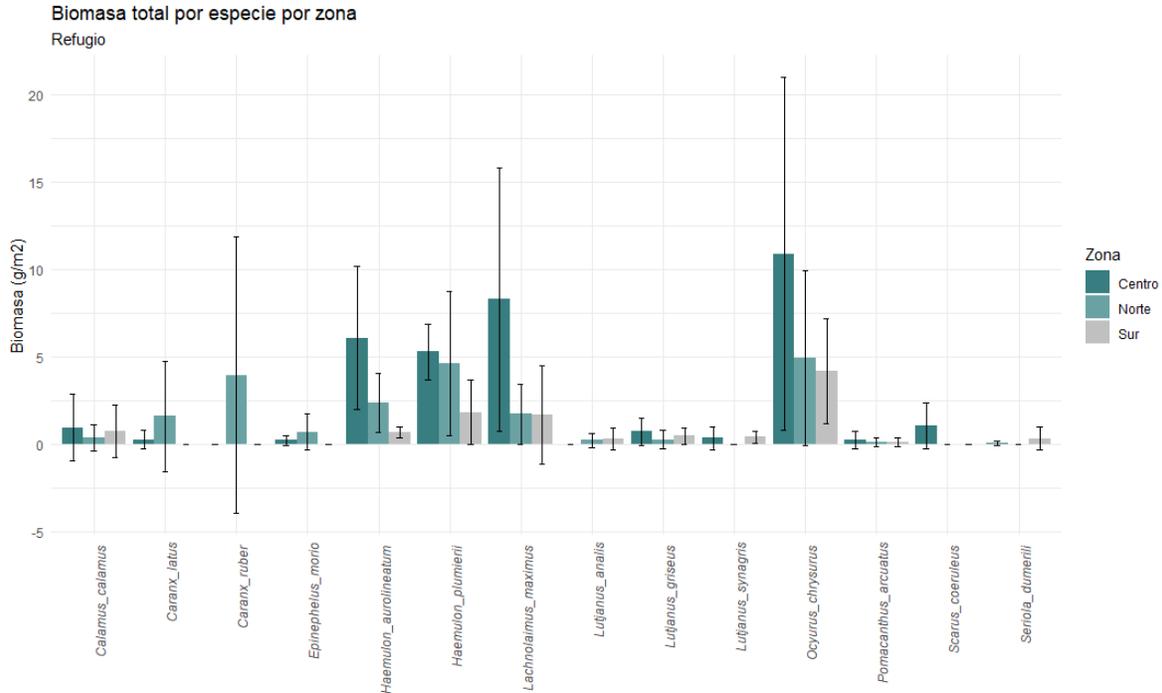


Figura 15. Distribución de la biomasa total por especie por zona dentro de la ZRP en el monitoreo institucional. (DE ±).

Mientras que la distribución de biomasa para los SC solo fue posible evaluar en la zona Norte y Sur y se encontró un patrón de comportamiento similar a los SR, con una alta variabilidad entre la biomasa para las diferentes especies entre ambas zonas. Asimismo, se identificaron ciertas especies con una mayor presencia en zonas específicas. Por ejemplo, el chac-chi (*H. plumierii*) en la zona Sur y el pargo mulato (*L. griseus*) en la zona Norte. Además, se constató que la especie de pargo canané (*O. chrysurus*) destacaba como la de mayor abundancia y concentración de biomasa en términos comerciales en ambas zonas (**Figura 16**).

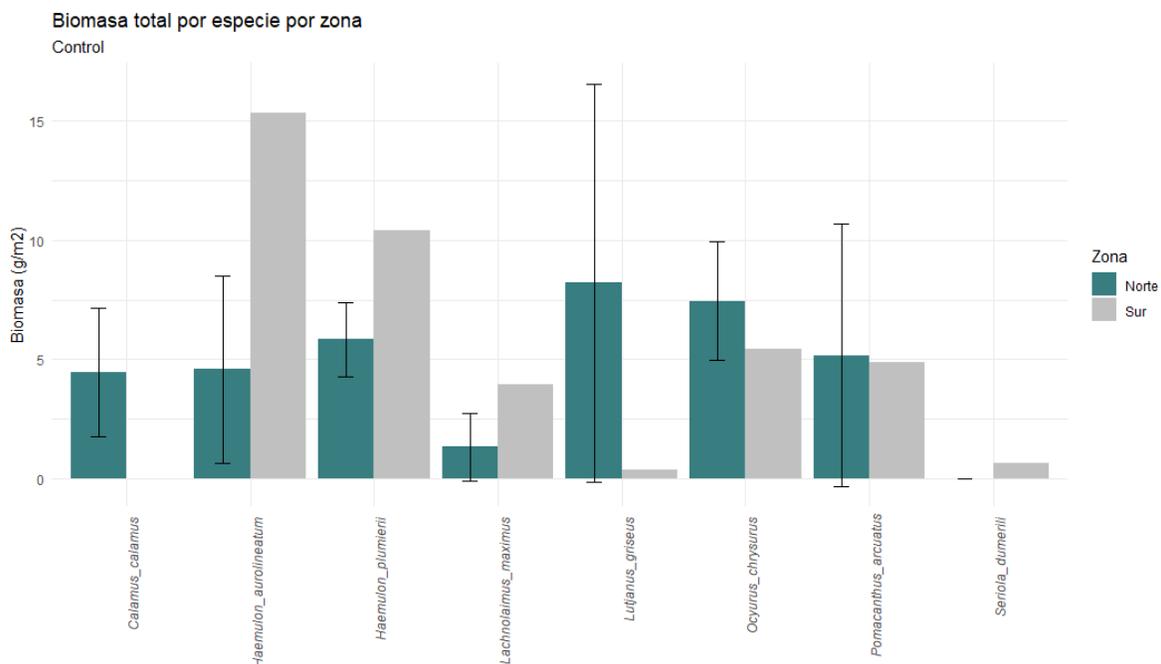
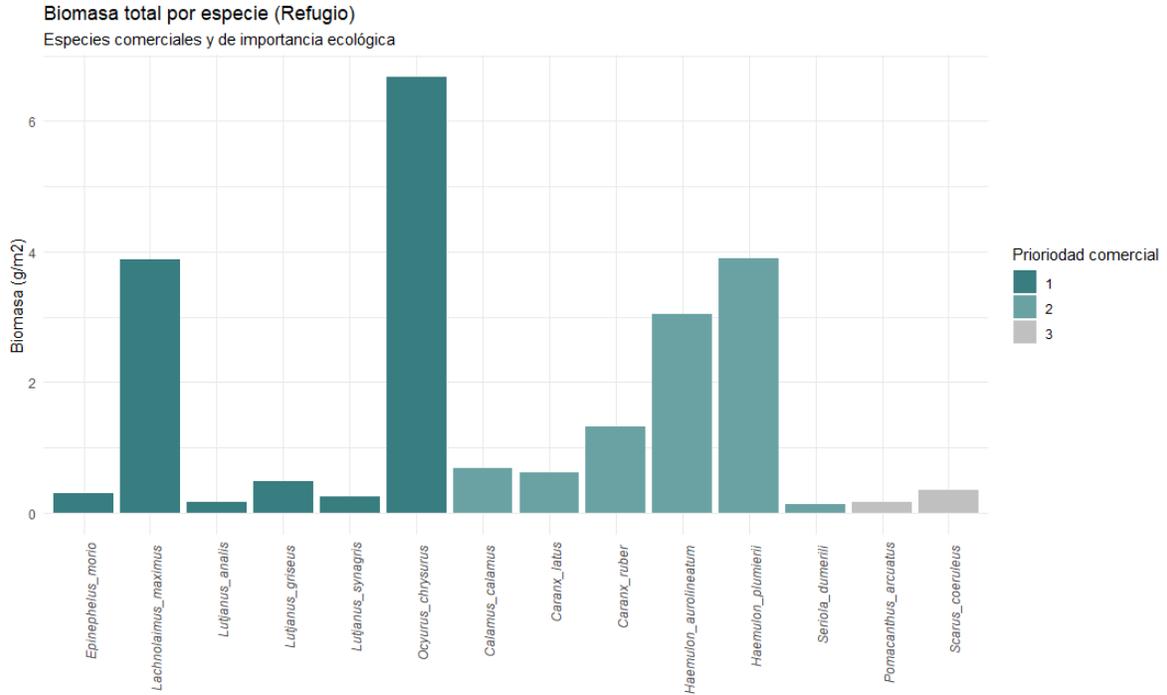


