

La investigación reportada en esta tesis es parte de los programas de investigación del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California).

La investigación fue financiada por el CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología).

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México). El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo o titular de los Derechos Autor.

# **Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California**



---

## **Maestría en Ciencias en Ecología Marina**

---

### **Funcionalidad física de los arrecifes de coral y su asociación con la comunidad de peces arrecifales en Huatulco, Oaxaca**

Tesis  
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias

Presenta:

**Iskra Galarza Cruz**

Ensenada, Baja California, México  
2023

Tesis defendida por  
**Iskra Galarza Cruz**

y aprobada por el siguiente Comité

---

**Dr. Rafael Andrés Cabral Tena**  
Director de tesis

**Dr. Omar Valencia Méndez**

**Dra. Patricia Juárez Camacho**

**Dr. Ramón Andrés López Pérez**



---

**Dr. Rafael Andrés Cabral Tena**  
Coordinador del Posgrado en Ecología Marina

---

**Dra. Ana Denise Re Araujo**  
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Iskra Galarza Cruz** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ecología Marina.

**Funcionalidad física de los arrecifes de coral y su asociación con la comunidad de peces arrecifales en Huatulco, Oaxaca**

Resumen aprobado por:

---

Dr. Rafael Andrés Cabral Tena  
**Director de tesis**

Los arrecifes de coral contribuyen a una gran variedad de bienes y servicios ecosistémicos como es el aprovisionamiento de hábitat para especies como los peces que son uno de los grupos mejor estudiados en los arrecifes de coral, debido a que cumplen una gran diversidad de funciones en el ecosistema. En este estudio evaluamos la relación entre el índice de función arrecifal (IFA) y la biodiversidad de peces en Huatulco. En ocho arrecifes de Huatulco, Oaxaca en el año 2019 se estimó la cobertura de coral y se recopilaron datos morfométricos cuantitativos de las colonias de coral seleccionadas. Con estos datos se estimaron las tasas de calcificación y la complejidad estructural de cada una de las especies presentes y luego se calculó IFA, que estima la contribución funcional específica de las especies de corales en los sistemas de arrecifes. Además, se realizaron censos visuales a partir de transectos de banda para la identificación de la ictiofauna. Para medir la diversidad de la comunidad de peces, se calculó el índice de Margalef, la diversidad de Shannon, la diversidad de Simpson, la dominancia de Simpson y equitatividad de Pielou. Cada uno de estos se modelaron junto con el IFA para ver su relación, mediante modelos lineales simples, modelos lineales generalizados (GLM's), modelos polinomiales y modelos aditivos generalizados (GAM's). El IFA promedio fue de  $0.81 \pm 0.06$  (DE). Las especies más abundante en el estudio fueron *Azurina atrilobata*, *Thalassoma lucasanum* y *Stegastes acapulcoensis*, mientras que las de mayor biomasa fueron *S. acapulcoensis*, *Prionurus laticlavus* y *Halichoeres nicholsi*. Los valores de diversidad ictiofaunística fueron mayores en Isla Cacaluta (excepto para el índice de Margalef). Los modelos GAM explicaron menos del 32% de la varianza de los datos en este estudio. Los datos resaltan la importancia de *Pocillopora damicornis* como el principal constructor de arrecifes en la región Pacífico Oriental Tropical y la alta presencia de *T. lucasanum* y *S. acapulcoensis* como las especies más abundantes en estos arrecifes. Sin embargo, estos datos también muestran que no hay relación entre el IFA y la biodiversidad ictiofaunística en los arrecifes de Huatulco.

**Palabras clave:** Índice funcional arrecifal, biodiversidad ictiofaunística, *Pocillopora*, Modelos aditivos generalizados

Abstract of the thesis presented by **Iskra Galarza Cruz** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Marine Ecology

**Physical functionality of coral reefs and their association with the reef fish community in Huatulco, Oaxaca**

Abstract approved by:

---

Dr. Rafael Andrés Cabral Tena  
**Thesis Director**

Coral reefs contribute to a wide variety of ecosystem goods and services, such as habitat provision for species such as fish, which are one of the best-studied groups in coral reefs, because they fulfill a wide variety of functions in the ecosystem. In this study we evaluated the relationship between the reef function index (RFI) and fish biodiversity in Huatulco. In eight reefs of Huatulco, Oaxaca in 2019, the coral cover was estimated and quantitative morphometric data of the selected coral colonies were collected. With these data, the calcification rates and the structural complexity of each of the species present were estimated and then RFI was calculated, which estimates the specific functional contribution of coral species in reef systems. In addition, visual censuses were carried out from band transects for the identification of the ichthyofauna. To measure the diversity of the fish community, the Margalef index, Shannon diversity, Simpson diversity, Simpson dominance and Pielou evenness were calculated. Each of these were modeled together with the IFA to see their relationship, using simple linear models, generalized linear models (GLM's), polynomial models and generalized additive models (GAM's). The average RFI was  $0.81 \pm 0.06$  (SD). The most abundant species in the study were *Azurina atrilobata*, *Thalassoma lucasanum* and *Stegastes acapulcoensis*, while those with the highest biomass were *S. acapulcoensis*, *Prionurus laticlavus* and *Halichoeres nicholsi*. Ichthyofaunistic diversity values were higher on Cacaluta Island (except for the Margalef index). The GAM models explained less than 32% of the variance of the data in this study. The data highlight the importance of *Pocillopora damicornis* as the main reef builder in the Eastern Tropical Pacific region and the high presence of *T. lucasanum* and *S. acapulcoensis* as the most abundant species in these reefs. However, these data also show that there is no relationship between the RFI and the ichthyofaunistic biodiversity in the reefs of Huatulco.

**Keywords:** reef functional index, ichthyofaunal biodiversity, *Pocillopora*, Generalized additive models

## **Dedicatoria**

**A mi padre Jesús Galarza, este logro es en tu honor  
porque siempre me motivaste a perseguir mis sueños.**

**A mi hermano Ilan Galarza, a quien adoro y ha sido mi  
inspiración para ser mejor cada día.**

**A mi madre María del Carmen Cruz, por su apoyo  
incondicional, amor y confianza.**

## Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE), por brindarme las herramientas y los conocimientos necesarios para formarme como una estudiante profesional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico otorgado para realizar mis estudios de maestría.

Agradezco a mi director el Dr. Rafael Andrés Cabral Tena, por aceptarme como su alumna, por compartir su conocimiento y tiempo a lo largo de cada revisión, por estar atento a cada inquietud que tenía. Gracias por siempre confiar en mis capacidades y habilidades.

A los miembros de mi comité, Dr. Omar Valencia Méndez, Dra. Patricia Juárez Camacho y Dr. Ramón Andrés López Pérez por aceptar ser parte de este proyecto de tesis, brindándome su tiempo en cada avance de tesis y revisión de este trabajo. Así como sus valiosas aportaciones y sugerencias realizados para la mejora sustancial de mi proyecto y tesis de maestría.

A mi familia por apoyarme en absolutamente todo y estar orgullosos de mí sin importar las circunstancias. A mi mamá, que siempre estuvo atenta en mi bienestar y cuidado durante mi estancia en Ensenada, nunca tendré palabras o acciones suficientes para agradecerle todo lo que siempre ha hecho por mí. A mi hermano, gracias por motivarme a seguir completando metas y retos, tanto académicos, como personales y profesionales. Gracias a los dos por su apoyo constante el cual ha sido pieza esencial para completar esta meta.

A mis amigas del posgrado Gaby, Majo y Paty por las horas compartidas, los trabajos realizados en conjunto y las historias vividas, pero sobre todo por su amistad sincera. De igual manera a mis amigos Ibrah, Mau, Oscar y Will, gracias por tantas risas, por tantos ratos de reflexión y por todas las experiencias juntos. Cada uno de ustedes fue un parteaguas en mi manera de vivir la maestría y mi estancia en Ensenada. Finalmente, a mi amiga Maribel fuiste una pieza crucial durante estos últimos años de maestría, ya que me escuchabas, acompañabas y ayudabas a distraerme. Gracias por siempre estar y apoyarme en todo.

Al Coral Team Plus y el Laboratorio EPZC gracias por todos los momentos vividos.

## Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria .....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	ix
Lista de tablas .....	xii
 <b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	 <b>1</b>
1.1 Antecedentes .....	2
1.2 Justificación .....	4
1.3 Hipótesis.....	5
1.4 Objetivos .....	5
1.4.1 Objetivo general .....	5
1.4.2 Objetivos específicos.....	5
 <b>Capítulo 2. Metodología.....</b>	 <b>6</b>
2.1 Área de estudio .....	6
2.2 Cobertura de coral .....	7
2.3 Tasa de calcificación.....	7
2.4 Complejidad estructural.....	8
2.5 Índice de función arrecifal.....	8
2.6 Caracterización de la comunidad de peces.....	9
2.7 Relación del IFA y los atributos ecológicos de la comunidad de peces .....	10



<b>Capítulo 3. Resultados .....</b>	<b>11</b>
3.1 Comunidad de corales.....	11
3.2 Comunidad de peces.....	13
3.2.1 Índice de Margalef (abundancia) .....	14
3.2.2 Diversidad de Shannon (abundancia) .....	15
3.2.3 Diversidad de Simpson (abundancia).....	15
3.2.4 Dominancia de Simpson (abundancia).....	17
3.2.5 Equitatividad de Pielou (abundancia) .....	18
3.2.6 Índice de Margalef (biomasa).....	18
3.2.7 Diversidad de Shannon (biomasa).....	19
3.2.8 Diversidad de Simpson (biomasa) .....	20
3.2.9 Dominancia de Simpson (biomasa).....	20
3.2.10 Equitatividad de Pielou (biomasa) .....	21
3.3 Relación entre IFA y los índices de la comunidad de peces.....	22
3.3.1 Modelos lineales (abundancia) .....	22
3.3.2 Modelos Lineales Generalizados (GLM) (abundancia).....	24
3.3.3 Modelos no lineales (abundancia) .....	24
3.3.4 Modelos Aditivos Generalizados (GAM) (abundancia) .....	26
3.3.5 Modelos lineales (biomasa) .....	28
3.3.6 Modelos Lineales Generalizados (GLM) (biomasa) .....	30
3.3.7 Modelos no lineales (biomasa) .....	31
3.3.8 Modelos Aditivos Generalizados (GAM) (biomasa) .....	32
 <b>Capítulo 4. Discusión.....</b>	 <b>36</b>
4.1 Comunidad de corales.....	36
4.1.1 Riqueza de corales.....	36
4.1.2 Coeficiente funcional.....	37

4.1.3	Cobertura coralina.....	37
4.1.4	Índice de Función Arrecifal.....	38
4.2	Comunidad de peces.....	39
4.2.1	Riqueza ictiofaunística.....	39
4.2.2	Índices de diversidad de la comunidad de peces.....	41
4.2.3	Relación entre los índices de la comunidad de peces y el IFA .....	42
 <b>Capítulo 5. Conclusiones .....</b>		<b>45</b>
 <b>Literatura citada .....</b>		<b>46</b>
 <b>Anexos .....</b>		<b>58</b>

## Lista de figuras

### Figura

### Página

1. Sitios de estudio a lo largo de la costa de Huatulco. Abreviaturas: AGU, San Agustín; RIS, Riscalillo; JIC, Jicaral; HER, Dos Hermanas; IND, La India; CAC, Isla Cacaluta; MAG, Maguey; ENT, La Entrega. Tomado de "Functional potential of coral assemblages along a typical Eastern Tropical Pacific reef tract", por Cabral-Tena et al., 2020, Ecological Indicators, 119. ....6
2. Estimación de la tasa de calcificación de las especies de coral ( $\text{kg CaCO}_3 \text{ m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ ) por morfología. La flecha roja representa la dirección del crecimiento de la colonia. Tomado de "A framework for measuring coral species-specific contribution to reef functioning in the Caribbean" (p. 879), por González-Barrios y Álvarez-Filip, 2018, Ecological Indicators, 95(1)...8
3. Transecto en banda para censo visual de peces. Las líneas punteadas indican el área que se debe considerar para el censo. Modificado de "Protocolo de Monitoreo para reservas marinas" (p. 24), por Hernández-Velasco et al., 2018, Comunidad y Biodiversidad..... 10
4. Cobertura por especie de coral en los arrecifes de Huatulco. Abreviaturas: AGU, San Agustín; RIS, Riscalillo; JIC, Jicaral; HER, Dos Hermanas; IND, La India; CAC, Isla Cacaluta; MAG, Maguey; ENT, La Entrega; Pdam, *Pocillopora damicornis*; Pver, *Pocillopora verrucosa*; Pcap, *Pocillopora capitata*; Pgra, *Pocillopora grandis*; Pgig, *Pavona gigante*; Peff, *Pocillopora effusa*; Ppan, *Porites panamensis*. .... 12
5. Índice de función arrecifal por especie para los arrecifes de Huatulco. Abreviaturas: AGU, San Agustín; RIS, Riscalillo; JIC, Jicaral; HER, Dos Hermanas; IND, La India; CAC, Isla Cacaluta; MAG, Maguey; ENT, La Entrega; Pdam, *Pocillopora damicornis*; Pver, *Pocillopora verrucosa*; Pcap, *Pocillopora capitata*; Pgra, *Pocillopora grandis*; Pgig, *Pavona gigante*; Peff, *Pocillopora effusa*; Ppan, *Porites panamensis*. .... 13
6. Índice de Margalef de las especies de peces conspicuos en los arrecifes de Huatulco con mediana (línea negra), desviación estándar y rango (valores mínimo y máximo). Abreviaturas: AGU, San Agustín; RIS, Riscalillo; JIC, Jicaral; HER, Dos Hermanas; IND, La India; CAC, Isla Cacaluta; MAG, Maguey; ENT, La Entrega. .... 14
7. Índice de diversidad de Shannon de las especies de peces conspicuos en los arrecifes de Huatulco con mediana (línea negra), desviación estándar y rango (valores mínimo y máximo). Abreviaturas: AGU, San Agustín; RIS, Riscalillo; JIC, Jicaral; HER, Dos Hermanas; IND, La India; CAC, Isla Cacaluta; MAG, Maguey; ENT, La Entrega..... 15
8. Índice de diversidad de Simpson de las especies de peces conspicuos en los arrecifes de Huatulco con mediana (línea negra), desviación estándar y rango (valores mínimo y máximo). Abreviaturas: AGU, San Agustín; RIS, Riscalillo; JIC, Jicaral; HER, Dos Hermanas; IND, La India; CAC, Isla Cacaluta; MAG, Maguey; ENT, La Entrega..... 17
9. Índice de dominancia de Simpson de las especies de peces conspicuos en los arrecifes de Huatulco con mediana (línea negra), desviación estándar y rango (valores mínimo y máximo). Abreviaturas: AGU, San Agustín; RIS, Riscalillo; JIC, Jicaral; HER, Dos Hermanas; IND, La India; CAC, Isla Cacaluta; MAG, Maguey; ENT, La Entrega..... 17

10. Equitatividad de Pielou de las especies de peces conspicuos en los arrecifes de Huatulco con mediana (línea negra), desviación estándar y rango (valores mínimo y máximo). Abreviaturas: AGU, San Agustín; RIS, Riscalillo; JIC, Jicaral; HER, Dos Hermanas; IND, La India; CAC, Isla Cacaluta; MAG, Maguey; ENT, La Entrega. .... 18
11. Índice de Margalef de las especies de peces conspicuos en los arrecifes de Huatulco con mediana (línea negra), desviación estándar y rango (valores mínimo y máximo). Abreviaturas: AGU, San Agustín; RIS, Riscalillo; JIC, Jicaral; HER, Dos Hermanas; IND, La India; CAC, Isla Cacaluta; MAG, Maguey; ENT, La Entrega. .... 19
12. Índice de diversidad de Shannon de las especies de peces conspicuos en los arrecifes de Huatulco con mediana (línea negra), desviación estándar y rango (valores mínimo y máximo). Abreviaturas: AGU, San Agustín; RIS, Riscalillo; JIC, Jicaral; HER, Dos Hermanas; IND, La India; CAC, Isla Cacaluta; MAG, Maguey; ENT, La Entrega..... 19
13. Índice de diversidad de Simpson de las especies de peces conspicuos en los arrecifes de Huatulco con mediana (línea negra), desviación estándar y rango (valores mínimo y máximo). Abreviaturas: AGU, San Agustín; RIS, Riscalillo; JIC, Jicaral; HER, Dos Hermanas; IND, La India; CAC, Isla Cacaluta; MAG, Maguey; ENT, La Entrega..... 20
14. Índice de dominancia de Simpson de las especies de peces conspicuos en los arrecifes de Huatulco con mediana (línea negra), desviación estándar y rango (valores mínimo y máximo). Abreviaturas: AGU, San Agustín; RIS, Riscalillo; JIC, Jicaral; HER, Dos Hermanas; IND, La India; CAC, Isla Cacaluta; MAG, Maguey; ENT, La Entrega..... 21
15. Equitatividad de Pielou de las especies de peces conspicuos en los arrecifes de Huatulco con mediana (línea negra), desviación estándar y rango (valores mínimo y máximo). Abreviaturas: AGU, San Agustín; RIS, Riscalillo; JIC, Jicaral; HER, Dos Hermanas; IND, La India; CAC, Isla Cacaluta; MAG, Maguey; ENT, La Entrega. .... 21
16. Modelos lineales del IFA con el índice de Margalef (a), diversidad de Shannon (b), diversidad de Simpson (c), dominancia de Simpson (d) y equitatividad de Pielou (e)..... 23
17. Modelos no lineales del IFA con el índice de Margalef (a), diversidad de Shannon (b), diversidad de Simpson (c), dominancia de Simpson (d) y equitatividad de Pielou (e)..... 25
18. Modelos aditivos generalizados del IFA con el índice de Margalef (a), diversidad de Shannon (b), diversidad de Simpson (c), dominancia de Simpson (d) y equitatividad de Pielou (e)..... 28
19. Modelos lineales del IFA con el índice de Margalef (a), diversidad de Shannon (b), diversidad de Simpson (c), dominancia de Simpson (d) y equitatividad de Pielou (e)..... 30
20. Modelos no lineales del IFA con el índice de Margalef (a), diversidad de Shannon (b), diversidad de Simpson (c), dominancia de Simpson (d) y equitatividad de Pielou (e)..... 31
21. Modelos aditivos generalizados del IFA con el índice de Margalef (a), diversidad de Shannon (b), diversidad de Simpson (c), dominancia de Simpson (d) y equitatividad de Pielou (e)..... 34
22. Abundancia. Residuos versus los valores pronosticados para el índice de Margalef (a), diversidad de Shannon (b), diversidad de Simpson (c), dominancia de Simpson (d), equitatividad de Pielou (e) y normalidad Q-Q con el índice de Margalef (a), diversidad de Shannon (b), diversidad de Simpson (c), dominancia de Simpson (d) y equitatividad de Pielou (e). .... 34

Shannon (d), diversidad de Simpson (f), dominancia de Simpson (h) y equitatividad de Pielou (j). .....	65
23. Abundancia. Análisis de residuales del modelo aditivo generalizado del IFA con el índice de Margalef. Normalidad Q-Q (a), valores residuales (b), histograma de residuos (c) y respuesta frente a los valores ajustados (d). .....	66
24. Abundancia. Análisis de residuales del modelo aditivo generalizado del IFA con la diversidad de Shannon. Normalidad Q-Q (a), valores residuales (b), histograma de residuos (c) y respuesta frente a los valores ajustados (d). .....	67
25. Abundancia. Análisis de residuales del modelo aditivo generalizado del IFA con la diversidad de Simpson. Normalidad Q-Q (a), valores residuales (b), histograma de residuos (c) y respuesta frente a los valores ajustados (d). .....	68
26. Abundancia. Análisis de residuales del modelo aditivo generalizado del IFA con la dominancia de Simpson. Normalidad Q-Q (a), valores residuales (b), histograma de residuos (c) y respuesta frente a los valores ajustados (d). .....	69
27. Abundancia. Análisis de residuales del modelo aditivo generalizado del IFA con la equitatividad de Pielou. Normalidad Q-Q (a), valores residuales (b), histograma de residuos (c) y respuesta frente a los valores ajustados (d). .....	70
28. Biomasa. Residuos versus los valores pronosticados para el índice de Margalef (a), diversidad de Shannon (c), diversidad de Simpson (e), dominancia de Simpson (g) y equitatividad de Pielou (i). Normalidad Q-Q con el índice de Margalef (b), diversidad de Shannon (d), diversidad de Simpson (f), dominancia de Simpson (h) y equitatividad de Pielou (j). .....	72
29. Biomasa. Análisis de residuales del modelo aditivo generalizado del IFA con el índice de Margalef. Normalidad Q-Q (a), valores residuales (b), histograma de residuos (c) y respuesta frente a los valores ajustados (d). .....	73
30. Biomasa. Análisis de residuales del modelo aditivo generalizado del IFA con la diversidad de Shannon. Normalidad Q-Q (a), valores residuales (b), histograma de residuos (c) y respuesta frente a los valores ajustados (d). .....	74
31. Biomasa. Análisis de residuales del modelo aditivo generalizado del IFA con la diversidad de Simpson. Normalidad Q-Q (a), valores residuales (b), histograma de residuos (c) y respuesta frente a los valores ajustados (d). .....	75
32. Biomasa. Análisis de residuales del modelo aditivo generalizado del IFA con la dominancia de Simpson. Normalidad Q-Q (a), valores residuales (b), histograma de residuos (c) y respuesta frente a los valores ajustados (d). .....	76
33. Biomasa. Análisis de residuales del modelo aditivo generalizado del IFA con la equitatividad de Pielou. Normalidad Q-Q (a), valores residuales (b), histograma de residuos (c) y respuesta frente a los valores ajustados (d). .....	77