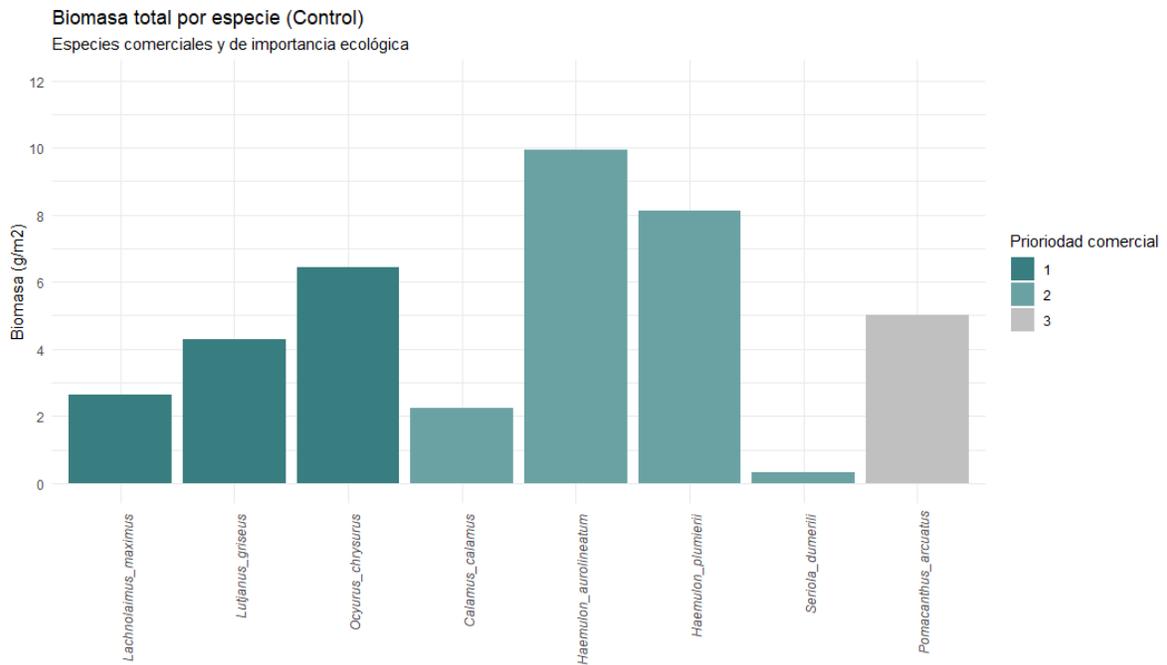
Figura 16. Distribución de la biomasa total por especie por zona en la zona control de la ZRP en el monitoreo institucional. (DE ±).

Biomasa total por especie

El análisis de la biomasa total por especie para los SR y SC reveló la distribución de la biomasa de cada especie a lo largo de los distintos sitios muestreados. Estos valores son el producto de la sumatoria de la biomasa total para cada especie distribuidos en el área total muestreada. La especie de mayor prioridad comercial (catalogadas como nivel 1) para los SR es el pargo canané (*O. chrysurus*) con aproximadamente 6.5 g/m<sup>2</sup> (Figura 17). Mientras que, para los SC, la especie de mayor prioridad comercial de igual manera fue el pargo canané (*O. chrysurus*) con una concentración de biomasa de 6.7 g/m<sup>2</sup> (Figura 18).



**Figura 17. Biomasa total por especie para los SR bajo un orden de prioridad comercial en el monitoreo institucional.**



**Figura 18. Biomasa total por especie para los SC bajo un orden de prioridad comercial en el monitoreo institucional.**

Biomasa total por zona

El análisis de biomasa total por zona mostró una mayor concentración en los SR en la zona Centro, con  $32 \text{ g/m}^2$  y con una alta variabilidad (**Figura 19**). En contraste, en los Sitios de Control (SC), el análisis de las zonas Norte y Sur mostró valores similares en la concentración de biomasa, oscilando entre  $38$  y  $42 \text{ g/m}^2$  aproximadamente (**Figura 20**).

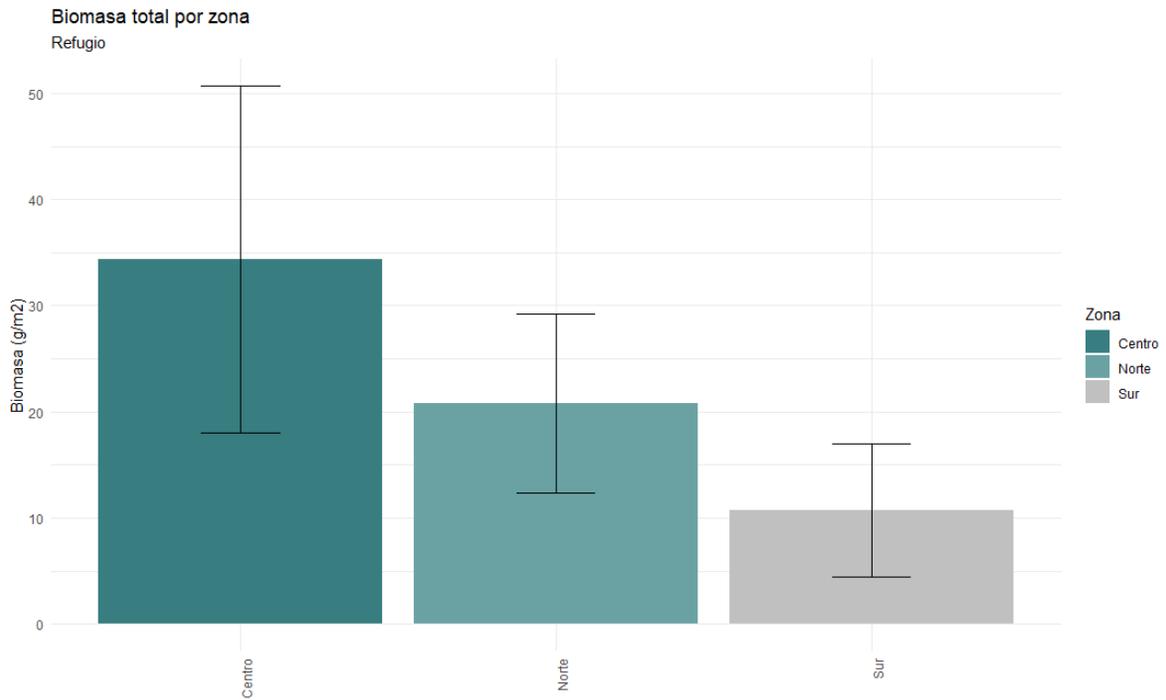
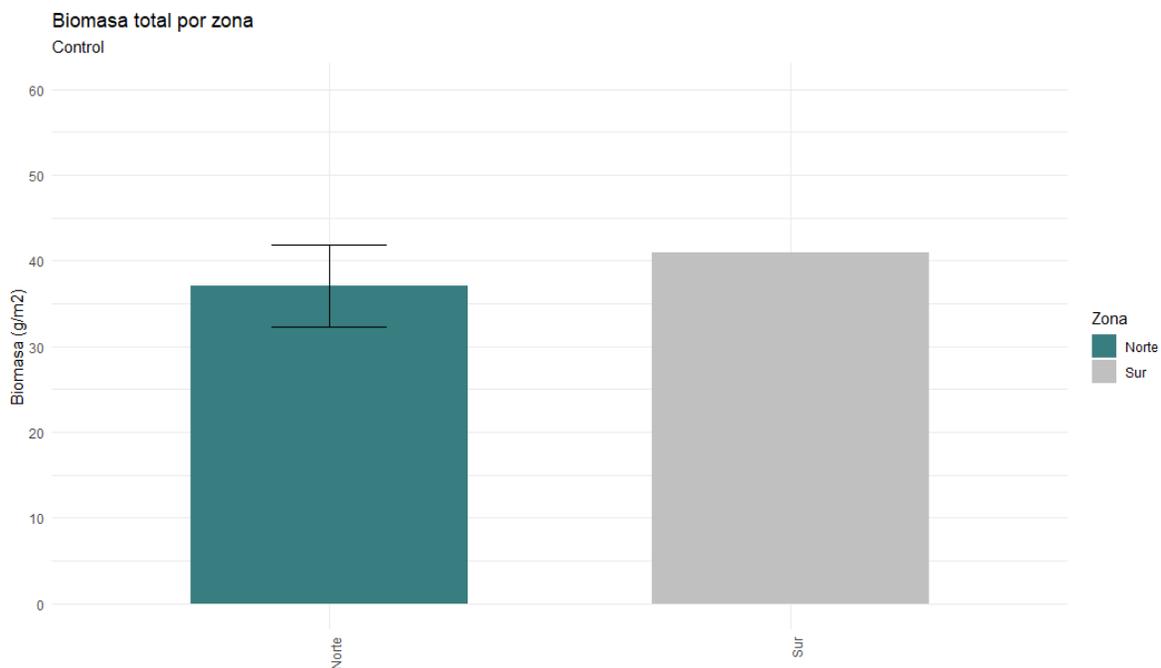


Figura 19. Distribución de la biomasa total por zona para los SR en el monitoreo institucional. (DE=±).