## Lista de tablas

Tabla	Página
1. Presencia/ausencia de especies de coral por sitio de muestreo en Huatulco, Oaxaca. ....	11
2. Tasa de calcificación promedio ( $\text{kg CaCO}_3 \text{ m}^{-2} \text{ años}^{-1}$ ), complejidad estructural (índice de rugosidad y altura) y coeficiente funcional (CF) para cada especie de las especies de coral. .	12
3. Modelos lineales para cada uno de los índices de la comunidad de peces, con su p-value y $R^2$ . ....	22
4. Modelos lineales generalizados para cada uno de los índices de la comunidad de peces. ....	24
5. Modelos no lineales para cada uno de los índices de la comunidad de peces. ....	24
6. Relación entre el IFA y los índices de estructura de la comunidad de peces, a partir de modelos aditivos generalizados. ....	26
7. Funciones bases (Suavizado) para cada uno de los índices de la comunidad de peces con su p-value. ....	26
8. Modelos lineales para cada uno de los índices de la comunidad de peces, con su p-value y $R^2$ . ....	29
9. Modelos lineales generalizados para cada uno de los índices de la comunidad de peces. ....	30
10. Modelos no lineales para cada uno de los índices de la comunidad de peces. ....	32
11. Relación entre el IFA y los índices de estructura de la comunidad de peces, a partir de modelos aditivos generalizados. ....	34
12. Funciones bases (Suavizado) para cada uno de los índices de la comunidad de peces con su p-value. ....	35
13. Trabajos sobre la cobertura coralina. ....	38
14. Riqueza de especies en el Pacífico Mexicano. ....	39
15. Lista sistemática de la ictiofauna registrada en los arrecifes de Huatulco para el año 2019. AGU, San Agustín; RIS, Riscalillo; JIC, Jicaral; HER, Dos Hermanas; IND, La India; CAC, Isla Cacaluta; MAG, Maguey; ENT, La Entrega. ....	58
16. Composición de las especies por abundancia relativa de las especies de peces registradas en los arrecifes de Huatulco para el año 2019. AGU, San Agustín; RIS, Riscalillo; JIC, Jicaral; HER, Dos Hermanas; IND, La India; CAC, Isla Cacaluta; MAG, Maguey; ENT, La Entrega. ....	60
17. Composición de las especies por biomasa relativa de las especies de peces registradas en los arrecifes de Huatulco para el año 2019. AGU, San Agustín; RIS, Riscalillo; JIC, Jicaral; HER, Dos Hermanas; IND, La India; CAC, Isla Cacaluta; MAG, Maguey; ENT, La Entrega. ....	62

## Capítulo 1. Introducción

---

Los arrecifes de coral se desarrollan debido a la capacidad que los corales escleractinios tienen para producir y depositar carbonato de calcio mientras construyen sus esqueletos y forman estructuras tridimensionalmente complejas a medida que crecen (Carricart-Ganivet et al., 2012; Norzagaray-López et al., 2015). Además, los corales contribuyen con una variedad de servicios ecosistémicos como la productividad y reciclaje de nutrientes, la producción de energía, la protección costera y la provisión de hábitat para otras especies (Moberg y Folke, 1999; González-Barrios y Álvarez-Filip, 2018; McWilliam et al., 2018). Es por esto que son importantes social, económica y ecológicamente, siendo valuados en más de US \$352,000 ha año<sup>-1</sup> (Costanza et al., 1998; de Groot et al., 2012).

Desde la escala local hasta la global, la estructura y la dinámica de muchas comunidades de arrecifes de coral se han modificado directa e indirectamente durante las últimas décadas, principalmente debido al aumento de las perturbaciones naturales y antropogénicas (Darling et al., 2010; Manzello, 2010a, 2010b; Bruno y Valdivia, 2016; Hughes et al., 2017). Una manera de comprender las respuestas de la comunidad arrecifal ante estas perturbaciones, es mediante el análisis de rasgos funcionales (McGill et al., 2006; Villéger, 2011; Mouillot et al., 2013) el cual permite conocer el desempeño de los organismos y como pueden estar relacionados con la estabilidad de los ecosistemas (resistencia y resiliencia). Este funcionamiento depende de las modificaciones que experimentan los corales a lo largo de su ciclo de vida, las cuales están relacionadas con los atributos morfológicos y fisiológicos de las especies (Darling et al., 2010; Denis et al., 2017). La funcionalidad física de los arrecifes depende de tres propiedades fundamentales de cada una de las especies que componen el ensamble coralino: la cobertura de coral (abundancia), la calcificación (capacidad de acumular CaCO<sub>3</sub>) y la complejidad estructural (González-Barrios y Álvarez-Filip, 2018). Por lo que es importante para hacer evaluaciones rápidas de la condición de los arrecifes de coral, así como para identificar las especies clave de acuerdo con su fenotipo (morfología) que puedan mantener los procesos y propiedades del ecosistema (Hooper et al., 2005; Díaz et al., 2016). En consecuencia, la funcionalidad física de los arrecifes favorece una alta diversidad de taxones asociados a través de la provisión de hábitats heterogéneos que permiten la regulación de procesos ecológicos como el reclutamiento, la competencia y la depredación (Pratchett et al. 2008, Graham y Nash 2013; Hughes et al., 2017; Richardson et al., 2017; Cabral-Tena et al., 2018; González-Barrios y Álvarez-Filip, 2018).

Los peces arrecifales se encuentran entre los habitantes más abundantes y conspicuos de los arrecifes coralinos (López-Pérez et al., 2012), en donde son los principales responsables de la transferencia de

energía a lo largo de la cadena trófica (Christensen y Pauly, 1993; Mumby et al., 2004). Por lo que ejercen un control top-down y bottom-up sobre las redes alimentarias e influyen en la estabilidad y el funcionamiento de los ecosistemas (Arias-González et al. 2004; Smith et al., 2010). Además, los peces presentan diversos rasgos como son: tamaño, gremios de alimentación (carnívoros, coralívoros, detritívoros, herbívoros, piscívoros, planctívoros y omnívoros), comportamiento (solitario), movilidad (sedentario, móvil), posición en la columna de agua (pelágico o bentónico) y patrones de actividad (diurno/nocturno). Por ejemplo, los peces herbívoros pueden ayudar a mantener la cobertura de coral al limitar el crecimiento de macroalgas que compiten con los corales por el espacio (Bellwood et al. 2004; Richardson et al., 2020).

Los peces de arrecife exhiben diversos patrones de distribución y abundancia en su asociación con el hábitat arrecifal, y dependen de diferentes sustratos para obtener recursos como alimento, refugio y espacio vital (Dominici-Arosemena y Wolff, 2006). Diversos estudios han indicado que además de la cobertura de coral (Jones et al., 2004; Munday, 2004; Gratwicke y Speight, 2005; Lamy et al., 2016), también la complejidad topográfica (Risk, 1972; Luckhurst y Luckhurst, 1978; Friedlander et al., 2003; Gratwicke y Speight, 2005; Aburto-Oropeza et al., 2015; Almany, 2004) es particularmente importante para explicar la estructura (diversidad y abundancia) de las comunidades de peces residentes. No obstante, pocos estudios han evaluado la relación entre arrecifes de coral y la diversidad de peces en el Pacífico Oriental Tropical mexicano (Rodríguez-Zaragoza et al., 2011; López-Pérez et al., 2013; Sánchez-Caballero et al., 2017; Olán-González et al., 2020).

## 1.1 Antecedentes

En el Caribe, Álvarez-Filip et al. (2013) estimaron la tasa de calcificación de cuatro géneros de corales dominantes (*Acropora*, *Orbicella*, *Undaria*, y *Porites*) teniendo en cuenta la morfología de cada género; los autores señalan que la calcificación y la complejidad estructural varía entre los géneros, siendo *Acropora* el que mostró la mayor tasa de calcificación ( $22.30 \text{ kg m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ ) y rugosidad ( $3.33 \pm 1.31$ ). González-Barrios y Álvarez-Filip (2018) evaluaron la contribución de las especies de coral del Caribe mexicano y su influencia en el funcionamiento de los arrecifes, así como el impacto de la composición de la comunidad coralina. También, en este estudio, determinaron que las especies *Undaria spp.* y *Porites astreoides*, fueron las que mayormente contribuyen en la estructuración bentónica, aunque son especies con menor complejidad tridimensional.



Por otro lado, en el Pacífico mexicano se estimó la contribución funcional de las especies de los corales en donde se destaca la importancia de los pocilopóridos, en donde *P. damicornis* es el principal constructor de arrecifes en la región del sur del Pacífico mexicano. También resaltan la vulnerabilidad de estos arrecifes dado que los corales ramificados son más susceptibles a las perturbaciones ambientales (Cabral-Tena et al., 2020).

En los arrecifes de coral, la alta cobertura coralina, la rugosidad o complejidad estructural del sistema y la diversidad de corales, promueven el aumento de la comunidad íctica en términos de diversidad, riqueza, biomasa y densidad (Risk, 1972; Graham y Nash, 2013; Coker et al., 2014), ya que ayudan a moderar las interacciones de competencia y depredación al proporcionarles alimento y refugio dentro y entre las colonias de coral (Stewart y Jones, 2001; Webster y Hixon, 2000).

Las interacciones entre los corales y los peces que se alimentan de corales, son particularmente importantes en el contexto de las crecientes amenazas a la biodiversidad de los arrecifes de coral, como son la sedimentación, la eutrofización y la sobrepesca (Hughes, 1994; Sebens, 1994). En particular, los coralívoros son sensibles a la disminución de la abundancia de ciertas especies de corales; por lo que se encuentran entre los primeros peces que se ven afectados por la pérdida de cobertura coralina (Wilson et al., 2006; Pratchett et al., 2008). Además, algunos peces coralívoros, son importantes en la regulación de la distribución y abundancia de ciertas especies de coral. Por ejemplo, Cox (1986) demostró que la depredación selectiva de *Chaetodon unimaculatus* tuvo una influencia significativa en el crecimiento, la capacidad competitiva y la zonificación de *Montipora verrucosa* en Kaneohe Bay, Hawaii.

La mayoría de las especies de peces registrados en hábitats de corales pertenecen a las familias Pomacentridae, Gobiidae y Labridae, las cuales no solo son abundantes en estos ecosistemas, sino que también desempeñan un papel importante en la dinámica de los arrecifes, al contar con un amplio espectro de alimentación, entre los que destacan la herbivoría y coralivoría (Coker et al., 2014). Asimismo, se ha documentado que especies de la familia Pomacentridae pueden remover tejido vivo y favorecer el establecimiento de tapetes de algas filamentosas sobre el esqueleto coralino, favoreciendo que pequeños invertebrados puedan hacer uso de estos espacios para alimentarse y establecerse (Hixon, 1997). Además, dentro de la asociación de los peces con los corales, se ha observado que los gobios son altamente especializados, por lo que son vulnerables a perturbaciones, lo que tiene un impacto en sus densidades locales; sin embargo, las damiselas son más cambiantes en términos de su asociación con el número de especies de coral. Esta versatilidad permite que las especies de peces ocupen una amplia gama de hábitats,

lo que conduce a una mayor abundancia y resistencia hacia las reducciones temporales en la abundancia de coral (Munday, 2004).

En el Pacífico Oriental Tropical Rodríguez-Zaragoza et al. (2011) identificaron que las variables ambientales (profundidad), la complejidad topográfica y la disponibilidad de refugios determinan la composición y abundancia de las especies de peces. Así mismo, López-Pérez et al. (2013) demostraron que los conjuntos de peces asociados a arrecifes en Oaxaca experimentan cambios significativos en el espacio y el tiempo, asociados con las características del hábitat y las condiciones climáticas; además de que la abundancia está severamente sesgada por cuatro especies *Thalassoma lucasanum*, *Chromis atrilobata*, *Apogon pacificus* y *Stegastes acapulcoensis*, ya que comprenden casi el 59% de la abundancia de peces. Por otro lado, Sánchez-Caballero et al. (2017), reportaron que en los arrecifes, la distribución de los peces y la estructura de la comunidad están fuertemente vinculadas a la estructura del hábitat, por lo que la reducción de la complejidad del hábitat resultó en la pérdida de riqueza de especies y funciones ecológicas.

Finalmente, Olán-González et al. (2020) realizaron un estudio para analizar la diversidad de peces en los arrecifes de coral del Pacífico Oriental Tropical y los del Atlántico Occidental Tropical, reportando una menor diversidad de corales y riqueza de especies de peces en los arrecifes del POT. También se observó que los peces presentes en Huatulco y La Paz son de tamaño corporal pequeño (<150 mm), en donde la especie con mayor ocurrencia fue *Sargocentron suborbitale* y que estas especies de peces están relacionados con corales ramificados, mientras que los de Puerto Morelos y Veracruz estaban asociados a corales masivos como los del género *Porites*.

## 1.2 Justificación

Se han estudiado los aspectos básicos de la abundancia, distribución y estructura de la comunidad de peces relacionados con los arrecifes de coral, sin embargo, aún son escasas las investigaciones para el Pacífico Oriental Tropical mexicano, por lo que se necesitan más estudios para comprender cómo la funcionalidad física de los arrecifes de coral ha influido en los conjuntos de peces de arrecife. Por consiguiente, en este estudio se evaluó la relación entre el índice de función arrecifal y la biodiversidad de peces en Huatulco, para comprender el estado funcional de las especies de coral según su capacidad para la construcción de arrecifes y el papel que estos juegan para la ictiofauna.

## **1.3 Hipótesis**

La funcionalidad física de un arrecife depende de la configuración del ensamble de especies de coral presente en el sistema. Por ejemplo, un sistema dominado por especies de coral con una tasa de calcificación, complejidad y cobertura coralina altas, resultarán en un arrecife con un índice de función arrecifal (IFA) alto; es decir, será un arrecife con una alta complejidad estructural y tridimensionalidad. Dado que la diversidad y abundancia de la comunidad de peces asociados a arrecifes depende de la complejidad y tridimensionalidad de un arrecife, se espera que en arrecifes con un alto IFA, las métricas de la estructura de comunidad de peces sean altas, a excepción de la dominancia.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

Evaluar la relación entre la funcionalidad física de los arrecifes y la estructura de la comunidad de peces en sistemas localizados en Huatulco, Oaxaca.

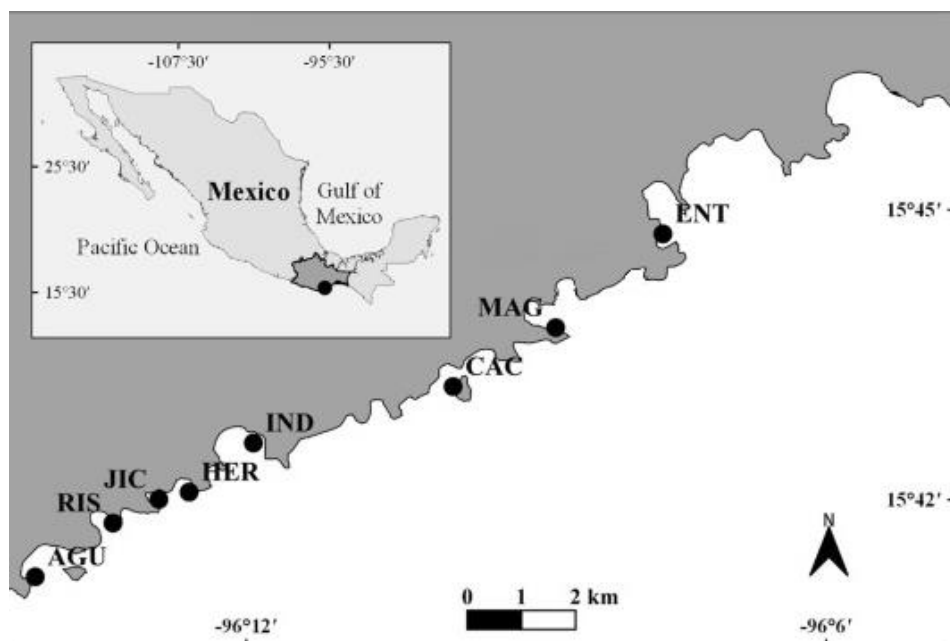
### **1.4.2 Objetivos específicos**

1. Calcular el índice de función arrecifal de los arrecifes de Huatulco para el año 2019.
2. Determinar la composición y estructura de la comunidad de peces en los arrecifes de Huatulco para el año 2019.
3. Relacionar el índice de función arrecifal con la estructura de la comunidad de peces presentes en los arrecifes de Huatulco, Oaxaca.

## Capítulo 2. Metodología

### 2.1 Área de estudio

Los arrecifes en Huatulco se ubican en el borde occidental del Golfo de Tehuantepec, por lo que están bajo la influencia de la piscina cálida del Pacífico. Debido a lo anterior, los arrecifes experimentan altas temperaturas ( $SST > 28^{\circ}C$ ), una salinidad superficial promedio de 34 ups y la presencia de una termoclina somera y estable (20-40 m; Fiedler y Talley, 2006). La fuente de variación más importante es debido a los vientos intermitentes denominados “norte” que producen cambios significativos en la estructura de la columna de agua, lo que puede resultar en caídas de la temperatura de la superficie del mar (SST) de hasta  $8^{\circ}C$ , además de un afloramiento costero que puede resultar en valores bajos de pH ( $\sim 7.5$ ) y estado de saturación de aragonita ( $\sim 1.1$ ) en aguas superficiales (Chapa-Balcorta et al., 2015). A pesar de las condiciones ambientales presentes, el sur del Pacífico mexicano (SPM) alberga algunos de los sistemas de arrecifes de coral mejor desarrollados a lo largo del Pacífico Mexicano (Reyes-Bonilla, 2003), y la mayoría de sus arrecifes poco profundos presentan alta cobertura de coral vivo ( $>50\%$ ; López-Pérez y Hernández-Ballesteros, 2004; López-Pérez et al., 2007).



**Figura 1.** Sitios de estudio a lo largo de la costa de Huatulco. Abreviaturas: AGU, San Agustín; RIS, Riscalillo; JIC, Jicaral; HER, Dos Hermanas; IND, La India; CAC, Isla Cacaluta; MAG, Maguey; ENT, La Entrega. Tomado de “Functional potential of coral assemblages along a typical Eastern Tropical Pacific reef tract”, por Cabral-Tena et al., 2020, Ecological Indicators, 119.

## 2.2 Cobertura de coral

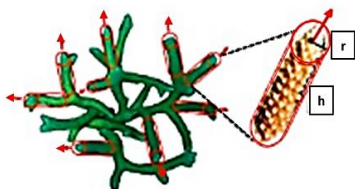
En ocho arrecifes costeros de Huatulco, Oaxaca en el Pacífico Oriental Tropical (Figura 1), se estimó la cobertura de coral por especie. Para tal fin, en cada sitio de muestreo se realizaron cuatro transectos de 25 m de largo en paralelo a la línea de costa con una separación de aproximadamente ~5 m. A lo largo de los transectos se empleó el método de intersección de puntos para determinar la cobertura bentónica (%), incluida la de corales duros (identificados hasta nivel de especie). Adicionalmente, se midieron características morfológicas cuantitativas de las colonias (diámetro de las ramas, radio medio de la colonia, altura de la colonia, entre otros), a partir de lo cual se estimó la tasa de calcificación y la complejidad estructural.