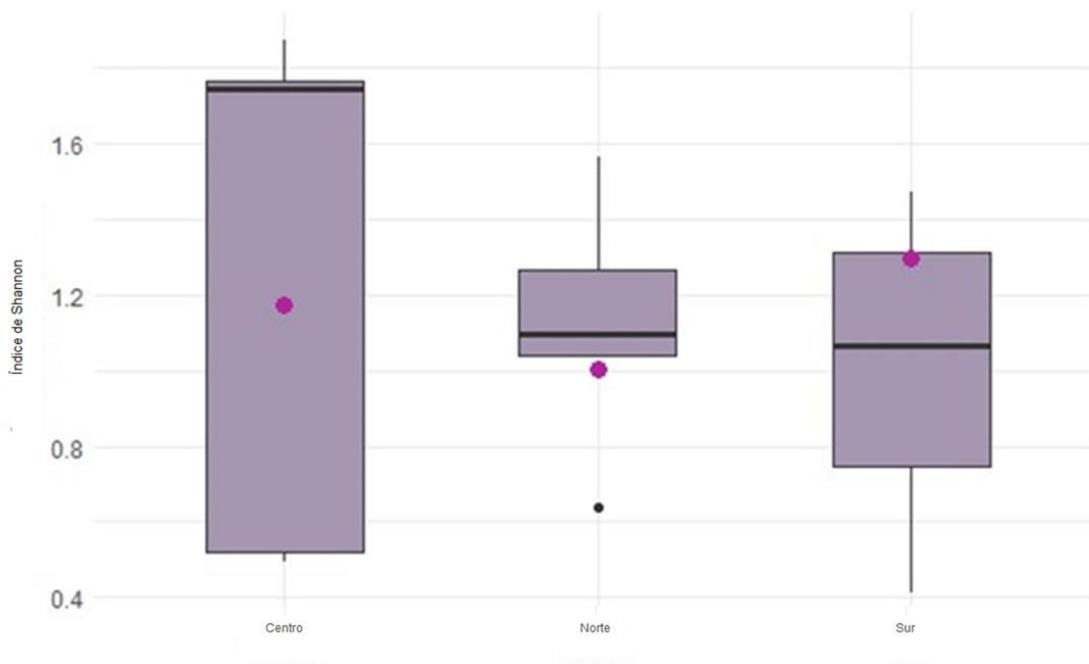
*Figura 20. Distribución de la biomasa total por zona para los SC en el monitoreo institucional. (DE=±).*

Índice de diversidad de Shannon-Weaver (monitoreo académico)

Análisis entre las diferentes zonas principales (SR y SC)

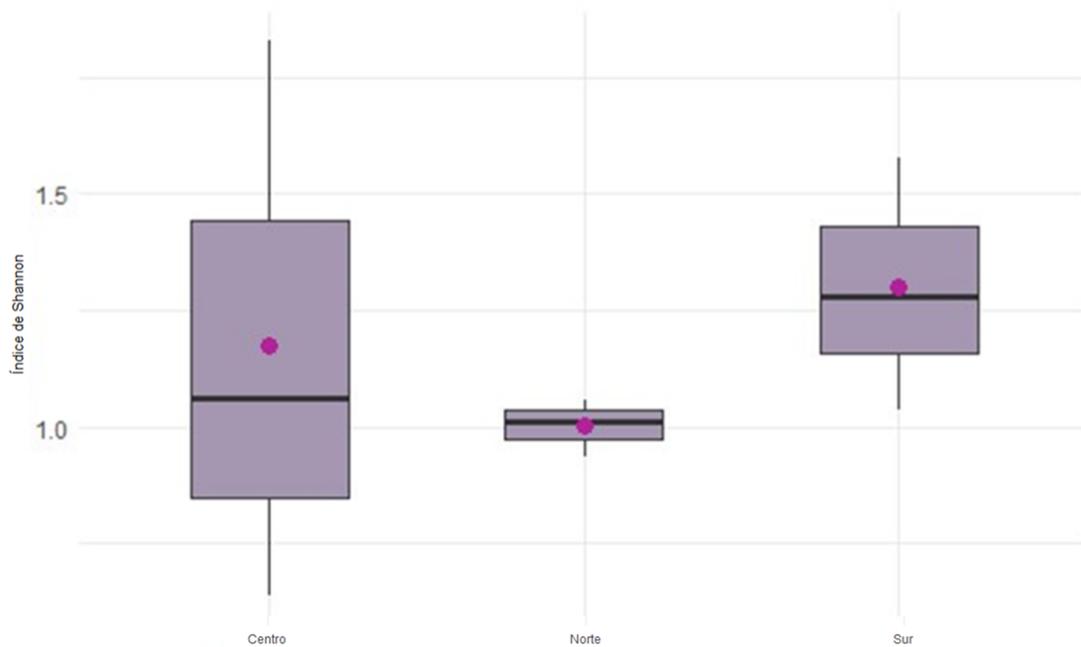
Los valores del índice de diversidad de Shannon-Weaver entre las diferentes zonas principales tanto en los SR, como en los SC revelaron un índice de diversivas bajo (< 2).

El análisis estadístico reveló que no hubo diferencias significativas en el índice de diversidad de Shannon-Weaver entre las zonas principales en los SR (ANOVA,  $p = 0.65$ ). Estos resultados sugieren que, aunque pueden existir variaciones en la distribución del índice de diversidad entre las diferentes zonas, estas diferencias no son estadísticamente significativas (**Figura 21**).



*Figura 21. Comparación del índice de diversidad de Shannon-Weaver por zona para los SR en el monitoreo académico. (diversidad baja < 2; diversidad media 2 a 3; diversidad alta > 3).*

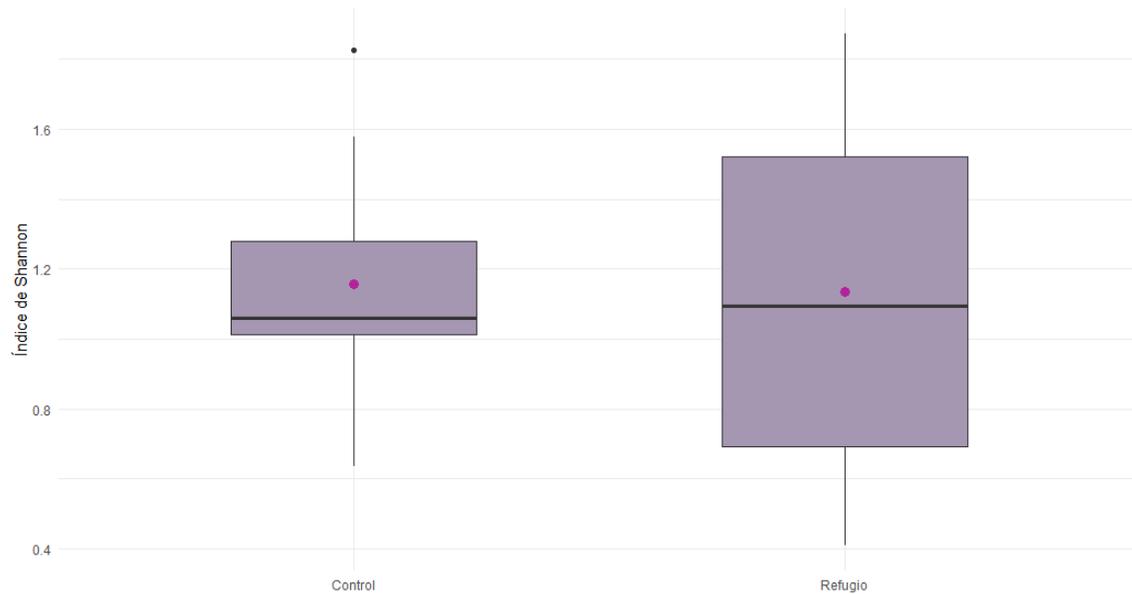
De igual manera, el análisis de la distribución del índice de Shannon-Weaver entre las diferentes zonas principales en los SC reveló que tampoco existieron diferencias significativas (Kruskal-Wallis,  $p = 0.65$ ) (Figura 22).



*Figura 22. Comparación del índice de diversidad de Shannon-Weaver por zona para los SC en el monitoreo académico. (diversidad baja < 2; diversidad media 2 a 3; diversidad alta > 3).*

*Análisis del índice de diversidad entre los SR y SC*

El análisis estadístico reveló que no hubo diferencias significativas en índice de Shannon-Weaver entre los SR y los SC (ANOVA,  $p = 0.89$ ). Estos resultados indican que, a pesar de la posible variación en el índice de diversidad entre los SR y SC, estas diferencias no son estadísticamente significativas (**Figura 23**).



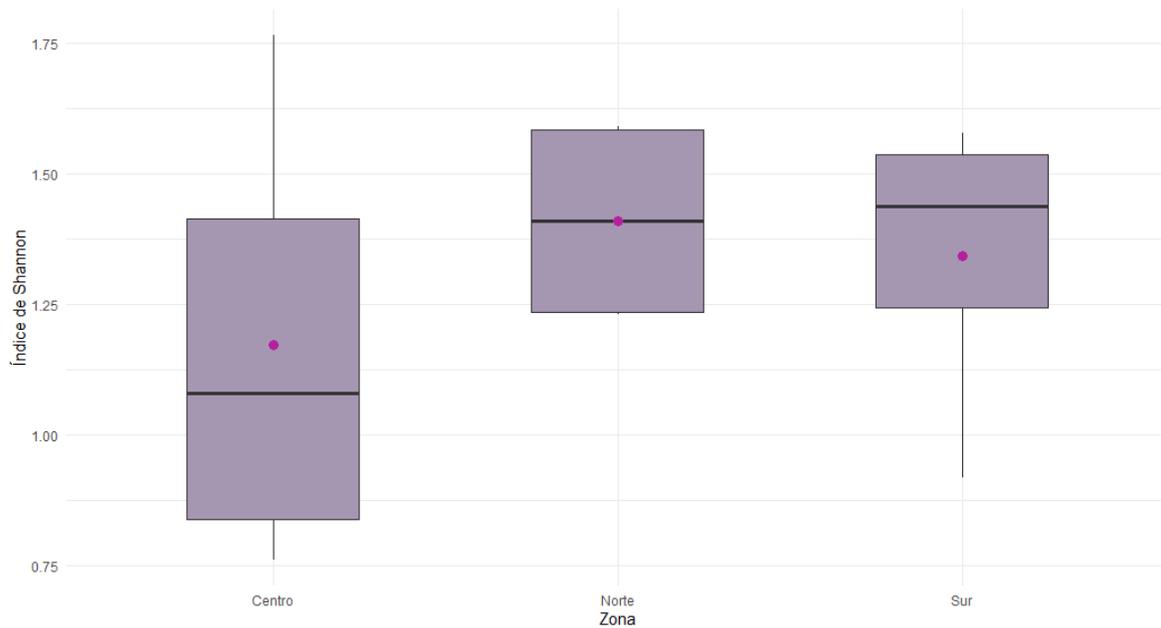
*Figura 23. Comparación del índice de Shannon-Weaver entre los SR y SC en el monitoreo académico. (diversidad baja < 2; diversidad media 2 a 3; diversidad alta > 3).*

Índice de diversidad de Shannon-Weaver (monitoreo institucional)

Análisis entre las diferentes zonas principales para SR

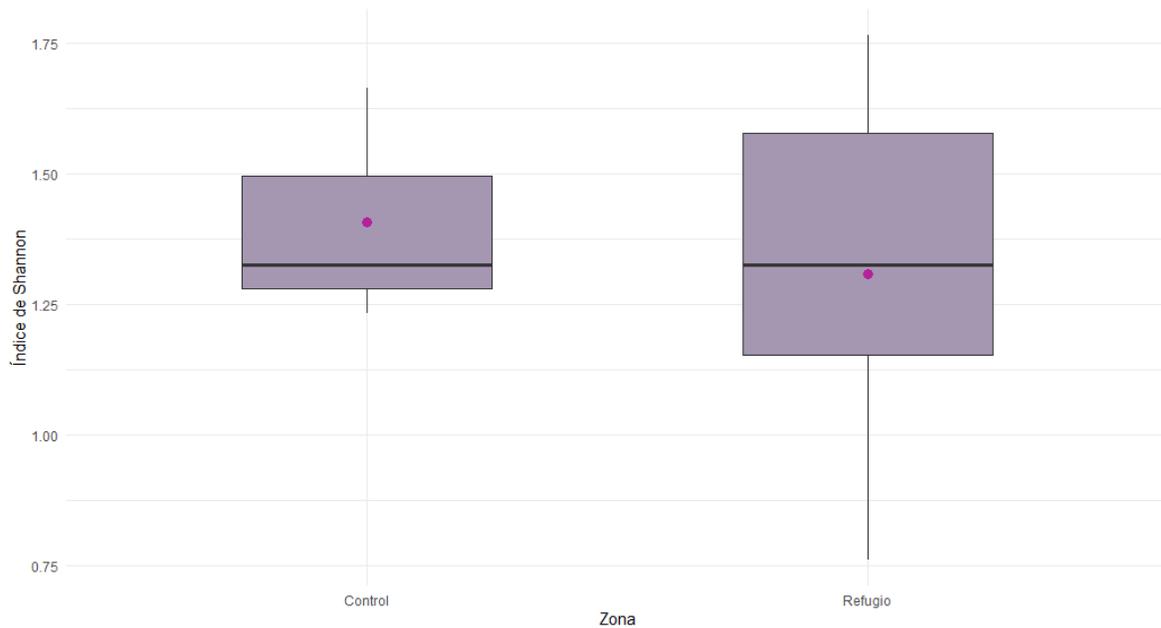
Los valores del índice de diversidad de Shannon-Weaver entre las diferentes zonas principales tanto en los SR, como en los SC revelaron un índice de diversivas bajo (< 2).