## 2.3 Tasa de calcificación

Se determinó la tasa de calcificación de cada especie de coral como el producto de la tasa de extensión ( $\text{cm año}^{-1}$ ) y la densidad esquelética ( $\text{g cm}^{-3}$ ) del esqueleto del coral (Lough y Cooper, 2011; Carricart-Ganivet et al., 2012). Sin embargo, dado que el depósito de carbonato de calcio varía según la morfología del coral, las tasas de calcificación se calcularon considerando la morfología de cada especie (González-Barrios y Álvarez-Filip, 2018), y la información conocida sobre la tasa de extensión y densidad esquelética (Medellín-Maldonado et al., 2016). A partir de lo anterior, se agruparon las especies según el tipo de crecimiento y la morfología: crecimiento cilíndrico (morfología ramificada y digitiforme); crecimiento ortoedroedrico (por ejemplo, foliosa) y crecimiento paraboloide y hemisférico (masivo).

Se midió, para cada colonia de *Pocillopora*, el diámetro de aproximadamente 20% de las ramas para estimar la tasa de calcificación, ya que estas especies muestran morfología ramificada. La distancia desde la punta de la rama a la que se midió el diámetro dependía de la especie y consideraba un año de crecimiento a lo largo del eje de máxima extensión, que era igual a la tasa media anual de extensión esquelética de la especie (p. ej., *Pocillopora damicornis*:  $2.94 \pm 0.32 \text{ cm año}^{-1}$ ). Finalmente, para estimar las tasas de calcificación de las especies de crecimiento masivo (es decir, *Pavona gigantea* y *Porites panamensis*), se midió el diámetro del eje máximo y la altura de cada colonia ya que estas especies muestran morfología paraboloide (Figura 2; Cabral-Tena et al., 2020).

### Morfología ramificada



**Tasa de calcificación de ramas:**

$$Cr = (\pi * r^2 * h) D$$

donde:

$r$  = radio de rama medio

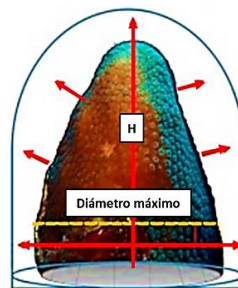
$h$  = extensión esquelética anual media para cada especie ( $\text{cm año}^{-1}$ )

$D$  = densidad media para cada especie ( $\text{g cm}^{-3}$ )

**Tasa de calcificación:**

Tasa de calcificación de ramas \* densidad media de ramas en  $\text{m}^2$

### Morfología Paraboloide



**Tasa de calcificación:**

$$Cr = ((\pi/2) (H + h) (r^2 + h) D - ((\pi/2) H r^2) D$$

donde:

$H$  = altura media de la colonia

$r^2$  = diámetro medio de la colonia

$D$  = densidad media para cada especie ( $\text{g cm}^{-3}$ )

$h$  = extensión esquelética anual media para cada especie ( $\text{cm año}^{-1}$ )

**Figura 2.** Estimación de la tasa de calcificación de las especies de coral ( $\text{kg CaCO}_3 \text{ m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ ) por morfología. La flecha roja representa la dirección del crecimiento de la colonia. Tomado de “A framework for measuring coral species-specific contribution to reef functioning in the Caribbean” (p. 879), por González-Barrios y Álvarez-Filip, 2018, Ecological Indicators, 95(1).

## 2.4 Complejidad estructural

Se determinó la complejidad estructural con base en el índice de rugosidad de la colonia (Álvarez-Filip et al., 2011) y altura máxima de la colonia. El índice de rugosidad es la relación entre la longitud del contorno desde el principio hasta el final de la colonia y la distancia lineal a lo largo del eje máximo de la colonia. Una colonia totalmente plana tiene un índice de rugosidad de 1. Posteriormente, se promedió el índice de rugosidad y la altura de todas las colonias por especie para el cálculo de la complejidad estructural.

$$\text{Rugosidad} = \frac{(\text{Valor mínimo de P de cadena})}{(\text{Valor maximo de P de cadena})} \quad (1)$$

## 2.5 Índice de función arrecifal

El índice de función arrecifal (IFA) se estimó a partir de la contribución funcional de cada especie de coral en el sistema, al integrar su capacidad para crear estructuras tridimensionales complejas a través de la precipitación de carbonato de calcio y la complejidad morfológica (González-Barrios y Álvarez-Filip, 2018). Específicamente, se usaron las estimaciones de la tasa media de calcificación, la rugosidad y la altura de

cada especie. Previo al cálculo, se escalaron las variables usando el valor mínimo y máximo de cada variable mediante la siguiente ecuación:

$$X = \frac{(x - \text{Valor mínimo})}{(\text{Valor máximo} - \text{Valor mínimo})} \quad (2)$$

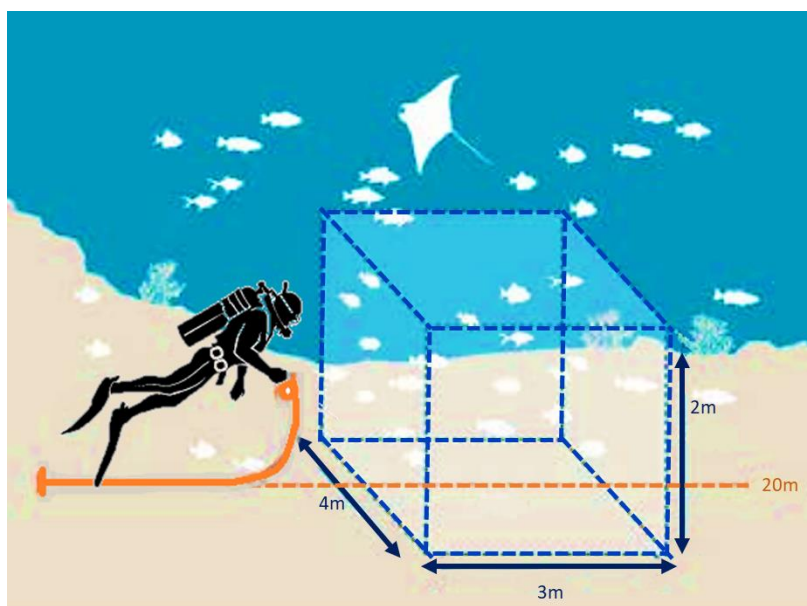
donde x es el valor de cada variable para cada especie. Esta estandarización permitió que las variables tengan valores en un intervalo de 0 a 1. Posteriormente, se promediaron las tres variables escaladas para obtener un coeficiente funcional (CF) específico de la especie. El IFA se obtuvo a partir de la suma del producto de la cobertura de coral vivo y el CF de cada especie mediante la siguiente ecuación:

$$\text{IFA} = \sum \left( \frac{\text{LCC}_i}{100} \right) \text{CF}_i \quad (3)$$

donde  $\text{LCC}_i$  es el porcentaje de cobertura de coral vivo y  $\text{CF}_i$  el coeficiente funcional de la especie i. Para facilitar su interpretación numérica el IFA se transformó a raíz cuarta, por lo que sus valores varían de casi cero en sitios de bajo funcionamiento hasta valores de uno en sitios de alto funcionamiento.

## 2.6 Caracterización de la comunidad de peces

Se realizaron censos visuales a partir de los transectos empleados para determinar la cobertura de corales (ver apartado 2.2). Los transectos de banda comprenden 2m a cada lado del transecto (4m de ancho en total), 2m de altura del fondo a la superficie y aproximadamente de 3m hacia el frente (largo túnel imaginario) hasta recorrer 25m de cinta. A lo largo del túnel imaginario se identifica la fauna de peces y se estimó la cantidad y la talla de los individuos de presentes (López-Pérez et al. 2014; Hernández-Velasco et al., 2018) (Figura 3). Además, se separaron a las especies en conspicuas y crípticas (especies cuyos adultos tienen tallas pequeñas (< 5 cm); Brandl et al., 2018), y se calcularon para cada uno de estos grupos la abundancia, riqueza (Margalef), diversidad de Shannon-Wiener ( $H'$ ), diversidad de Simpson (D), dominancia de Simpson ( $D'$ ) y equitatividad de Pielou ( $J'$ ) (Brower et al., 1998; Krebs, 2014). Sin embargo, para el grupo de los crípticos todos los valores de los índices de estructura de la comunidad de peces fueron cercanos o iguales a 0 (por lo que no se presentaron graficas en la sección de resultados). El cálculo de los índices se llevó a cabo en la paquetería *BiodiversityR* v. 2.13-1 en R Studio.



**Figura 3.** Transecto en banda para censo visual de peces. Las líneas punteadas indican el área que se debe considerar para el censo. Modificado de “Protocolo de Monitoreo para reservas marinas” (p. 24), por Hernández-Velasco et al., 2018, Comunidad y Biodiversidad.

## 2.7 Relación del IFA y los atributos ecológicos de la comunidad de peces

Para evaluar la relación entre el IFA y los índices de estructura de la comunidad de peces, se emplearon modelos lineales ( $y = ax + b$ ), modelos lineales generalizados (GLM's;  $g(\mu) = \eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p$ ), modelos no lineales ( $y = a_1 + a_2 x + a_3 x^2 + \dots + a_n x^n$ ) y modelos aditivos generalizados (GAM's), que siguen la función  $g(\mu) = \eta = B_0 + f(x_1) + f(x_2) + \dots + f(x_p)$ . Todos los modelos fueron generados utilizando la paquetería *stats* versión 4.0.2 (excepto los modelos GAM's, que se generaron con la paquetería *mgvc* versión 1.8-40) en R Studio. Los índices de estructura se obtuvieron a partir de una matriz de abundancia y de biomasa.



## Capítulo 3. Resultados

### 3.1 Comunidad de corales

En los arrecifes de Huatulco se registraron tres géneros de corales (*Pavona*, *Pocillopora*, *Porites*) con las siguientes especies: *Pavona gigantea* (*Pgig*), *Pocillopora capitata* (*Pcap*), *Pocillopora damicornis* (*Pdam*), *Pocillopora effusa* (*Peff*), *Pocillopora grandis* (*Pgra*), *Pocillopora verrucosa* (*Pver*) y *Porites panamensis* (*Ppan*). La especie *P. damicornis* estuvo presente en todos los arrecifes (ocho sitios de muestreo), seguida de *P. capitata* y *P. verrucosa* que estuvieron presentes en siete y seis sitios, respectivamente. Mientras que *P. effusa*, *P. gigantea* y *P. panamensis* solo están presentes en un sitio de muestreo. Además, en los arrecifes de Maguey se registró la mayor riqueza de especies de corales (seis especies), contrario a San Agustín que tiene la menor (solo una especie: *P. damicornis*) (Tabla 1).

**Tabla 1.** Presencia/ausencia de especies de coral por sitio de muestreo en Huatulco, Oaxaca.

Especie	San Agustín	Riscalillo	Jicaral	Dos Hermanas	La India	Isla Cacaluta	Maguey	La Entrega
<i>Pgig</i>							•	
<i>Pcap</i>		•	•	•	•	•	•	•
<i>Pdam</i>	•	•	•	•	•	•	•	•
<i>Peff</i>				•				
<i>Pgra</i>		•	•		•		•	
<i>Pver</i>		•	•	•	•	•	•	
<i>Ppan</i>							•	

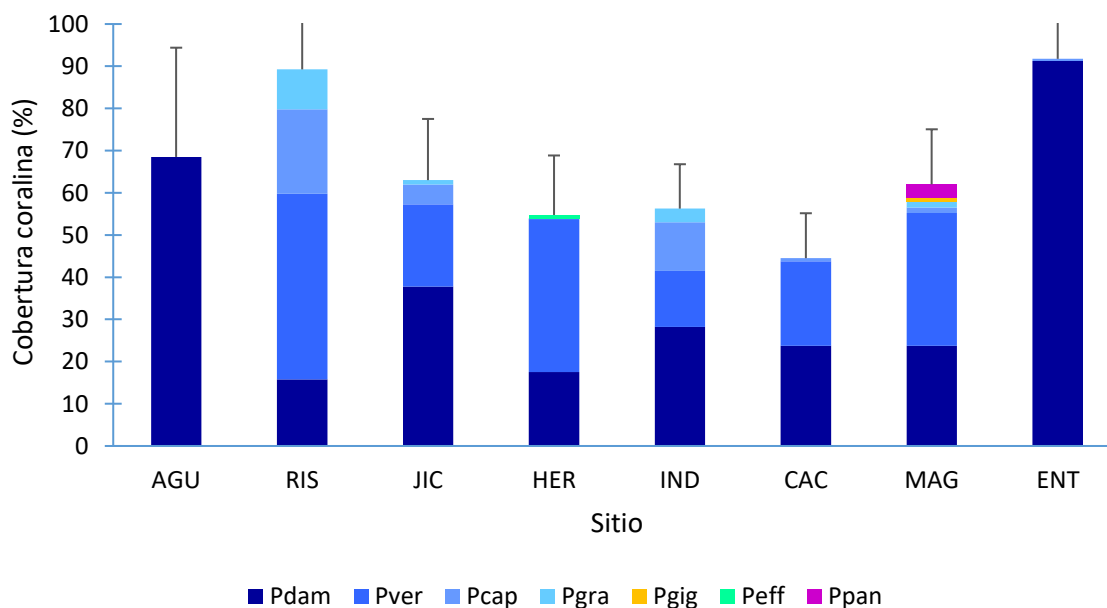
Las especies del género *Pocillopora* tienen tasas de calcificación que van de los 16.21 a los 19.44 Kg  $\text{CaCO}_3\text{m}^{-2}\text{año}^{-1}$  con un promedio de 17.53 Kg  $\text{CaCO}_3\text{m}^{-2}\text{año}^{-1}$ , mientras que *Pavona* y *Porites* presentan 11.30 y 3.40 Kg  $\text{CaCO}_3\text{m}^{-2}\text{año}^{-1}$ , respectivamente (Tabla 2). Para la complejidad estructural de los corales, los valores del índice de rugosidad van de 1.59 (*P. panamensis*) a 3.41 (*P. capitata*) y la altura de los 6.67 cm para *P. panamensis*, a los 24.45 cm de *P. gigantea*. El coeficiente funcional fue mayor para las especies del género *Pocillopora* (especialmente *P. capitata* con 0.77), debido a que presentaban los valores más altos de la tasa de calcificación y de índice de rugosidad (Tabla 2). Mientras que *P. panamensis* en todos

los casos presento los valores más bajos, es por esto que el coeficiente funcional de la especie es muy bajo (0.02), con respecto al resto de las especies (Tabla 2).

**Tabla 2.** Tasa de calcificación promedio ( $\text{kg CaCO}_3 \text{ m}^{-2} \text{ años}^{-1}$ ), complejidad estructural (índice de rugosidad y altura) y coeficiente funcional (CF) para cada especie de las especies de coral.

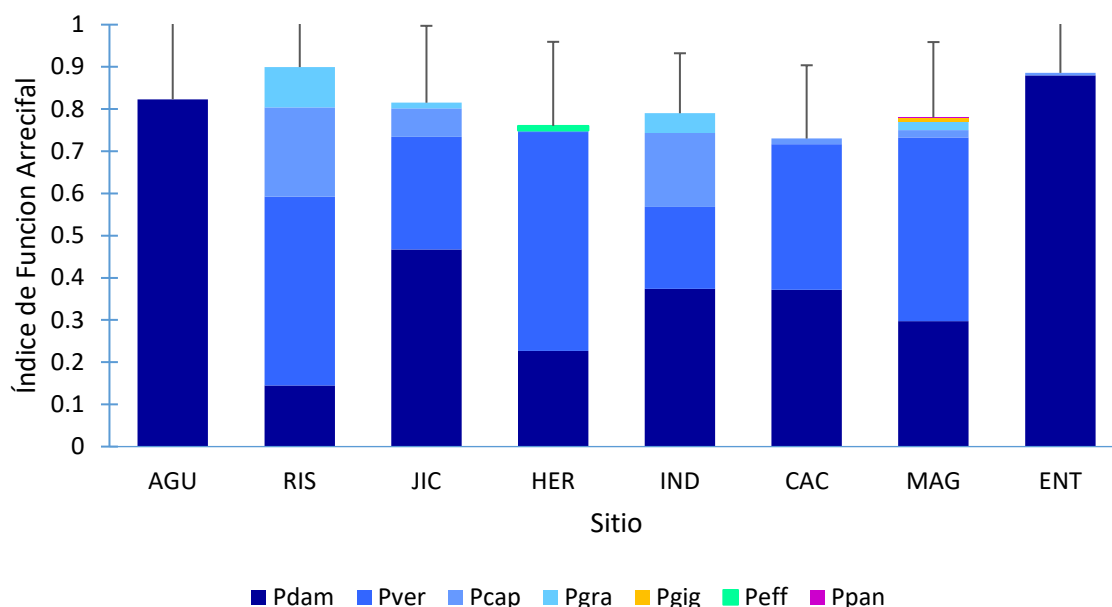
Especies	Tasa de calcificación (Kg $\text{CaCO}_3 \text{ m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ )	Complejidad estructural		FC
		Índice de rugosidad	Altura (cm)	
<i>P. gigantea</i>	11.30	1.97	24.45	0.57
<i>P. capitata</i>	17.61	3.41	16.69	0.77
<i>P. damicornis</i>	17.17	2.87	16.23	0.67
<i>P. effusa</i>	17.21	3.25	16.21	0.73
<i>P. grandis</i>	16.21	3.25	16.21	0.73
<i>P. verrucosa</i>	19.44	2.95	16.93	0.74
<i>P. panamensis</i>	3.40	1.59	6.67	0.02

La cobertura coralina en los arrecifes de Huatulco varió de 44.50 % en Isla Cacaluta a 91.75 % en La Entrega, con un promedio de  $66.25 \pm 17.40$  % (media  $\pm$  DE; Figura 4). *Pocillopora damicornis* mostró <70 % de la cobertura relativa de coral vivo en casi todos los sitios excepto en La Entrega. *Porites panamensis*, *P. gigantea* y *P. effusa* mostraron una baja cobertura coralina relativa y solo se observaron en los arrecifes de Maguey (*P. panamensis* y *P. gigantea*) y Dos Hermanas (*P. effusa*; Figura 4).



**Figura 4.** Cobertura por especie de coral en los arrecifes de Huatulco. Abreviaturas: AGU, San Agustín; RIS, Riscalillo; JIC, Jicaral; HER, Dos Hermanas; IND, La India; CAC, Isla Cacaluta; MAG, Maguey; ENT, La Entrega; Pdam, *Pocillopora damicornis*; Pver, *Pocillopora verrucosa*; Pcap, *Pocillopora capitata*; Pgra, *Pocillopora grandis*; Pgig, *Pavona gigantea*; Peff, *Pocillopora effusa*; Ppan, *Porites panamensis*.

El IFA en cada sitio varió de 0.90 (Riscalillo) a 0.73 (Isla Cacaluta), con un promedio de  $0.81 \pm 0.21$  (media  $\pm$  DE; Figura 5). *Pocillopora damicornis* y *P. verrucosa* representaron >70 % del IFA relativo en casi todos los sitios, excepto en Riscalillo y La India (Figura 4). *Porites panamensis*, *P. effusa* y *P. gigantea* mostraron valores de IFA relativo <2 % en todos los sitios (Figura 5).



**Figura 5.** Índice de función arrecifal por especie para los arrecifes de Huatulco. Abreviaturas: AGU, San Agustín; RIS, Riscalillo; JIC, Jicaral; HER, Dos Hermanas; IND, La India; CAC, Isla Cacaluta; MAG, Maguey; ENT, La Entrega; Pdam, *Pocillopora damicornis*; Pver, *Pocillopora verrucosa*; Pcap, *Pocillopora capitata*; Pgra, *Pocillopora grandis*; Pgig, *Pavona gigante*; Peff, *Pocillopora effusa*; Ppan, *Porites panamensis*.