El análisis estadístico reveló que no hubo diferencias significativas en el índice de diversidad de Shannon-Weaver entre las zonas principales en los SR (Kruskal-Wallis,  $p = 0.66$ ). Estos resultados sugieren que, aunque pueden existir variaciones en la distribución del índice de diversidad entre las diferentes zonas, estas diferencias no son estadísticamente significativas (**Figura 24**).



*Figura 24. Comparación del índice de diversidad de Shannon-Weaver por zona para los SR en el monitoreo institucional. (diversidad baja < 2; diversidad media 2 a 3; diversidad alta > 3).*

El análisis estadístico reveló que no hubo diferencias significativas en índice de Shannon-Weaver entre los SR y los SC (ANOVA,  $p = 0.89$ ). Estos resultados indican que, a pesar de la posible variación en el índice de diversidad entre los SR y SC, estas diferencias no son estadísticamente significativas (**Figura 25**).

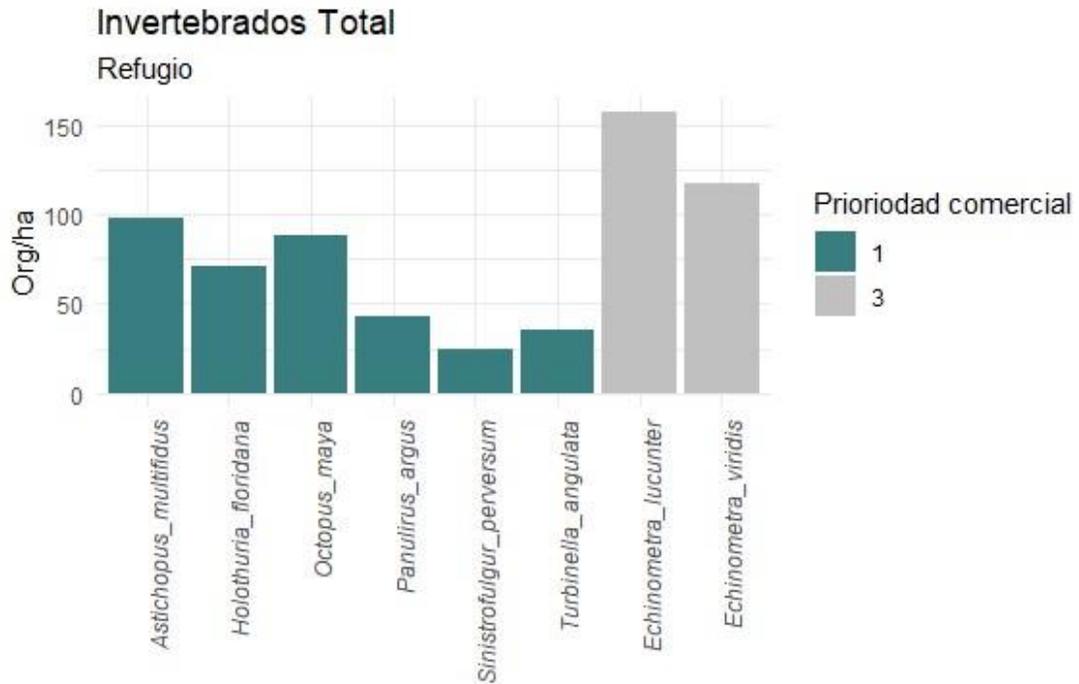


***Figura 25. Comparación del índice de Shannon-Weaver entre los SR y SC en el monitoreo institucional. (diversidad baja < 2; diversidad media 2 a 3; diversidad alta > 3).***

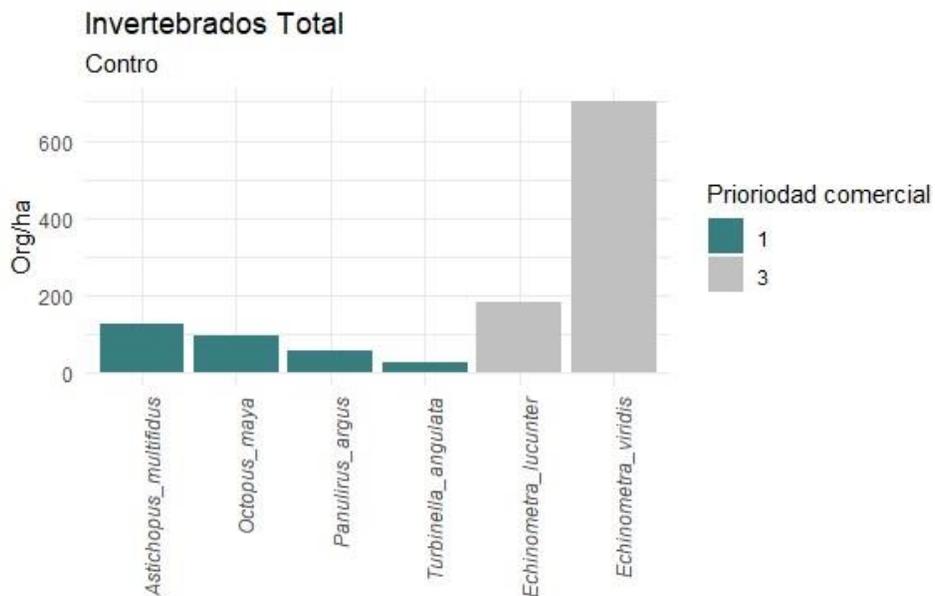
### Invertebrados

#### Registro total de invertebrados por especie

El registro de invertebrados (org/ha) por especie para los SR y SC reveló la distribución del número de organismos de cada especie a lo largo de los distintos sitios muestreados. Estos valores son el producto de la sumatoria total de invertebrados para cada especie distribuidos en el área total muestreada. La especie de mayor prioridad comercial (catalogadas como nivel 1) para los SR y los SC fue el pepino de mar peluche (*A. multifidus*) con aproximadamente 98 y 127 org/ha (**Figura 26; Figura 27**).