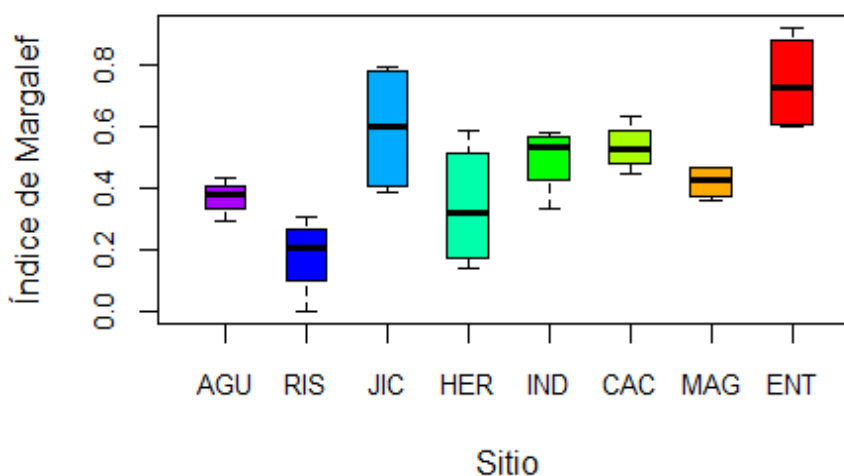
### 3.2 Comunidad de peces

Se registraron 45 especies de peces correspondientes a 37 géneros y 21 familias (Anexo A). Tres especies son consideradas crípticas (*Coryphopterus urosphilus*, *Ophioblennius steindachneri* y *Plagiotremus azaleus*), mientras que las 42 especies restantes son conspicuas. La familia Labridae fue la mejor representada, incluyendo un total de cuatro géneros con siete especies, seguida de la familia Pomacentridae con cuatro géneros y seis especies (entre las dos familias integran casi una tercera parte de las especies enlistadas en este estudio). Los sitios de mayor riqueza ictiofaunística fueron Maguey e Isla Cacaluta con 29 y 27 especies, respectivamente; mientras que Riscalillo fue el sitio con menor riqueza con 9 especies (Anexo A). La especie con la abundancia relativa más alta para los arrecifes muestreados fue *Azurina atrilobata* con 43.18% seguida de *Thalassoma lucasanum* y *Stegastes acapulcoensis* con 25.61 y 18.79%, respectivamente. Mientras que las especies con menor abundancia relativa fueron *Caranx Caballus*,

*Caranx sexfasciatus*, *Epinephelus labriformis*, *Myripristis leiognathos*, *Melichthys niger* y *Novaculichthys taeniourus* con valores  $< 0.01$  (Anexo B). *Stegastes acapulcoensis* presentó la mayor biomasa relativa con 25.47%, seguida de *Prionurus laticlavius* con 16.22% y *Halichoeres nicholsi* con 14.81%. Por su parte, *Coryphopterus urospilus*, *Plagiotremus azaleus* y *Myripristis leiognathos* presentaron valores  $< 0.01\%$  de la biomasa total (Anexo C).

### 3.2.1 Índice de Margalef (abundancia)

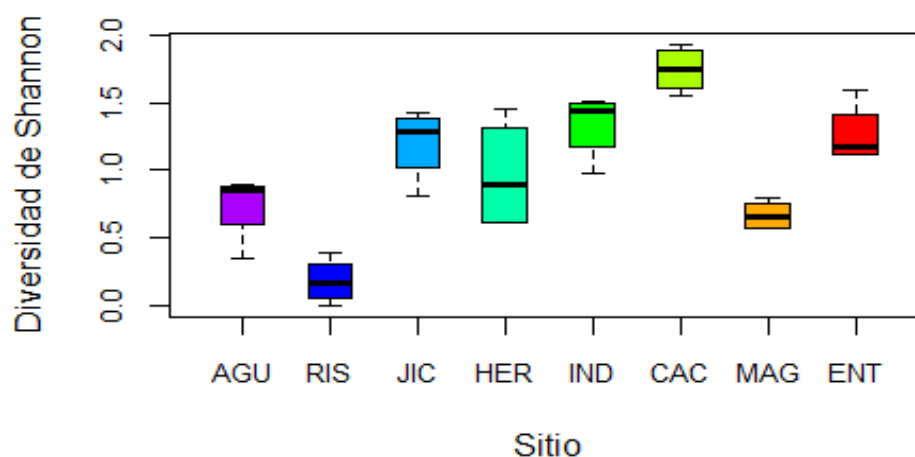
La biodiversidad de la comunidad de peces conspicuos, con base en el índice de Margalef, fluctuó entre 0 (Riscalillo) y 0.92 (La Entrega), con una media de 0.46 (Figura 6), siendo los sitios La Entrega y Jicaral los que registraron los valores mayores (0.74 y 0.59 en promedio y desviación estándar de 0.16 y 0.20, respectivamente), lo que denota una riqueza de especies baja. Para La Entrega, los valores oscilaron de 0.60 a 0.92, con mediana de 0.72. Para Jicaral, los valores van de 0.39 a 0.80, con mediana de 0.60 (Figura 6). Riscalillo registró el valor del índice de Margalef menor con un valor promedio de 0.18 (valores de 0 a 0.30). San Agustín y Maguey presentan una variación baja entre sus valores (menor a 0.15).



**Figura 6.** Índice de Margalef de las especies de peces conspicuos en los arrecifes de Huatulco con mediana (línea negra), desviación estándar y rango (valores mínimo y máximo). Abreviaturas: AGU, San Agustín; RIS, Riscalillo; JIC, Jicaral; HER, Dos Hermanas; IND, La India; CAC, Isla Cacaluta; MAG, Maguey; ENT, La Entrega.

### 3.2.2 Diversidad de Shannon (abundancia)

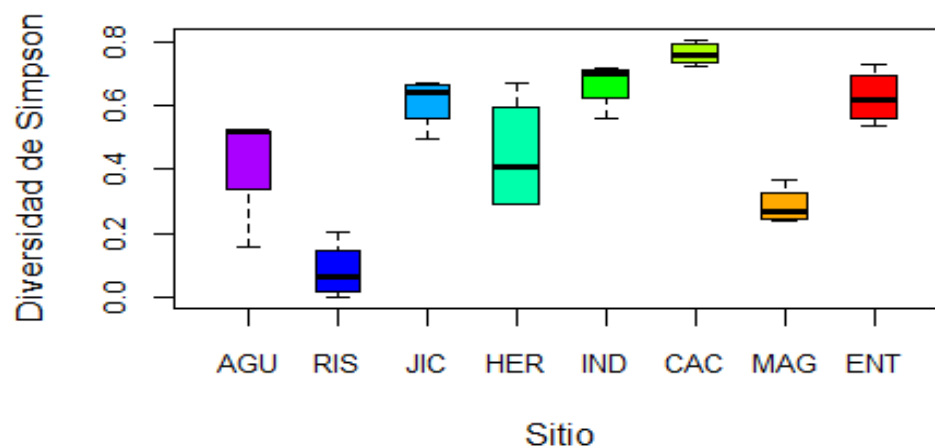
La diversidad de la comunidad de peces conspicuos, en función del índice de Shannon, fluctuó entre 0 (Riscalillo) y 1.93 (Isla Cacaluta), con un promedio de 1.01 (Figura 7), lo que denota una diversidad muy baja. Isla Cacaluta fue el sitio con el valor más alto del índice de diversidad de Shannon ( $1.74 \pm 0.17$  DE). Riscalillo, por su parte, registró el menor valor del índice de diversidad de Shannon ( $0.18 \pm 0.17$  DE). Maguey presentó valores de la diversidad de Shannon entre 0.57 y 0.80 ( $0.67 \pm 0.11$  DE), con mediana de 0.65 (Figura 7).



**Figura 7.** Índice de diversidad de Shannon de las especies de peces conspicuos en los arrecifes de Huatulco con mediana (línea negra), desviación estándar y rango (valores mínimo y máximo). Abreviaturas: AGU, San Agustín; RIS, Riscalillo; JIC, Jicaral; HER, Dos Hermanas; IND, La India; CAC, Isla Cacaluta; MAG, Maguey; ENT, La Entrega.

### 3.2.3 Diversidad de Simpson (abundancia)

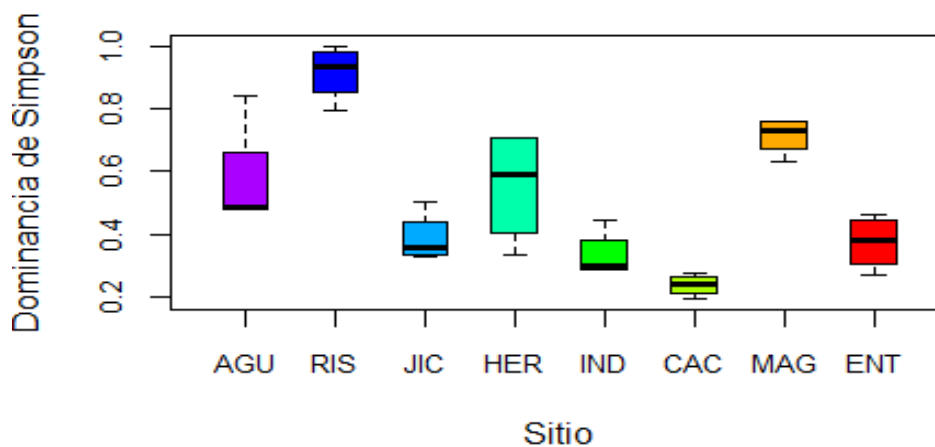
La diversidad de la comunidad de peces conspicuos, de acuerdo con el índice de diversidad de Simpson en los sitios fluctuó, entre 0 (Riscalillo) y 0.81 (Isla Cacaluta), con una media de 0.49 (Figura 8). Isla Cacaluta fue el sitio que registró el mayor valor de índice de diversidad de Simpson ( $0.76 \pm 0.04$  DE), con un intervalo de valores bajo, ya que oscilaron de 0.72 a 0.81 y con mediana de 0.76. Mientras que Riscalillo registró el menor valor del índice de diversidad de Simpson con un valor promedio de  $0.08 \pm 0.09$  DE, presentando una variación entre sus valores de 0.21 y mediana de 0.06 (Figura 8).



**Figura 8.** Índice de diversidad de Simpson de las especies de peces conspicuos en los arrecifes de Huatulco con mediana (línea negra), desviación estándar y rango (valores mínimo y máximo). Abreviaturas: AGU, San Agustín; RIS, Riscalillo; JIC, Jicaral; HER, Dos Hermanas; IND, La India; CAC, Isla Cacaluta; MAG, Maguey; ENT, La Entrega.

### 3.2.4 Dominancia de Simpson (abundancia)

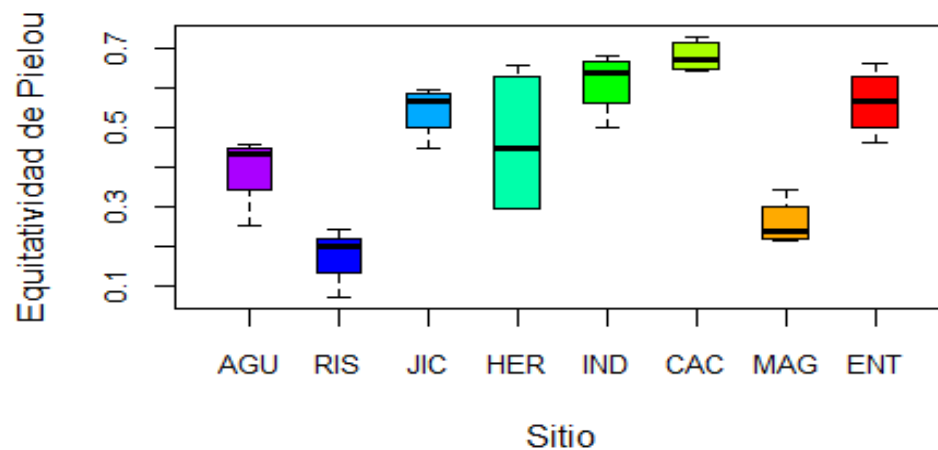
La diversidad de la comunidad de peces conspicuos, de acuerdo con el índice de dominancia de Simpson en los sitios, fluctuó entre 0.19 (Isla Cacaluta) y 1.0 (Riscalillo), con una media de 0.51 (Figura 9). Riscalillo registró el valor del índice mayor ( $0.92 \pm 0.09$  DE), con intervalo de valores bajo, ya que van de 0.79 a 1.0, con mediana de 0.94. Mientras que Isla Cacaluta registró el valor del índice menor con un valor promedio de  $0.24 \pm 0.04$  DE (valores de 0.19 a 0.28), presentando una variación entre sus valores baja de 0.09, mediana de 0.24 (Figura 9).



**Figura 9.** Índice de dominancia de Simpson de las especies de peces conspicuos en los arrecifes de Huatulco con mediana (línea negra), desviación estándar y rango (valores mínimo y máximo). Abreviaturas: AGU, San Agustín; RIS, Riscalillo; JIC, Jicaral; HER, Dos Hermanas; IND, La India; CAC, Isla Cacaluta; MAG, Maguey; ENT, La Entrega.

### 3.2.5 Equitatividad de Pielou (abundancia)

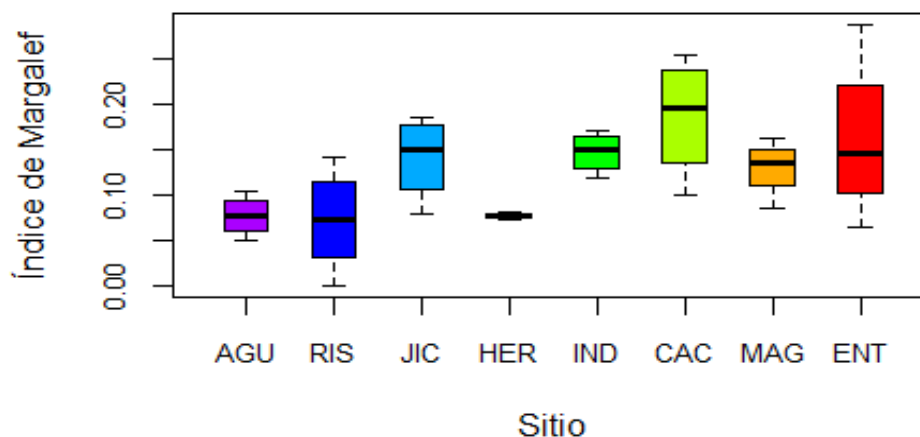
La equitatividad de la comunidad de peces conspicuos, con base en el índice de equitatividad de Pielou en los sitios, fluctuó entre 0.07 (Riscalillo) y 0.73 (Isla Cacaluta), con una media de 0.47, que corresponden a una homogeneidad baja (Figura 10). Los sitios de Isla Cacaluta y La India tuvieron los mayores valores de índice (promedio de  $0.68 \pm 0.05$  DE y promedio de  $0.62 \pm 0.08$  DE, respectivamente), con intervalos de valores medios. Para Isla Cacaluta los valores oscilaron entre 0.65 a 0.73, con mediana de 0.67; mientras que para La India van de 0.50 a 0.68, con mediana de 0.64 (Figura 10). Riscalillo registró el valor menor del índice con un valor promedio de  $0.17 \pm 0.11$  DE (valores de 0.07 a 0.24). Dos Hermanas presenta una variación alta entre sus valores (0.36).



**Figura 10.** Equitatividad de Pielou de las especies de peces conspicuos en los arrecifes de Huatulco con mediana (línea negra), desviación estándar y rango (valores mínimo y máximo). Abreviaturas: AGU, San Agustín; RIS, Riscalillo; JIC, Jicaral; HER, Dos Hermanas; IND, La India; CAC, Isla Cacaluta; MAG, Maguey; ENT, La Entrega.

### 3.2.6 Índice de Margalef (biomasa)

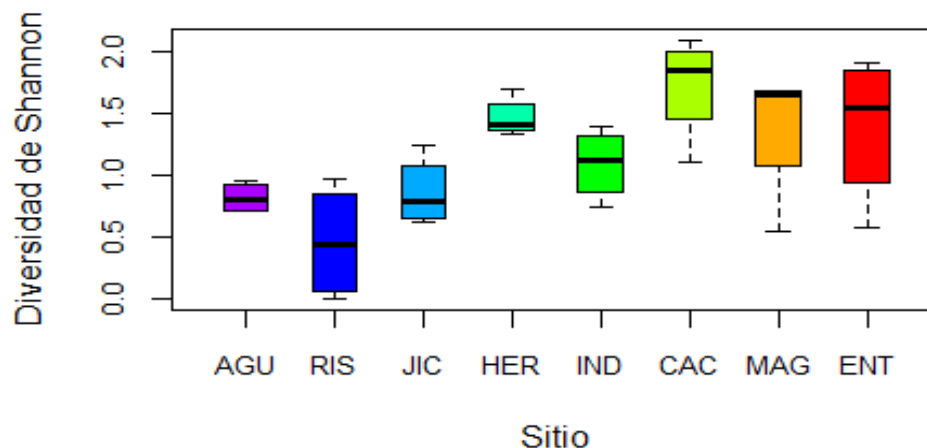
La biodiversidad de la comunidad de peces conspicuos con base en el índice de Margalef fluctuó entre 0 (Riscalillo) y 0.29 (La Entrega), con una media de 0.12 (Figura 11). Los sitios de La Entrega e Isla Cacaluta mostraron valores de índice mayores (promedio  $0.16 \pm 0.093$  DE y promedio de  $0.19 \pm 0.078$  DE, respectivamente), lo que denota una baja riqueza de especies e intervalos de valores amplios. Para La Entrega, los valores variaron de 0.07 a 0.29, con mediana de 0.14; mientras que para Isla Cacaluta oscilaron entre 0.10 a 0.25, con mediana de 0.20 y 0.28 (Figura 11). Riscalillo registró el valor del índice menor con un valor promedio de  $0.07 \pm 0.059$  DE (valores de 0 a 0.14). Dos Hermanas presenta una variación muy baja entre sus valores (0.01).



**Figura 11.** Índice de Margalef de las especies de peces conspicuos en los arrecifes de Huatulco con mediana (línea negra), desviación estándar y rango (valores mínimo y máximo). Abreviaturas: AGU, San Agustín; RIS, Riscalillo; JIC, Jicaral; HER, Dos Hermanas; IND, La India; CAC, Isla Cacaluta; MAG, Maguey; ENT, La Entrega.

### 3.2.7 Diversidad de Shannon (biomasa)

La diversidad de la comunidad de peces conspicuos, con base en el índice de Shannon, de manera global fluctuó entre 0 (Riscalillo) y 2.10 (Isla Cacaluta), con una media de 1.15 (Figura 12). Isla Cacaluta presentó el valor de índice mayor ( $1.73 \pm 0.43$  DE), con intervalos de valores que van de 1.11 a 2.10, con mediana de 1.85. Mientras que Riscalillo registró el valor del índice menor con un valor promedio de  $0.46 \pm 0.47$  DE (valores de 0 a 0.97). San Agustín y Dos Hermanas presentan una variación baja entre sus valores (menor a 0.40; Figura 12).

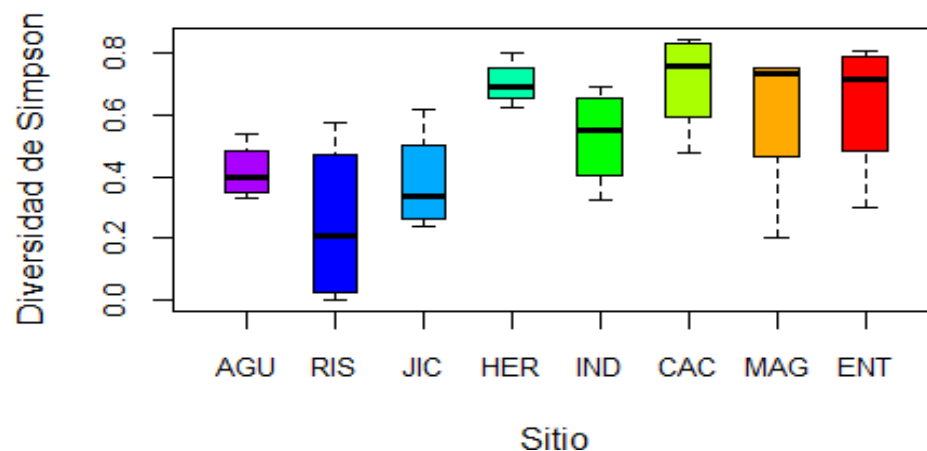


**Figura 12.** Índice de diversidad de Shannon de las especies de peces conspicuos en los arrecifes de Huatulco con mediana (línea negra), desviación estándar y rango (valores mínimo y máximo). Abreviaturas: AGU, San Agustín; RIS, Riscalillo; JIC, Jicaral; HER, Dos Hermanas; IND, La India; CAC, Isla Cacaluta; MAG, Maguey; ENT, La Entrega.



### 3.2.8 Diversidad de Simpson (biomasa)

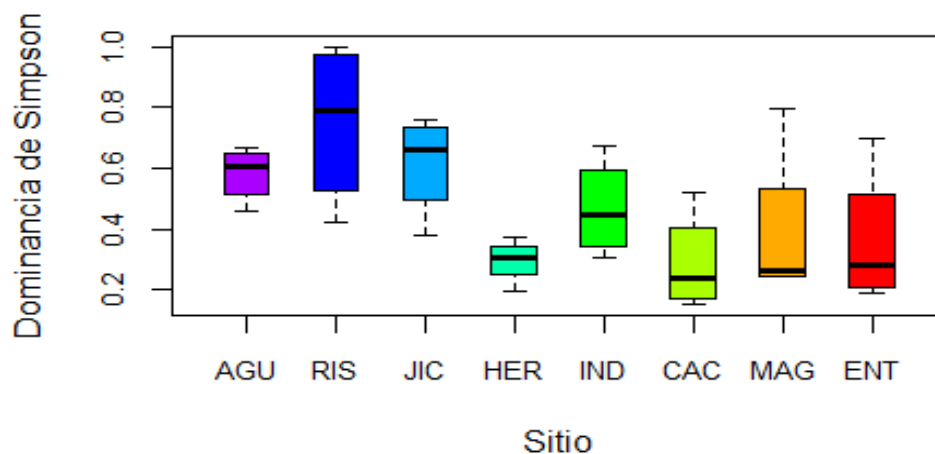
La diversidad de la comunidad de peces conspicuos, de acuerdo con el índice de diversidad de Simpson en los sitios, fluctuó entre 0 (Riscalillo) y 0.85 (Isla Cacaluta), con una media de 0.53 (Figura 13). Isla Cacaluta registró el valor de índice mayor ( $0.71 \pm 0.17$  DE), con un intervalo bajo de valores, ya que van de 0.48 a 0.85, con mediana de 0.76. Mientras que Riscalillo registró el valor menor del índice con un valor promedio de  $0.25 \pm 0.27$  DE (valores de 0 a 0.58), presentando una alta variación entre sus valores de 0.58 y mediana de 0.21 (Figura 13).



**Figura 13.** Índice de diversidad de Simpson de las especies de peces conspicuos en los arrecifes de Huatulco con mediana (línea negra), desviación estándar y rango (valores mínimo y máximo). Abreviaturas: AGU, San Agustín; RIS, Riscalillo; JIC, Jicaral; HER, Dos Hermanas; IND, La India; CAC, Isla Cacaluta; MAG, Maguey; ENT, La Entrega.

### 3.2.9 Dominancia de Simpson (biomasa)

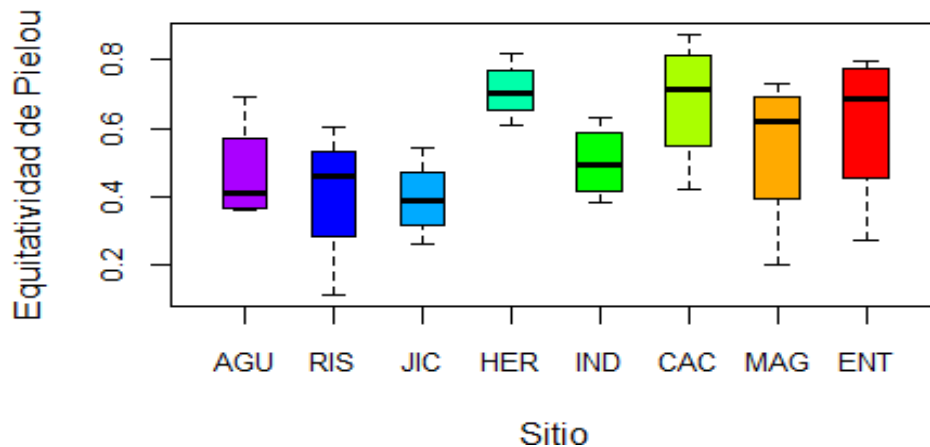
La diversidad de la comunidad de peces conspicuos, de acuerdo con el índice de dominancia de Simpson en los sitios, fluctuó entre 0.15 (Isla Cacaluta) y 1.0 (Riscalillo), con una media de 0.47 (Figura 14). Riscalillo registró el valor de índice mayor ( $0.75 \pm 0.27$  DE), con intervalo de valores alto, ya que van de 0.42 a 1.0, con mediana de 0.79. Isla Cacaluta registró el valor del índice menor con un valor promedio de  $0.29 \pm 0.17$  DE (valores de 0.15 a 0.52), presentando una variación entre sus valores de 0.37, mediana de 0.24 (Figura 14).



**Figura 14.** Índice de dominancia de Simpson de las especies de peces conspicuos en los arrecifes de Huatulco con mediana (línea negra), desviación estándar y rango (valores mínimo y máximo). Abreviaturas: AGU, San Agustín; RIS, Riscalillo; JIC, Jicaral; HER, Dos Hermanas; IND, La India; CAC, Isla Cacaluta; MAG, Maguey; ENT, La Entrega.

### 3.2.10 Equitatividad de Pielou (biomasa)

La equitatividad de la comunidad de peces conspicuos, con base en el índice de equitatividad de Pielou en los sitios, fluctuó entre 0.11 (Riscalillo) y 0.88 (Isla Cacaluta), con una media de 0.54, que corresponden a una homogeneidad baja (Figura 15). Isla Cacaluta y Dos Hermanas registraron los valores de índice mayores ( $0.68 \pm 0.18$  DE y  $0.71 \pm 0.08$  DE, respectivamente). Para Isla Cacaluta, los intervalos de valores van de 0.42 a 0.88, con una mediana de 0.71; mientras que para Dos Hermanas van de 0.61 a 0.82, con una mediana de 0.70 (Figura 15). Riscalillo registró el valor del índice menor con un valor promedio de  $0.39 \pm 0.28$  DE (valores de 0.11 a 0.60), con una variación entre sus valores alta (0.49).



**Figura 15.** Equitatividad de Pielou de las especies de peces conspicuos en los arrecifes de Huatulco con mediana (línea negra), desviación estándar y rango (valores mínimo y máximo). Abreviaturas: AGU, San Agustín; RIS, Riscalillo; JIC, Jicaral; HER, Dos Hermanas; IND, La India; CAC, Isla Cacaluta; MAG, Maguey; ENT, La Entrega.

### 3.3 Relación entre IFA y los índices de la comunidad de peces

#### 3.3.1 Modelos lineales (abundancia)

Los modelos lineales explicaron, en general, menos del 12% de la varianza de los datos, siendo el modelo obtenido con el índice de Shannon como variable dependiente el que mayor porcentaje de variabilidad de los datos explica; por su parte, el modelo obtenido del índice de Margalef como variable dependiente es el que menos porcentaje de variación explicó (Tabla 3).

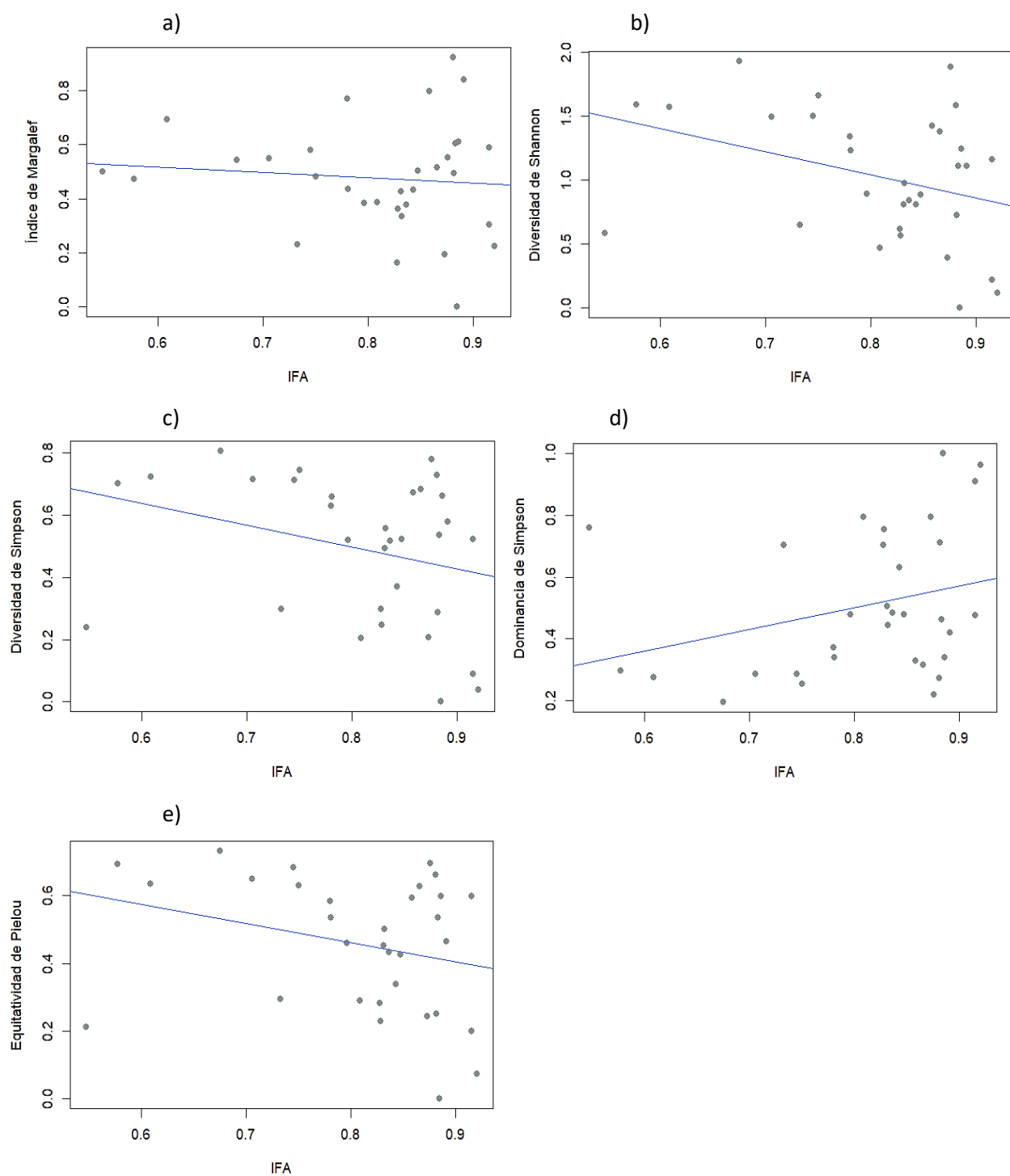
Los modelos, en general, evidenciaron que la relación entre el IFA y la estructura de la comunidad fue negativa, a excepción del modelo obtenido con la dominancia de Simpson como variable dependiente que presenta una pendiente positiva (Figura 16).

La diversidad de Shannon presenta la pendiente más marcada con un valor de - 1.8052 mientras que para el índice de Margalef la pendiente es baja con un valor de - 0.1968 (Figura 16).

Las variables predictoras mostraron valores no significativos con respecto a los índices comunitarios ( $p\text{-value} > 0.05$ ), lo que sugiere que los cambios en los índices de la comunidad de peces no están relacionados linealmente con el IFA (Tabla 3).

**Tabla 3.** Modelos lineales para cada uno de los índices de la comunidad de peces, con su  $p\text{-value}$  y  $R^2$ .

	Intercepto (a)	Pendiente (b)	p-value	R <sup>2</sup>
Índice de Margalef	0.6358	- 0.1968	0.6040	0.00907
Diversidad de Shannon	2.4859	- 1.8052	0.0525	0.11960
Diversidad de Simpson	1.0608	- 0.7028	0.1025	0.08638
Dominancia de Simpson	-0.0607	0.7027	0.1025	0.08638
Equitatividad de Pielou	0.9137	- 0.5654	0.1227	0.07758



**Figura 16.** Modelos lineales del IFA con el índice de Margalef (a), diversidad de Shannon (b), diversidad de Simpson (c), dominancia de Simpson (d) y equitatividad de Pielou (e).

### 3.3.2 Modelos Lineales Generalizados (GLM) (abundancia)

Los GLM explicaron, en general, menos del 12% de la varianza de los datos, siendo el modelo obtenido con el índice de Shannon como variable dependiente el que mayor porcentaje de variabilidad de los datos explica (Tabla 4). No obstante, el valor de p indica que las variables predictoras no son significativas, lo que sugiere que los cambios en los índices de la comunidad de peces no están relacionados linealmente con el IFA (Tabla 4). Los gráficos de residuos versus valores pronosticados muestran cómo los residuos presentan una ligera tendencia a la media, sobre todo para el índice de Margalef. Por lo que, con esto se cumple para todos los casos la condición de independencia y normalidad (Anexo D).

**Tabla 4.** Modelos lineales generalizados para cada uno de los índices de la comunidad de peces.

	Intercepto (a)	Pendiente (b)	Devianza nula	Devianza residual	Criterio de información de Akaike (AIC)	Pseudo R <sup>2</sup>
<b>Índice de Margalef</b>	0.6358	- 0.1968	1.2624	1.2509	-6.9278	0.00910
<b>Diversidad de Shannon</b>	2.4859	-1.8052	8.0585	7.0947	48.6080	0.11960
<b>Diversidad de Simpson</b>	1.0608	-0.7028	1.6912	1.5451	-0.1677	0.08638
<b>Dominancia de Simpson</b>	-0.0607	0.7027	1.6912	1.5451	-0.1677	0.08638
<b>Equitatividad de Pielou</b>	0.9137	-0.5654	1.2187	1.1241	-10.3480	0.07758

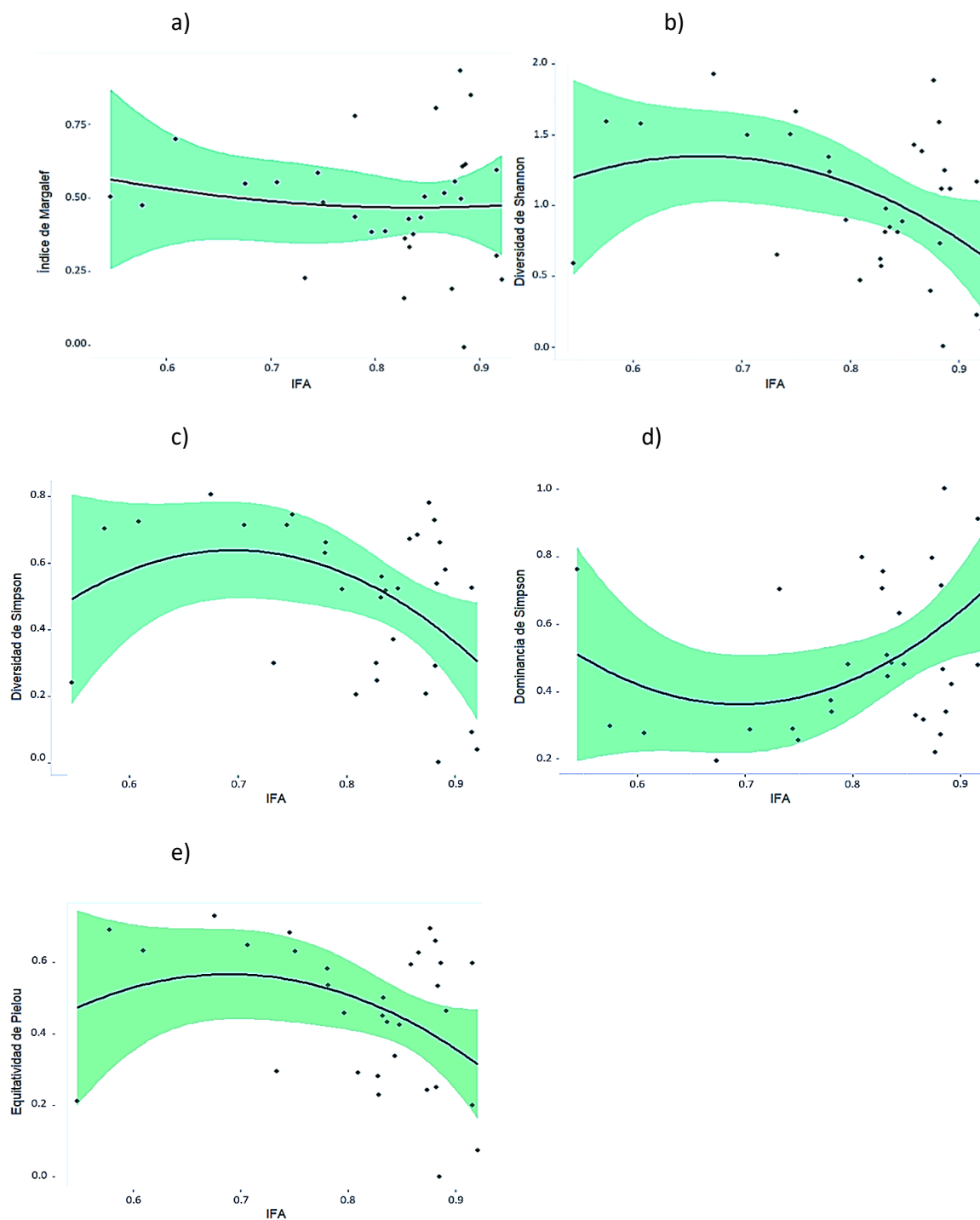
### 3.3.3 Modelos no lineales (abundancia)

Estos modelos explicaron, en general, menos del 18 % de la varianza de los datos, siendo los modelos obtenidos para la diversidad de Simpson y la dominancia de Simpson como variables dependientes los que mayor porcentaje de variabilidad de los datos explican (aproximadamente 17%). Por su parte, el modelo obtenido del índice de Margalef solo explica el 1% (Tabla 5). Sin embargo, el valor de p indica que las variables predictoras no son significativas, lo que sugiere que los cambios en los índices de la comunidad de peces no están relacionados polinomialmente con el IFA (Tabla 5).

**Tabla 5.** Modelos no lineales para cada uno de los índices de la comunidad de peces.

	Intercepto (a)	Pendiente (b)	(c)	P-value	R <sup>2</sup>
<b>Índice de Margalef</b>	0.4765	- 0.1070	0.0640	0.8354	0.01232
<b>Diversidad de Shannon</b>	1.0253	- 0.9817	- 0.6302	0.0684	0.16890
<b>Diversidad de Simpson</b>	0.4921	- 0.3822	- 0.3866	0.0617	0.17480
<b>Dominancia de Simpson</b>	0.5078	0.3822	0.3866	0.0617	0.17480
<b>Equitatividad de Pielou</b>	0.4562	- 0.3074	- 0.2734	0.1143	0.13890

Los modelos, en general, evidenciaron que la relación entre el IFA y la estructura de la comunidad fue negativa, a excepción del índice de Margalef y la dominancia de Simpson que presenta una tendencia positiva lo que indica que para estos índices los valores de ambas variables tienden a incrementarse juntos (Figura 17).



**Figura 17.** Modelos no lineales del IFA con el índice de Margalef (a), diversidad de Shannon (b), diversidad de Simpson (c), dominancia de Simpson (d) y equitatividad de Pielou (e).

### 3.3.4 Modelos Aditivos Generalizados (GAM) (abundancia)

Los modelos aditivos generalizados obtenidos para los diferentes índices explican menos del 32 % de la varianza de los datos, siendo el modelo con la variable diversidad de Shannon como variable dependiente el que explica el mayor porcentaje (31.5 %, Tabla 6). No obstante, el valor de p indica que las variables predictoras no son significativas, lo que sugiere que los residuos se distribuyen aleatoriamente (Tabla 7).

Los GAM's obtenidos presentaron una incertidumbre de -0.4 a 0.4 (índice de Margalef), -1 a 1.5 (diversidad de Shannon), -0.6 a 0.6 (diversidad de Simpson), 0.6 a 0.6 (dominancia de Simpson) y -0.4 a 0.6 (equitatividad de Pielou; Figura 18).