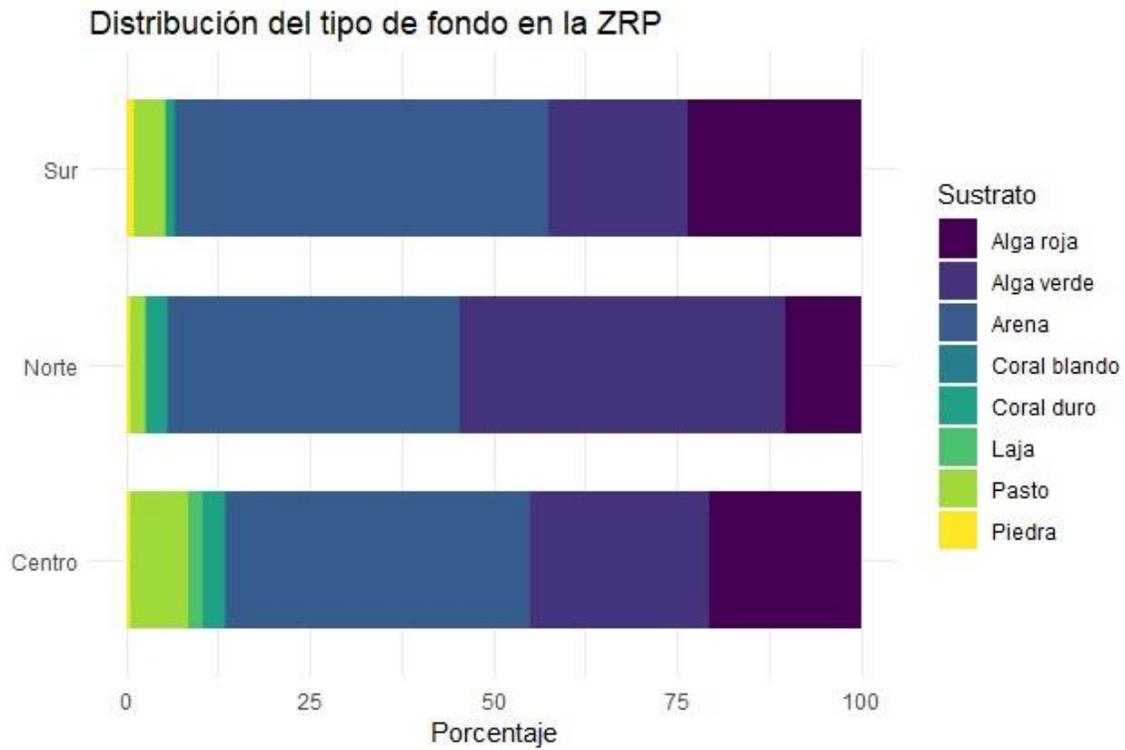
*Figura 26. Número de invertebrados por hectárea para los SR bajo un orden de prioridad comercial.*



*Figura 27. Número de invertebrados por hectárea para los SC bajo un orden de prioridad comercial.*

Tipo de fondo

El análisis de la distribución de la cobertura de los diferentes tipos de sustrato marino mostró un patrón consistente entre las diferentes zonas principales. Se observó una predominancia significativa de la cobertura de arena y en segundo orden predominó en fonde de alga verde en las tres zonas de estudio (**Figura 28**).



*Figura 28. Distribución del tipo de fondo marino entre las diferentes zonas principales de la ZRP.*

## Conclusiones

- Las conclusiones extraídas del presente estudio destacan la viabilidad de dos enfoques metodológicos, a saber, el monitoreo académico y el monitoreo institucional, para la evaluación continua de la Zona de Refugio Pesquero de Celestún (ZRP). La utilización de la curva de acumulación de especies reveló una tendencia consistente en la observación de un número óptimo de organismos afines en ambos métodos de monitoreo, en relación directa con el nivel de esfuerzo de muestreo aplicado.
- La comparabilidad de las estimaciones de biomasa entre los dos métodos de monitoreo se vio obstaculizada por las disparidades en el diseño y enfoque de cada uno (dirigido versus sistemático). No obstante, es notable la similitud observada en los valores asociados al índice de diversidad de Shannon-Weaver en ambos monitoreos. Este hallazgo sugiere una congruencia en la evaluación de la diversidad biológica a pesar de las diferencias metodológicas, lo cual resalta la robustez de dicho índice como una medida confiable de la variabilidad biológica en el área de estudio.
- El análisis indica que el tipo de fondo o sustrato no ejerce un efecto determinante en la distribución de las principales especies de interés comercial. A pesar de la predominancia del fondo de arena en el área de estudio, se observa una escasa presencia de estructuras bióticas como corales o praderas marinas. Esto sugiere que otros factores, como la disponibilidad de alimento, la temperatura del agua o la presión pesquera, pueden desempeñar un papel más influyente en la distribución y abundancia de las especies comerciales en el ecosistema marino analizado.
- Se anticipa que a lo largo de una escala temporal más amplia se registrarán incrementos significativos en los parámetros de crecimiento y reclutamiento, así como en los índices de diversidad biológica dentro de la Zona de Refugio Pesquero (ZRP). Este pronóstico se basa en la comprensión de los procesos ecológicos y las dinámicas poblacionales que tienden a favorecer la recuperación y el fortalecimiento de los ecosistemas marinos bajo medidas de protección y gestión adecuadas. La extrapolación de estos resultados hacia el futuro sugiere un panorama prometedor en términos de la salud y la sostenibilidad del ecosistema marino en estudio.
- La información recopilada en este estudio puede ser interpretada como una línea de base, proporcionando una representación actual de las características y condiciones ecológicas presentes en la Zona de Refugio Pesquero (ZRP) de Celestún. Este conjunto de datos constituye un punto de referencia fundamental para futuras investigaciones y evaluaciones, permitiendo la

monitorización de posibles cambios en el ecosistema a lo largo del tiempo y facilitando la implementación de estrategias de gestión adaptativas y efectivas para la conservación de esta importante área protegida.