El análisis de residuales de los GAM's de las variables predictoras, mostraron que los puntos no tienen una distribución normal (excepto la equitatividad de Pielou) ni acampanada, tampoco siguen un patrón lineal, pero si se distribuyen casi todos uniformemente alrededor de cero (Anexo E, F, G, H, I).

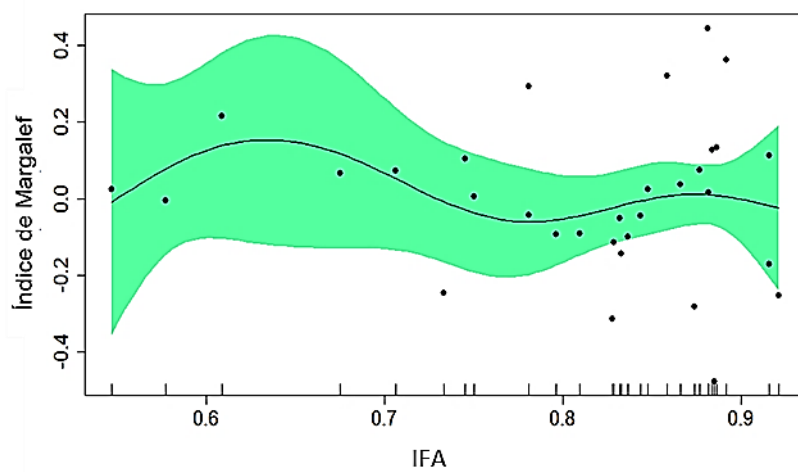
**Tabla 6.** Relación entre el IFA y los índices de estructura de la comunidad de peces, a partir de modelos aditivos generalizados.

	a	b	GCV	Devianza explicada (%)
<b>Índice de Margalef</b>	0.4766	3.99	0.0526	4.85
<b>Diversidad de Shannon</b>	1.0254	3.99	0.2421	31.5
<b>Diversidad de Simpson</b>	0.4921	3.99	0.0532	28.2
<b>Dominancia de Simpson</b>	0.5079	3.99	0.0532	28.2
<b>Equitatividad de Pielou</b>	0.4563	3.99	0.0399	25.3

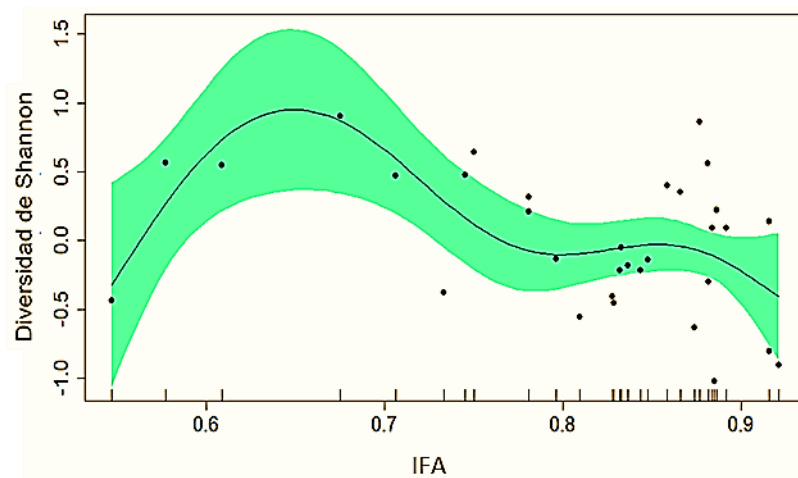
**Tabla 7.** Funciones bases (Suavizado) para cada uno de los índices de la comunidad de peces con su p-value.

	k'	Edf	k-index	p-value
<b>Índice de Margalef</b>	4	3.99	0.97	0.35
<b>Diversidad de Shannon</b>	4	3.99	0.97	0.36
<b>Diversidad de Simpson</b>	4	3.99	1.01	0.46
<b>Dominancia de Simpson</b>	4	3.99	1.01	0.52
<b>Equitatividad de Pielou</b>	4	3.99	1.13	0.75

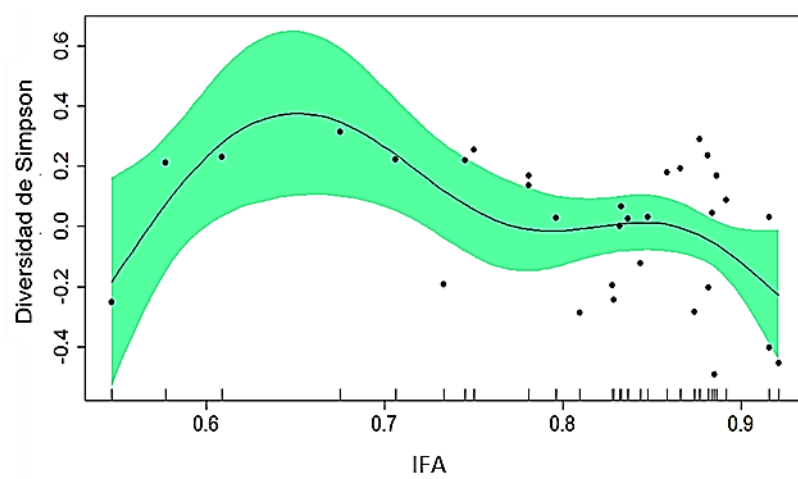
a)



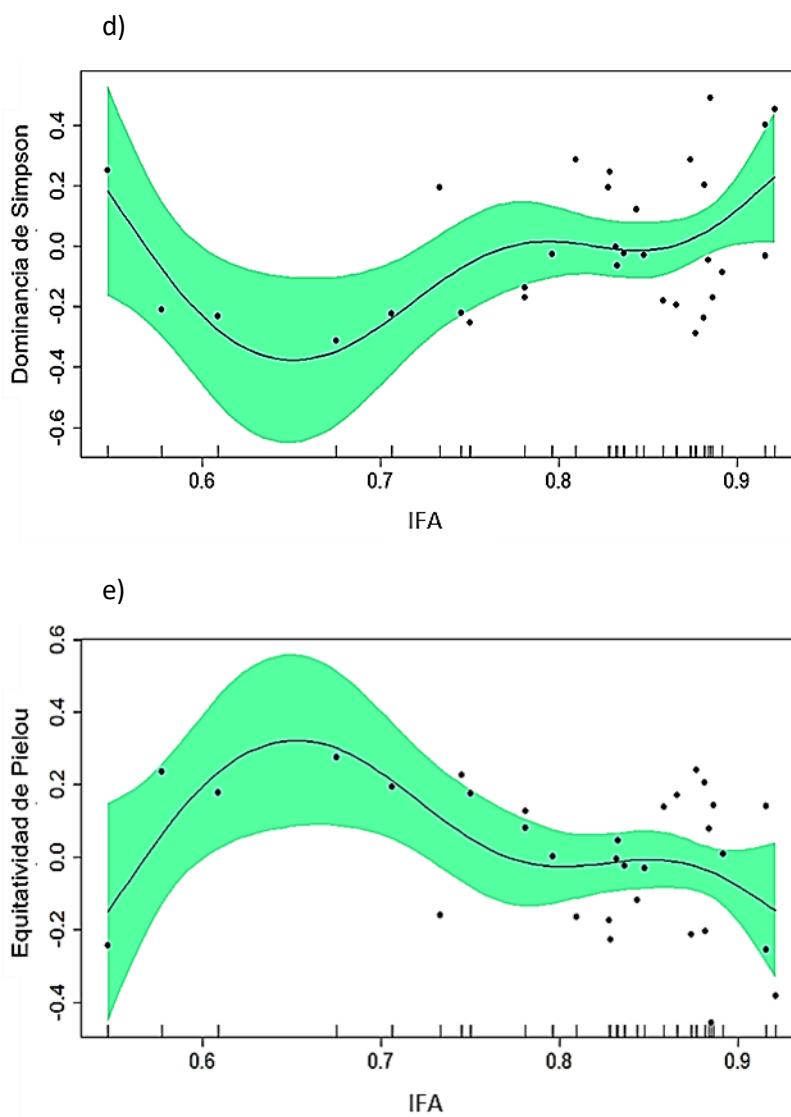
b)



c)







**Figura 18.** Modelos aditivos generalizados del IFA con el índice de Margalef (a), diversidad de Shannon (b), diversidad de Simpson (c), dominancia de Simpson (d) y equitatividad de Pielou (e).

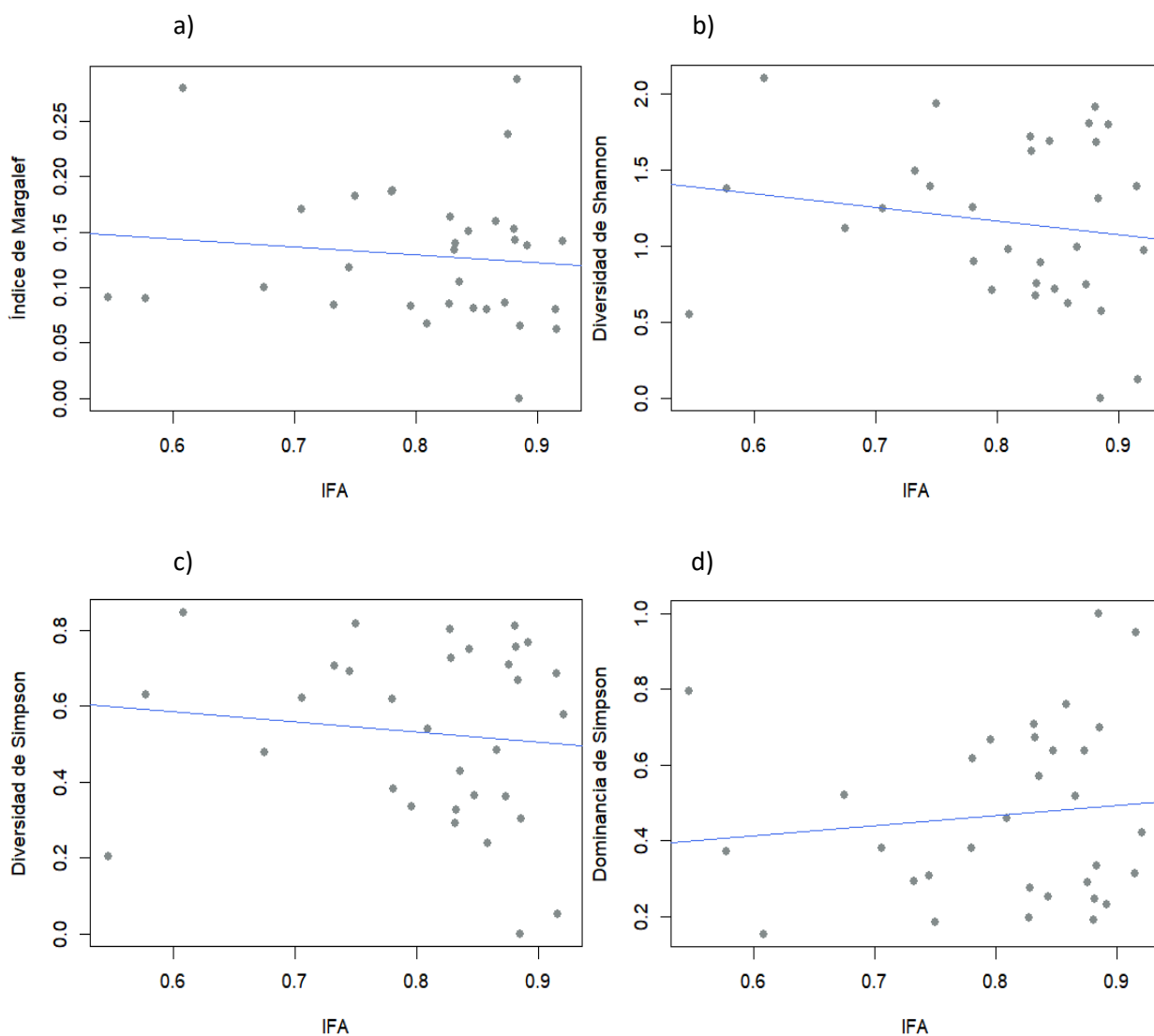
### 3.3.5 Modelos lineales (biomasa)

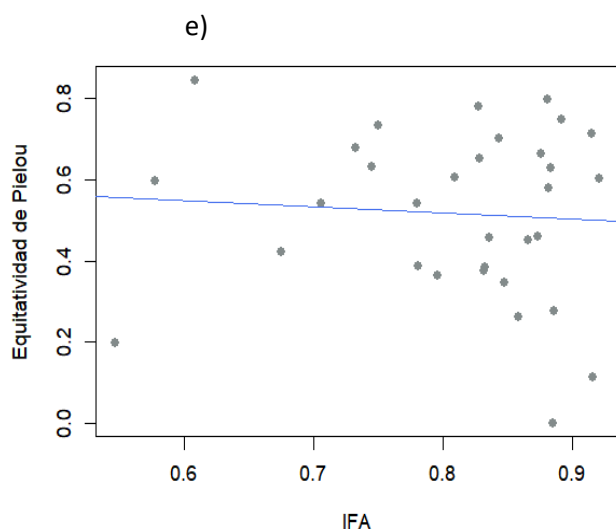
Los modelos lineales explicaron, en general, menos del 3% de la varianza de los datos, siendo el modelo obtenido con el índice de Shannon como variable dependiente el que mayor porcentaje de variabilidad de los datos explica (2%). Por su parte, el modelo obtenido utilizando la equitatividad de Pielou como variable dependiente el que menos porcentaje de variación explico (0.5%; Tabla 8). Los modelos, en general, evidenciaron que la relación entre el IFA y la estructura de la comunidad de peces fue negativa, a excepción de la dominancia de Simpson que presenta una pendiente positiva (Figura 19). El modelo que considera a La diversidad de Shannon como variable dependiente presenta la pendiente más pronunciada con un valor de - 0.9038 mientras que, en el modelo que considera el índice de Margalef como variable dependiente,

la pendiente es baja con un valor de - 0.0723 (Figura 19). Las variables predictoras mostraron valores no significativos con respecto a los índices comunitarios ( $p\text{-value} > 0.05$ ), lo que se sugiere que los cambios en los índices de la comunidad de peces no están relacionados linealmente con el IFA (Tabla 8).

**Tabla 8.** Modelos lineales para cada uno de los índices de la comunidad de peces, con su  $p\text{-value}$  y  $R^2$ .

	Intercepto (a)	Pendiente (b)	p-value	R <sup>2</sup>
Índice de Margalef	0.1875	- 0.0723	0.5416	0.01255
Diversidad de Shannon	1.8867	- 0.9038	0.3664	0.02727
Diversidad de Simpson	0.7473	- 0.2684	0.5381	0.01276
Dominancia de Simpson	0.2527	0.2684	0.5381	0.01276
Equitatividad de Pielou	0.6435	- 0.1565	0.6881	0.00545





**Figura 19.** Modelos lineales del IFA con el índice de Margalef (a), diversidad de Shannon (b), diversidad de Simpson (c), dominancia de Simpson (d) y equitatividad de Pielou (e).

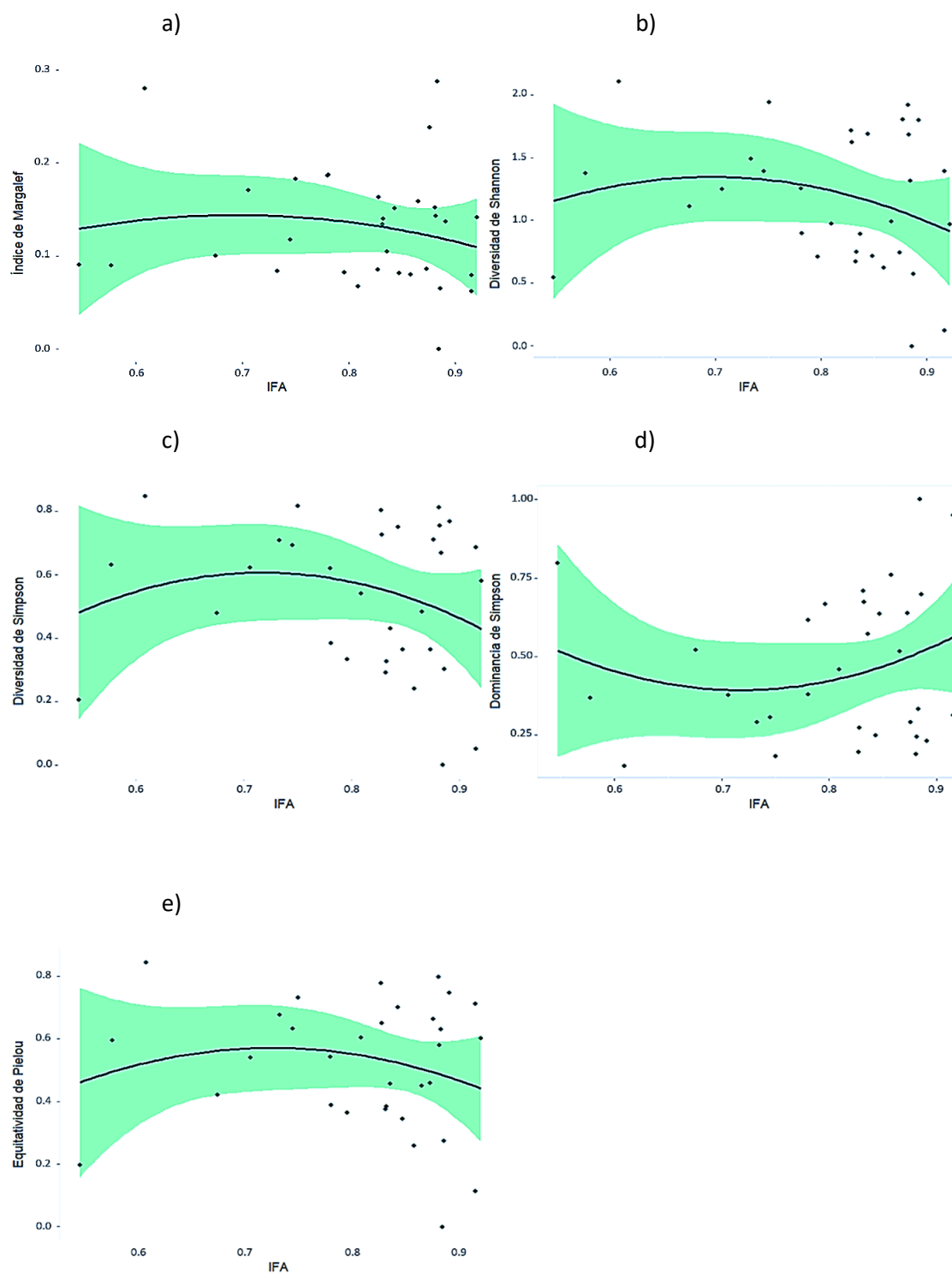
### 3.3.6 Modelos Lineales Generalizados (GLM) (biomasa)

Los GLM explicaron, en general, menos del 3% de la varianza de los datos, siendo el modelo obtenido con el índice de Shannon como variable dependiente el que mayor porcentaje de variabilidad de los datos explica (Tabla 9). No obstante, el valor de  $p$  indica que la relación de las variables dependientes con las variables predictoras no es significativa, lo que sugiere que los cambios en los índices de la comunidad de peces no están relacionados linealmente con el IFA (Tabla 9). Los gráficos de residuales cumplen la condición de independencia y normalidad para todos los casos (Anexo I).

**Tabla 9.** Modelos lineales generalizados para cada uno de los índices de la comunidad de peces.

	Intercepto (a)	Pendiente (b)	Devianza nula	Devianza residual	Criterio de información de Akaike (AIC)	Pseudo $R^2$
Índice de Margalef	0.1875	-0.0723	0.1233	0.1217	-81.4830	0.01257
Diversidad de Shannon	1.8867	-0.9038	8.8599	8.6183	54.8330	0.02727
Diversidad de Simpson	0.7473	-0.2684	1.6691	1.6478	1.8901	0.01276
Dominancia de Simpson	0.2527	0.2684	1.6691	1.6478	1.8901	0.01276
Equitatividad de Pielou	0.6435	-0.1565	1.3295	1.3223	-5.1519	0.00541

### 3.3.7 Modelos no lineales (biomasa)



**Figura 20.** Modelos no lineales del IFA con el índice de Margalef (a), diversidad de Shannon (b), diversidad de Simpson (c), dominancia de Simpson (d) y equitatividad de Pielou (e).

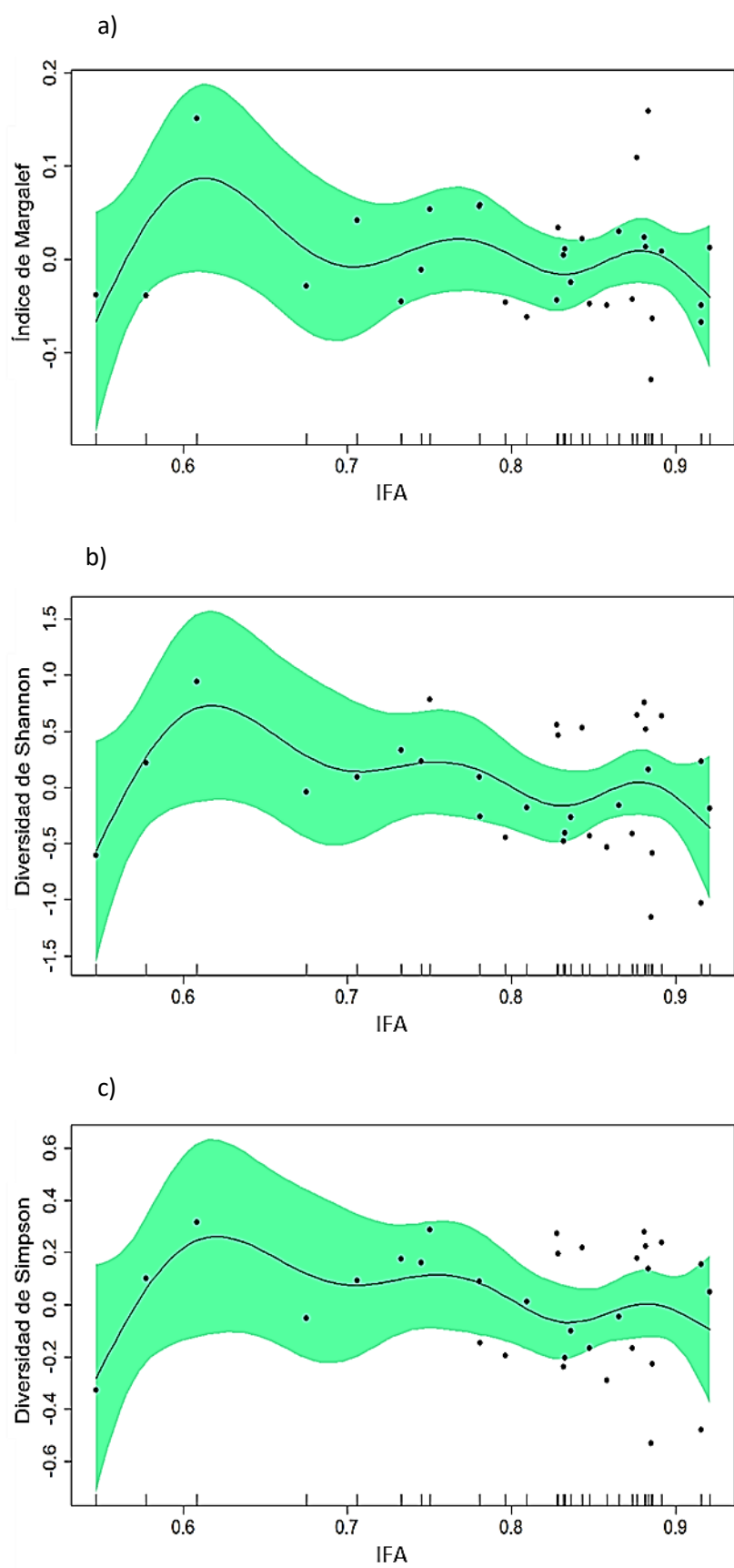
Estos modelos explicaron, en general, menos del 6 % de la varianza de los datos, siendo el modelo obtenido con la diversidad de Shannon como variable dependiente el que mayor porcentaje de variabilidad de los datos explican (aproximadamente 6%), por su parte, el modelo obtenido con el índice de Margalef como variable dependiente solo explica el 2% de la varianza de los datos (Tabla 10). Sin embargo, el valor de p indica que las variables predictoras no tienen una relación significativa con las variables dependientes, sugiriendo que los cambios en los índices de la comunidad de peces no están relacionados polinomialmente con el IFA (Tabla 10). Los modelos, en general, evidenciaron que la relación entre el IFA y la estructura de la comunidad fue negativa, lo que indica que la variable IFA aumenta mientras los valores de los índices disminuyen, a excepción de la dominancia de Simpson que presenta una tendencia positiva (Figura 20).

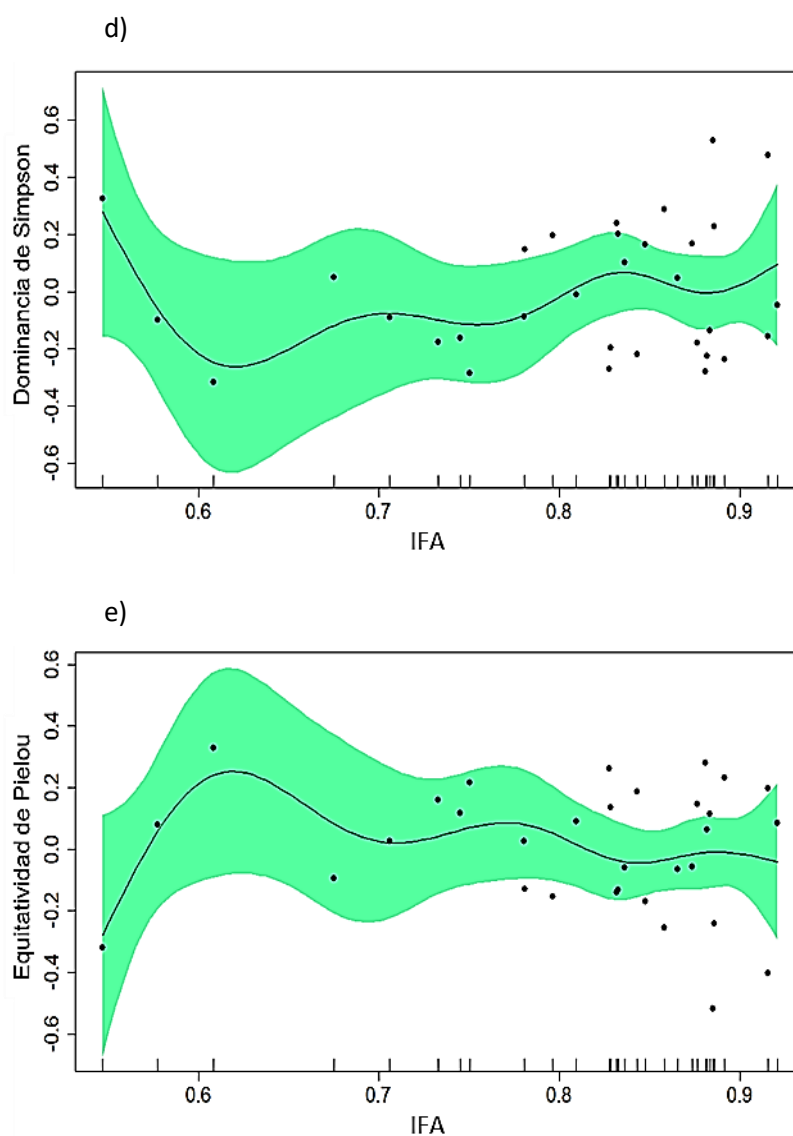
**Tabla 10.** Modelos no lineales para cada uno de los índices de la comunidad de peces.

	Intercepto (a)	Pendiente (b)	(c)	P-value	R <sup>2</sup>
<b>Índice de Margalef</b>	0.1290	- 0.0393	- 0.0390	0.6936	0.02492
<b>Diversidad de Shannon</b>	1.1554	- 0.4915	- 0.5022	0.4353	0.05574
<b>Diversidad de Simpson</b>	0.5302	- 0.1459	- 0.2505	0.4728	0.05035
<b>Dominancia de Simpson</b>	0.4698	0.1459	0.2505	0.4728	0.05035
<b>Equitatividad de Pielou</b>	0.5169	- 0.0851	- 0.2002	0.5913	0.03559

### 3.3.8 Modelos Aditivos Generalizados (GAM) (biomasa)

Los modelos aditivos generalizados obtenidos para los diferentes índices, explican más del 14 % de la varianza de los datos, siendo el modelo con la diversidad de Shannon como variable dependiente el que explica el mayor porcentaje (19.1 %, Tabla 11). No obstante, el valor de p indica que las variables predictoras no tienen una relación significativa con las variables dependientes, lo que sugiere que los residuos se distribuyen aleatoriamente (Tabla 12). Los GAM's obtenidos presentaron una incertidumbre de -0.2 a 0.2 (índice de Margalef), -1.5 a 1.5 (diversidad de Shannon), -0.6 a 0.6 (diversidad de Simpson), 0.6 a 0.6 (dominancia de Simpson) y -0.6 a 0.6 (equitatividad de Pielou; Figura 21). El análisis de residuales de los GAM's de las variables predictoras, mostraron que los puntos no tienen una distribución normal ni acampanada (excepto la diversidad de Simpson y la dominancia de Simpson, que presentan asimetría negativa y positiva, respectivamente), tampoco se distribuyen uniformemente alrededor de cero y no siguen un patrón lineal (Anexo K, L, M, N, Ñ).





**Figura 21.** Modelos aditivos generalizados del IFA con el índice de Margalef (a), diversidad de Shannon (b), diversidad de Simpson (c), dominancia de Simpson (d) y equitatividad de Pielou (e).

**Tabla 11.** Relación entre el IFA y los índices de estructura de la comunidad de peces, a partir de modelos aditivos generalizados.

	a	b	GCV	Devianza explicada (%)
<b>Índice de Margalef</b>	0.1290	5.96	0.0052	17.1
<b>Diversidad de Shannon</b>	1.1554	5.96	0.3659	19.1
<b>Diversidad de Simpson</b>	0.5302	5.96	0.0715	16.1
<b>Dominancia de Simpson</b>	0.4698	5.96	0.0715	16.1
<b>Equitatividad de Pielou</b>	0.5169	5.96	0.0579	14.7

**Tabla 12.** Funciones bases (Suavizado) para cada uno de los índices de la comunidad de peces con su p-value.

	<b>k'</b>	<b>edf</b>	<b>k-index</b>	<b>p-value</b>
<b>Índice de Margalef</b>	6	5.96	1.28	0.91
<b>Diversidad de Shannon</b>	6	5.96	0.88	0.19
<b>Diversidad de Simpson</b>	6	5.96	0.92	0.32
<b>Dominancia de Simpson</b>	6	5.96	0.92	0.31
<b>Equitatividad de Pielou</b>	6	5.96	0.94	0.26



## Capítulo 4. Discusión

---

### 4.1 Comunidad de corales

#### 4.1.1 Riqueza de corales

En este estudio se reportaron siete especies de coral para los arrecifes de Huatulco, la mayoría de las especies pertenecen al género *Pocillopora*. Estos datos concuerdan con lo reportado por Cabral-Tena et al. (2020) quienes además registraron a *Pocillopora meandrina* y *Pavona varians*, aunque no registraron *Pocillopora effusa* reportada en este estudio, en Clipperton (Combosch et al., 2008) y en los sistemas arrecifales de Guerrero (Reyes-Bonilla et al., 2010; López-Pérez et al., 2012). La riqueza de especies de corales aquí registrada (7 taxa; Tabla 1) es menor que la reportada en otras zonas del Pacífico mexicano como son las Islas Revillagigedo y Nayarit con 18 y 12 taxa, respectivamente (Reyes-Bonilla y López-Pérez, 1998). Lo anterior, puede ser debido a que en este trabajo, solo se está considerando un año de estudio, se están considerando cuatro unidades de muestreo y que los datos se obtuvieron únicamente del trabajo en campo. Por otra parte, las abundancias de las especies de corales que faltan o sobran en este trabajo en comparación con los citados en otras zonas del Pacífico mexicano son bajas, lo que ocasiona que su registro en los arrecifes del Pacífico Oriental se vuelva un tanto azaroso. De acuerdo con los resultados, del conjunto de bahías de Huatulco, la bahía de Maguey presenta la mayor riqueza coralina con seis especies de corales, este número es ligeramente menor a lo reportado para la bahía (8 spp.; López-Pérez et al., 2012, Juárez-Hernández y Tapia-García, 2017). Maguey es una zona coralina de menor tamaño (0.44 ha) que la del resto de las localidades y está constituida por pequeños parches alternados con sustrato rocoso y sustrato arenoso, sin embargo, ha sido considerada una de las más importantes del complejo de las bahías de Huatulco debido a la diversidad de corales que en ella habitan (López-Pérez et al., 2010; Juárez-Hernández y Tapia-García 2017, 2018).

Las comunidades coralinas en este estudio estuvieron dominadas por pocilopóridos donde destaca *P. damicornis* como dominante en la mayoría de los sitios (Tabla 1), esto coincide con lo descrito anteriormente por Glynn y Leyte-Morales (1997), Reyes-Bonilla y Leyte-Morales (1998), Guzmán y Cortes (2016), quienes la señalan como el principal formador de arrecifes de la región, debido a su rápido crecimiento, adaptabilidad térmica y a que se encuentra en áreas costeras de poca profundidad (Veron, 2000; Yu et al., 2021). La mayoría de los arrecifes de coral en el Pacífico Oriental Tropical están dominados

por especies del género *Pocillopora* como consecuencia de su rápido crecimiento y alta densidad esquelética lo que le proporciona una ventaja competitiva al género en escalas de tiempo ecológicas y geológicas (Glynn et al., 2017, López-Pérez, 2017), en comparación con especies de corales masivas que contribuyen en menor medida la estructura del arrecife (Glynn y Ault, 2000, Reyes-Bonilla y López-Pérez, 2009).

#### 4.1.2 Coeficiente funcional

De acuerdo con los resultados, las especies del género *Pocillopora* tienen un coeficiente funcional alto ( $>0.66$ ), principalmente *Pocillopora capitata* con 0.77, mientras que *Porites panamensis* fue de 0.02, ya que presento los valores más bajos de tasa de calcificación y complejidad estructural (índice de rugosidad y altura; Tabla 2); estos resultados son coincidentes con los reportados anteriormente en los arrecifes de Huatulco por Cabral-Tena et al. (2020). La tasa de calcificación de un coral depende de la luz y puede verse afectada por otros factores, como el oleaje, el flujo de sedimentos y la temperatura (Chappell, 1980). El índice de rugosidad al ser mayor a 1.5, indica que los arrecifes en Huatulco no han perdido su tridimensionalidad, en comparación con los arrecifes del Caribe en donde ha aumentado la proporción de arrecifes planos con bajas tasas de producción de carbonato de coral (Álvarez-Filip et al., 2009; Álvarez-Filip et al., 2013; González-Barrios y Álvarez-Filip, 2018). Por lo que el coeficiente funcional permite evaluar la capacidad de formación y complejidad estructural de las especies de coral más comunes en cada sitio y región (González-Barrios y Álvarez-Filip, 2018).

#### 4.1.3 Cobertura coralina

Se observaron sistemas coralinos con altos valores de cobertura de coral promedio (66.25 %), sobre todo para La Entrega y Riscalillo (Figura 4), similar a lo reportado anteriormente por Glynn y Leyte-Morales (1997) para los arrecifes de Huatulco, Oaxaca y para áreas con un buen desarrollo arrecifal en el Pacífico mexicano (Reyes-Bonilla, 2003; López-Pérez et al., 2012) así como para arrecifes de América Central y del Sur (Glynn, 2001; Tabla 13). La cobertura relativa de coral en los arrecifes de Huatulco está dominada por las especies *P. damicornis* y *P. verrucosa* (Figura 4; Cabral Tena et al., 2020). En cambio *P. panamensis* presentó una baja cobertura de coral similar a lo reportado para la zona (Reyes-Bonilla, 2013; Cabral Tena et al., 2020). Los datos evidenciaron que la cobertura coralina varía batimétricamente (en zonas someras podemos encontrar especies ramificadas, como *P. verrucosa*, mientras que conforme incrementa la profundidad, se puede encontrar mayor cobertura de especies masivas, como *P. gigantea*),

probablemente como consecuencia de procesos físicos como el oleaje, la sedimentación y principalmente la cantidad de luz, que pueden favorecer la abundancia de ciertas especies de coral en la superficie o en el fondo (McCulloch et al., 2003, Iglesias-Prieto et al., 2004).

**Tabla 13.** Trabajos sobre la cobertura coralina.

Cita	Área de estudio	Géneros de corales	Cobertura coralina (%)
Glynn y Leyte-Morales, 1997	Huatulco, Oaxaca	<i>Pocillopora</i> , <i>Pavona</i> , <i>Porites</i> y <i>Psammocora</i>	60-90
Glynn, 2001	América Central y del Sur	<i>Pocillopora</i> , <i>Acropora</i> , <i>Millepora</i> y <i>Siderastrea</i> .	30-70
Reyes-Bonilla, 2003	Pacífico mexicano	<i>Pocillopora</i> , <i>Pavona</i> , <i>Porites</i> y <i>Psammocora</i>	20-50
López-Pérez et al., 2012	Ixtapa-Zihuatanejo, Guerrero	<i>Pocillopora</i> , <i>Pavona</i> y <i>Porites</i>	15-73

#### 4.1.4 Índice de Función Arrecifal

De acuerdo con el valor del IFA, Riscalillo y La Entrega presentan una mayor funcionalidad física en comparación con los otros sitios, por lo que cuentan con un mayor número formaciones arrecifales y la tridimensionalidad estructural es alta. Mientras que Isla Cacaluta presenta una menor funcionalidad (Figura 5), a pesar de ser una comunidad coralina dominada en su totalidad por especies del género *Pocillopora*. Esto contrasta con lo reportado por Cabral Tena et. al. (2020), donde Isla Cacaluta está entre los sitios con mayor IFA, además de que los autores reportaron que los sitios con valores bajos de IFA fueron aquellos donde *P. panamensis* fue la especie dominante. En general, los valores de IFA observados en este estudio fueron superiores a 0.70 (Figura 5), lo que indica que los arrecifes tienen un potencial funcional alto, pues en el Caribe Mexicano la mayoría de los arrecifes se consideran funcionalmente deteriorados (IFA < 0.47; González-Barrios y Álvarez-Filip, 2018).

Por otro lado, el género *Pocillopora* es el que más contribuye al funcionamiento físico de los arrecifes de Huatulco (Figura 5), en donde las especies *P. damicornis*, *P. capitata* y *P. verrucosa* fueron las más abundantes (Tabla 1). Por lo anterior, si cualquier otro pocilopórido fuera la especie dominante, el potencial funcional del arrecife sería muy similar (Cabral- Tena et al., 2020).

## 4.2 Comunidad de peces

### 4.2.1 Riqueza ictiofaunística

Se registraron 45 especies de peces en los arrecifes de Huatulco durante el año 2019, siendo similar a lo reportado por Juárez-Hernández et. al. (2013), quienes registraron 42 especies para el año 2004, aunque menor a la cantidad de especies reportadas por Ramírez-Gutiérrez et. al. (2007) con 64 especies para los años 2002-2003 y, por Juárez-Hernández y Tapia-García (2017) con 88 especies para el año 2009. Con respecto a lo reportado para otras localidades del Pacífico Mexicano como Acapulco, Zihuatanejo, Michoacán, Colima, Jalisco y Nayarit (Leyte-Morales y López-Ortiz, 2004; Palacios-Salgado, 2005; Solís-Gil y Jiménez-Quiroz, 2006; López-Ortiz, 2007; Chávez-Comparan et al. 2010; Galván-Villa et al., 2011; Ramírez-Ortiz et al., 2011; Palacios-Salgado et al., 2014; Tabla 14), el número de especies de peces determinado en el presente trabajo fue menor. Una mayor dominancia de especies, involucra especies con poblaciones numerosas, de crecimiento rápido, con alta productividad, ciclo de vida corto, bajo almacenamiento de tejido corporal y sumamente resistentes a las fluctuaciones de las características ambientales (Contreras-Espinosa et al., 2002).