## Referencias

- Amador-Castro, I. G., Fernández-Rivera Melo, F. J., & Torre, J. (2021). Marine diversity in the biosphere reserve of the most oceanic island in the Gulf of California: San Pedro Mártir. *ZooKeys*, *1062*, 177-201.
- da Silva, I. M., Hill, N., Shimadzu, H., Soares, A. M., & Dornelas, M. (2015). Spillover effects of a community-managed marine reserve. *PLoS One*, *10*(4), e0111774.
- DOF. (2014). *Norma Oficial Mexicana NOM-049-SAG/PESC-2014, Que determina el procedimiento para establecer zonas de refugio para los recursos pesqueros en aguas de jurisdicción federal de los Estados Unidos Mexicanos*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. (6°ed.). McGraw-Hill.
- Hernández-Velasco, A., Caamal, J., Suarez, A., Pérez-Alarcón, F., & Fulton, S. (2018). Protocolo de Monitoreo para reservas marinas. *Comunidad y Biodiversidad A.C., Guaymas, Sonora*.
- Rolim, F. A., Langlois, T., Rodrigues, P. F. C., Bond, T., Motta, F. S., Neves, L. M., & Gadig, O. B. F. (2019). Network of small no-take marine reserves reveals greater abundance and body size of fisheries target species. *PLoS ONE*, *14*(1), e0204970.

## Anexos

### Coordenadas monitoreo académico

<b>Punto</b>	<b>Tipo</b>	<b>x</b>	<b>y</b>
C-N1	Control	-90.330006	21.230027
C-N2	Control	-90.3152	21.192
C-N3	Control	-90.4448	21.1905
C-C1	Control	-90.540199	21.120799
C-C2	Control	-90.5244	21.1168
C-C3	Control	-90.530699	21.103899
C-S1	Control	-90.597099	21.005299
C-S2	Control	-90.603641	20.927052
C-S3	Control	-90.614011	20.948668
R-N1	Refugio	-90.357001	21.203753
R-N2	Refugio	-90.35025	21.160466
R-N3	Refugio	-90.388122	21.20085
R-N4	Refugio	-90.37953	21.17556
R-N5	Refugio	-90.425351	21.129091
R-C1	Refugio	-90.467616	21.134433
R-C2	Refugio	-90.450457	21.093592
R-C3	Refugio	-90.503536	21.070426
R-C4	Refugio	-90.519766	21.042533
R-C5	Refugio	-90.493755	21.013982
R-S1	Refugio	-90.547683	21.021383
R-S2	Refugio	-90.5627	20.98545
R-S3	Refugio	-90.542649	20.958033
R-S4	Refugio	-90.587	20.951783
R-S5	Refugio	-90.552671	20.923278

Coordenadas monitoreo institucional

<b>Punto</b>	<b>Tipo</b>	<b>x</b>	<b>y</b>
<b>C-S1</b>	Control	20.998375	-90.584563
C-N2	Control	21.124811	-90.379831
C-N1	Control	21.194116	-90.442206
R-S4	Refugio	20.901046	-90.544233
R-S3	Refugio	20.915672	-90.588934
R-S2	Refugio	20.969944	-90.52002
R-S1	Refugio	20.990116	-90.56296
R-N4	Refugio	21.143248	-90.394123
R-N3	Refugio	21.177028	-90.42593
R-N2	Refugio	21.180642	-90.331432
R-N1	Refugio	21.217394	-90.358205
R-C4	Refugio	21.037186	-90.492065
R-C3	Refugio	21.062241	-90.531802
<b>R-C2</b>	Refugio	21.096601	-90.449925
<b>R-C1</b>	Refugio	21.125908	-90.485517

Evidencia fotográfica



*Figura 29. Observación de langostas espinosa dentro de la ZRP.*



*Figura 30. Observación de tiburón gata dentro de la ZRP.*



*Figura 31. Grupo de monitore institucional y pescadores de la localidad de Celestún.*



*Figura 32. Planeación y diseño del monitoreo académico.*



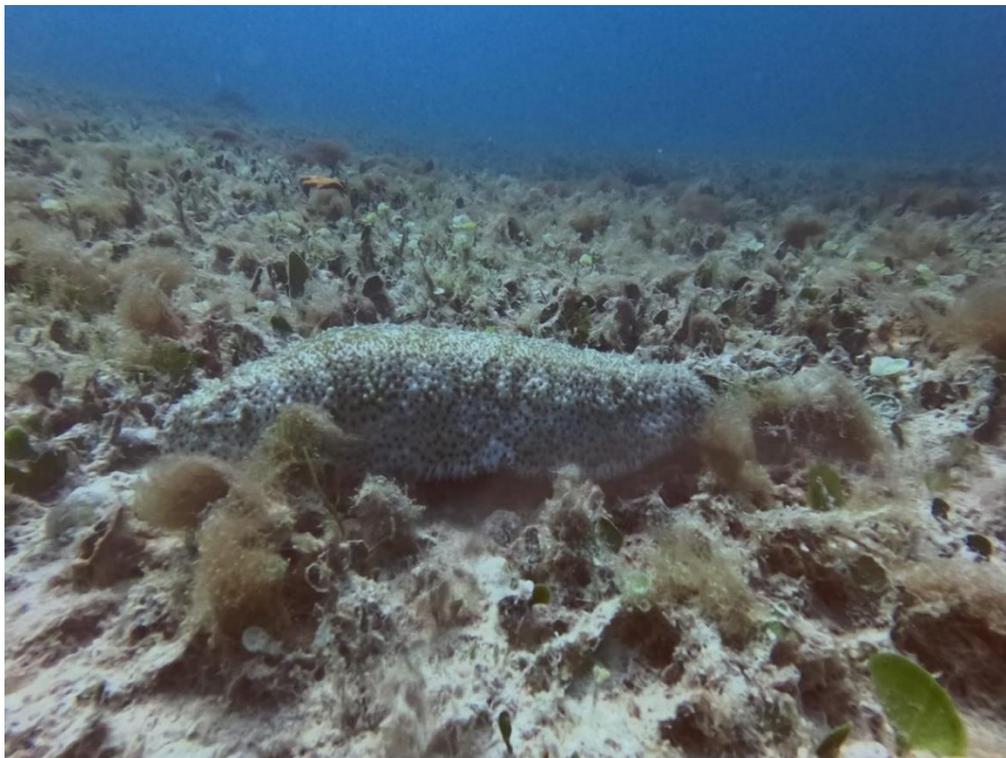
*Figura 33. Presentación de resultados del monitoreo académico al grupo de la ZRP de Celestún.*



*Figura 34. Presentación de resultados del monitoreo académico al grupo de la ZRP de Celestún.*



*Figura 35. observación de pargo mulato dentro de la ZRP.*



*Figura 36. observación de pepino de mar peluche dentro de la ZRP.*