**Tabla 14.** Riqueza de especies en el Pacífico Mexicano.

Cita	Área de estudio	Número de especies
Leyte-Morales y López-Ortiz, 2004	Zihuatanejo, Guerrero	60
Palacios-Salgado, 2005	Acapulco, Guerrero	114
Solís-Gil y Jiménez-Quiroz, 2006	Bahía Banderas, Nayarit	71
López-Ortiz, 2007	Zihuatanejo, Guerrero	75
Chávez-Comparan et al. 2010	Isla Socorro, Colima	83
Galván-Villa et al., 2011	Bahía Tenacatita, Jalisco	64
Ramírez-Ortiz et al., 2011	Michoacán	80
Palacios-Salgado et al., 2014	Acapulco, Guerrero	292

Maguey fue el arrecife con mayor riqueza en este estudio, solo presenta un 42% de las especies de peces reportadas por Juárez-Hernández y Tapia-García (2017) para este sitio. Las diferencias en riqueza de especies son resultado del menor esfuerzo de muestreo en el presente estudio (cuatro transectos por

sitio), comparado con trabajos que realizaron más de 10 transectos para los arrecifes de San Agustín (Ramírez-Gutiérrez et al., 2007), 24 y 17 transectos para los sitios de Maguey y Violín, respectivamente, en enero de 2009 y julio de 2010 (Juárez-Hernández y Tapia-García, 2018) y 351 transectos para 8 arrecifes de Bahías de Huatulco entre enero de 2009 y diciembre de 2010 (Juárez-Hernández y Tapia-García, 2017). Del conjunto de bahías en Huatulco, destaca bahía Maguey por su gran diversidad de peces que en ella habitan (López-Pérez et al., 2010, 2014; Juárez-Hernández y Tapia-García, 2017), además ha sido de las más estudiadas (López-Pérez et al., 2012, 2014; Juárez-Hernández et al., 2013; Juárez-Hernández y Tapia-García, 2017).

Existen especies que son estacionales (*Harengula thrissina*, *Apogon retrosella*, *Urobatis concentricus*) que en este trabajo no se incluyeron. Sin embargo, especies permanentes como *S. acapulcoensis*, *T. lucasanum*, *J. nigristrois*, *H. nicholsi* y *S. verres*, se registraron en este trabajo y por otros autores (Juárez-Hernández et al., 2013; López-Pérez et al., 2014; Juárez-Hernández y Tapia-García, 2017, 2018). Las familias Labridae, Pomacentridae y Serranidae fueron las más representativas en este estudio, lo que concuerda con lo reportado en trabajos anteriores para las bahías de Huatulco, donde las familias Pomacentridae, Labridae y Carangidae fueron las mejor representadas en cuanto a número de especies (Tapia-García y Juárez-Hernández, 2006; Ramírez-Gutiérrez et al., 2007; López-Pérez et al., 2012, 2014; Juárez-Hernández et al., 2013) y estas mismas familias para Pacífico centroamericano como Costa Rica, Panamá y Colombia (Gómez y Vieira, 1996; Dominici-Arosemena et al., 2005; Espinoza y Salas, 2005; Dominici-Arosemena y Wolff, 2006; Benfiel et al., 2008; Myers et al., 2011). De acuerdo con la región biogeográfica, se podría mencionar que la ictiofauna de las bahías de Huatulco está integrada en su mayoría por especies del componente tropical (López-Pérez, 2013), propias de la provincia Panámica (Briggs y Bowen, 2012).

Las especies *A. atrilobata*, *T. lucasanum* y *S. acapulcoensis* tuvieron una alta abundancia y presencia espacial, lo cual coincide con el patrón registrado para otros estudios en Huatulco (Ramírez-Gutiérrez et al., 2007; Ramos-Santiago y Tapia-García, 2017), revelando el carácter dominante de estas especies en el área. La especie *A. atrilobata* vive en la columna de agua (desde la mitad del agua hasta la superficie) y es planctívoro, mientras que *T. lucasanum* es demersal y omnívoro, por lo que se alimenta especialmente de organismos bentónicos; y *S. acapulcoensis* es un organismo territorial y herbívoro (Thomson et al., 2000; Robertson y Allen, 2015). Probablemente su alta abundancia se deba a que pueden coexistir entre sí, ya que no tienen competencia directa por los recursos. En términos de biomasa, *Stegastes acapulcoensis*, *Prionurus laticlavus* y *Halichoeres nicholsi* presentaron la mayor biomasa relativa (% acumulativo), esto debido a que son especies que consumen altas cantidades de alimento, representados principalmente por

individuos juveniles y adultos (Montgomery, et al., 1980; Gomon, 1995; Rodríguez-Romero et al., 2012). La biomasa de peces de los arrecifes de coral está influenciada por la complejidad arquitectónica (Gratwicke y Speight, 2005; Idjadi y Edmunds, 2006; Wilson et al., 2007). Así que la proporción de especies es muy similar a la observada para otras regiones del Pacífico mexicano (Pérez-España et al., 1996; Villarreal-Cavazos et al., 2000; Álvarez-Filip et al., 2006).

#### 4.2.2 Índices de diversidad de la comunidad de peces

El índice de Margalef mostró valores entre 0 y 0.92, mientras que la diversidad de Shannon varió entre 0 y 1.93, por lo que son concordantes con lo reportado por Juárez-Hernández y Tapia-García (2017) para bahías de Huatulco, cuyos transectos fueron de 10 m de longitud x 2.5 m de ancho, pero menores a los arrecifes del Parque Nacional Isla Isabel ( $2.70 \pm 0.23$  DE; Galván-Villa et al., 2010) y para los de las costas de Baja California Sur (3.20; Barjau et al., 2017), donde se realizaron censos visuales utilizando transectos de 50 x 5 m y 15 x 5 m, respectivamente. Al respecto, se puede mencionar que los sistemas en Huatulco tienen una baja biodiversidad íctica (antropizados; Moreno, 2001; Pla, 2006) en comparación con otros sistemas del Pacífico Oriental como, por ejemplo, los arrecifes de la Bahía de Acapulco, Guerrero donde se han reportado que la diversidad de especies es media (índice de Shannon de 3.14; Palacios-Salgado, 2005). Además, de acuerdo con la diversidad de Simpson y la dominancia de Simpson, los arrecifes de Isla Cacaluta presentan una mayor diversidad de especies, así como valores altos de equitatividad de Pielou ( $\sim 1$ ; Figura 9), por lo que sus especies son igualmente abundantes.

Lo anteriormente mencionado se observó cuando se utilizó la abundancia o la biomasa de las especies de peces como indicador de abundancia de las especies. Además, hubo diferencia en los valores de diversidad de peces entre sitios, concordando con lo ya reportado por López-Pérez et. al. (2013) para la costa de Oaxaca. Estas diferencias pueden estar relacionadas con la extensión y morfología de cada sistema, así como los diferentes requerimientos de cada especie para ingresar al sistema (Cortés et al., 2017). En muchos estudios, la aplicación de índice de Shannon-Wiener es el método más común de utilizar debido a que considera tanto el número de especies como la abundancia de cada una de éstas, además coloca más peso a las especies raras, permitiendo que se dé un mejor cálculo de la diversidad de especies, además permite determinar la importancia de la comunidad para así poder designar como área de conservación (Krebs, 2014).

#### 4.2.3 Relación entre los índices de la comunidad de peces y el IFA

Utilizando los índices de diversidad la comunidad de peces (por abundancia y biomasa) como variables de respuesta en los modelos GLM's y GAM's, se obtuvo que los GAM's explicaron un mayor porcentaje de varianza, por lo que consideramos que los modelos aditivos generalizados, respecto a los modelos GLM's, permiten modelar relaciones no lineales complejas, las funciones de las variables predictoras son más flexibles y permiten una mejor explicación de la variación de los índices ecológicos versus el IFA (Hastie, 1992; Wood, 2017). Sin embargo, se obtuvo que los modelos empleados indican que no hay una relación entre el IFA y los índices de estructura de la comunidad de peces. Los resultados son sobresalientes en tanto que existen numerosos trabajos en donde se ha reportado la relación entre descriptores de la comunidad de peces y aspectos de la estructura de la comunidad coralina como la cobertura de corales (Jones et al., 2004; Munday, 2004; Olán-González et al., 2020), la complejidad estructural o topográfica (Friedlander et al., 2003; Bozec et al., 2005; Johnson et al., 2008; Aburto-Oropeza et al., 2015), o la estructura del sustrato en general (Espinoza y Salas, 2005; Dominici-Arosemena y Wolff, 2006; López-Pérez et al. 2013). La alta complejidad estructural del hábitat influye no solo en la riqueza y abundancia de especies de peces, sino también en la composición de especie, debido a que algunas especies (peces coralívoros) de la comunidad de peces de arrecife, tienen un alto nivel de dependencia a los corales y especialización al hábitat (Komyakova et al., 2013). En general, el hábitat provisto por los corales vivos forma un complejo entramado de microhábitats (cuevas, grietas, etc.) que proveen de abundantes refugios a peces residentes (Munday, 2000; Nanami et al., 2005), que reducen la competencia por el gran número de recursos (alimento y microhábitats) que proporcionan (Levin et al., 2000; Nanami y Nishihira, 2001; Bozec et al., 2005), y disminuye las tasas de depredación (Hixon y Menge, 1991; Hixon y Beets, 1993; Almany, 2004).

La ausencia de una relación entre el IFA y los indicadores de la estructura de la comunidad de peces podría deberse a que se analizó el conjunto de especies de peces, el cual se constituye de los siguientes grupos funcionales: invertívoro bentónico, coralívoro, carnívoro, detritívoro, herbívoro, omnívoro y planctívoro (Pauly y Froese, 2016). Cada uno de estos grupos tienen funciones distintas como los pequeños peces planctívoros y omnívoros (géneros *Dascyllus* y *Chromis*) quienes, al alimentarse de zooplancton en la columna de agua, contribuyen sustancialmente a la transferencia de nutrientes de los sistemas pelágicos a los bénticos, lo que puede mejorar la tasa de crecimiento de los corales y la absorción de nutrientes (Holbrook et al., 2008). Los herbívoros cumplen la función de controlar y reducir el crecimiento de algas y luego reemplazarlas por las larvas de coral para el reclutamiento de coralino (Green y Bellwood, 2009). Así mismo, los grupos funcionales tienen diferentes requerimientos, como la disponibilidad de luz para los

peces planctívoros (Johansen y Jones, 2013), un hábitat bentónico complejo para refugiarse (coralívoros; Srinivasan, 2003) o con praderas de algas (piscívoros e invertívoros móviles; Asher et al. 2017; Williams et al. 2019). Por consiguiente, su grado de dependencia respecto al IFA varía, siendo los peces coralívoros y planctívoros los que presentan una relación más estrecha con la cobertura coralina que otros ya que, al ser especies de cuerpo pequeño dependen de corales ramificados para refugio y crecimiento, mientras que los peces invertívoros bentónicos presentan una baja sensibilidad a las fluctuaciones de la cobertura de coral (Cheng-Han et al., 2022). Entonces, al estudiar estos grupos como un todo no se presentó relación entre el IFA y la comunidad de peces.

Otro factor para tomar en cuenta en la ausencia aparente de relación entre el IFA y las métricas de estructura de la comunidad de peces, son las condiciones abióticas del sistema como la temperatura del agua (Mora y Robertson, 2005; Sandin et al., 2008), salinidad (Fraser y Currie, 1996), y exposición al oleaje (Depczynski y Bellwood, 2005; Fulton y Bellwood, 2005), las cuales tienen un efecto en la estructura y permanencia en arrecifes de la comunidad de peces. Este estudio se realizó en la temporada lluvias en donde, autores como Ramírez-Gutiérrez et al. (2007) y Ramos-Santiago y Tapia-García (2017) reportan los mayores valores de diversidad ( $H'$ ) de la comunidad de peces, en arrecifes de coral como resultado de los altos valores de temperatura y la alta producción de los procesos costeros regionales (Lluch-Cota et al., 1997, Lara-Lara et al., 1998). Sin embargo, no se encontró que el ensamble de peces se relacionara con el IFA. Posiblemente esto se deba a otros factores como las surgencias impulsadas por el viento que se presenta en la parte media del Golfo de Tehuantepec (Monreal y Salas, 1998), empuja agua fría hacia las bahías de Huatulco y determina condiciones ambientales no adecuadas para el establecimiento de algunas especies de peces (como los pomacántidos) en los arrecifes coralinos. Así mismo las condiciones en las que se desarrollan (zonas poco profundas y sometidas a corrientes), suelen aumentar las densidades de especies muy abundantes como *A. atrilobata* y *T. lucasanum*, lo que en consecuencia sesgan las estimaciones de abundancia total de la comunidad de peces (Zapata y Morales, 1997; Dominici-Arosemena y Wolff, 2006; Álvarez-Filip et al., 2006) y provoca una baja uniformidad y diversidad de peces.

También, es importante señalar que, el tamaño de muestra utilizado en este estudio fue menor al de otros estudios como el de Dominici-Arosemena y Wolff (2006) y Benfield et al. (2008) donde los transectos para el muestreo de la ictiofauna fueron de 30 m de longitud, encontrando que mayor complejidad de los sitios de comunidades coralinas proporciona más microhábitats y recursos para sustentar las poblaciones de peces, por lo tanto, más riqueza y abundancia de especies de peces. Así que, quizás aumentando el esfuerzo de muestreo se podría encontrar una relación entre el IFA y la estructura de la comunidad de peces.



El factor final para considerar (en la ausencia de relación entre el IFA y la estructura de la comunidad de peces) podría ser que, el 93% de las especies de peces reportadas en este estudio son conspicuas, cuando se ha indicado que las especies crípticas representan casi la mitad de todas las especies de peces de un arrecife. Los peces crípticos son numéricamente abundantes en los arrecifes de todo el mundo (Ahmadi et al., 2018; Coker et al., 2018; Brandl et al., 2018) y juegan un papel importante en la trofodinámica de los arrecifes de coral (Brandl et al., 2019). Por lo que al estar presentes solo tres especies en este estudio, tal vez se estaría perdiendo una fracción considerable de información sobre la relación entre la estructura de la comunidad de peces y el IFA. Además, dado su tamaño pequeño es posible que tengan una mayor asociación con la complejidad estructural del arrecife.

Finalmente, es importante resaltar que la relación entre el número total de peces y la complejidad topográfica del sustrato (corales) no parece ser tan simple como decir "más espacios de refugio, más peces" y que la diversidad de especies de peces parecería estar controlada por la depredación, más que por preferencias de alimentación (Risk 1972). Incluso, los potenciales sitios de refugio coralino de los peces son compartidos con algas e invertebrados, así que se ha encontrado una baja correlación entre el número de peces y la complejidad del sustrato (Luckhurst y Luckhurst (1978). Roberts y Ormond (1987) determinaron que la distribución de los peces en los arrecifes de coral no está influenciada únicamente por la composición del sustrato, ya que existen diversos grados de especialización por parte de los peces hacia los corales como fuente de alimento o refugio. Por lo que se tienen que considerar otros factores que también influyen en la estructura de la comunidad de peces como son la diversidad bentónica, la complejidad del hábitat, la profundidad y la exposición al oleaje (Friedlander et al., 2003; Dominici-Arosemena y Wolff, 2006; Espinoza y Salas, 2005; Brokovich et al., 2006; Kuffner et al., 2007). Lo anterior se ha visto para el Pacífico tropical mexicano en donde la complejidad del hábitat, las corrientes oceanográficas y la variabilidad ambiental, así como los procesos evolutivos de la fauna de peces, han promovido a las comunidades de peces arrecifales de la región (Valencia-Méndez et al., 2021). En los análisis futuros deberían considerarse un estudio de mayor tiempo, así como considerar el ver cómo responde la comunidad de peces a cada uno de los componentes del IFA.

## Capítulo 5. Conclusiones

---

En este estudio se reporta un índice de función arrecifal promedio de 0.81 para los arrecifes de Huatulco, por lo que la contribución funcional específica de las especies de corales es alta, creando estructuras tridimensionales complejas. Siendo los sitios de la Entrega y Riscalillo los que registran los mayores valores de IFA. *Pocillopora damicornis* es la especie que más contribuye para mantener la funcionalidad de los arrecifes en la región.

La comunidad de peces en los arrecifes de Huatulco, Oaxaca está compuesta por 45 especies de peces correspondientes a 37 géneros y 21 familias, en donde *Azurina atrilobata*, *Thalassoma lucasanum* y *Stegastes acapulcoensis* fueron las especies de peces de mayor abundancia relativa, mientras que *Stegastes acapulcoensis*, *Prionurus laticlavus* y *Halichoeres nicholsi*, fueron las de mayor biomasa relativa. La diversidad ictiofaunística en el sistema es baja ( $H' = 1.01$ ), sin embargo, la composición del conjunto de peces se asemeja a la de cualquier otro arrecife de coral estudiado en el Pacífico Oriental.

Los modelos GAM explican hasta un 31.5% de la varianza de los datos; sin embargo, no se encontró relación entre el IFA y la estructura de la comunidad ictiofaunística. Por lo anterior, se recomienda realizar un mayor esfuerzo de muestreo y, hacer un análisis temporal y espacial más amplio, la aplicación de otros estadísticos y la desintegración del IFA en cada uno de sus componentes.

La tridimensionalidad de los arrecifes del Parque Nacional de Huatulco, parecen no influir en la estructuración ictiofaunística y en la diversidad de peces arrecifales. Sin embargo, este estudio es preliminar y se sugiere continuar con este tipo de análisis para poder llevar un seguimiento de la composición y estructura tanto de corales como de peces en el Pacífico Oriental, para reconocer algún cambio en estos por el impacto ambiental o antropogénico y así implementar estrategias de conservación.

## Literatura citada

---

- Aburto-Oropeza, O., Ezcurra, E., Moxley, J., Sánchez-Rodríguez, A., Mascareñas-Osorio, I., Sánchez-Ortiz, C., Erisman, B., y Ricketts, T. (2015). A framework to assess the health of rocky reefs linking geomorphology, community assemblage, and fish biomass. *Ecological Indicators*, 52, 353-361. doi: 10.1016/j.ecolind.2014.12.006
- Ahmadia, G. N., Tornabene, L., Smith, D. J., y Pezold, F. L. (2018). The relative importance of regional, local, and evolutionary factors structuring cryptobenthic coral-reef assemblages. *Coral Reefs*, 37, 279-293. doi: 10.1007/s00338-018-1657-2
- Almany, G.R. (2004). Differential effects of habitat complexity, predators and competitors on abundance of juvenile and adult coral reef fishes. *Oecologia*, 141(1), 105-113. doi: 10.1007/s00442-004-1617-0
- Álvarez-Filip, L., Reyes-Bonilla, H., y Calderon-Aguilera, L. E. (2006). Community structure of fishes in Cabo Pulmo reef, Gulf of California. *Marine Ecology*, 27(1), 253-262. doi: 10.1111/j.1439-0485.2006.00108.x
- Álvarez-Filip, L., Dulvy, N. K., Gill, J. A., Côté, I. M., y Watkinson, A. R. (2009). Flattening of Caribbean coral reefs: region-wide declines in architectural complexity. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 276(1669), 3019-3025. doi: 10.1098/rspb.2009.0339
- Álvarez-Filip, L., Dulvy, N. K., Côté, I. M., Watkinson, A. R., y Gill, J. A. (2011). Coral identity underpins architectural complexity on Caribbean reefs. *Ecological Applications*, 21(6), 2223-2231. doi: 10.1890/10-1563.1
- Álvarez-Filip, L., Carricart-Ganivet, J. P., Horta-Puga, G., y Iglesias-Prieto, R. (2013). Shifts in coral-assemblage composition do not ensure persistence of reef functionality. *Scientific reports*, 3(1), 1-5. doi: 10.1038/srep03486
- Arias-González, J. E., Nuñez-Lara, E., González-Salas, C., y Galzin, R. (2004). Trophic models for investigation of fishing effect on coral reef ecosystems. *Ecological modelling*, 172 (2-4), 197-212. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2003.09.007
- Asher, J., Williams, I. D., y Harvey, E. S. (2017). Mesophotic depth gradients impact reef fish assemblage composition and functional group partitioning in the Main Hawaiian Islands. *Frontiers in Marine Science*, 4, 98 doi: 10.3389/fmars.2017.00098
- Barjau-González E., Romo-Piñeda A. K., López-Vivas J. M., Pérez-Castillo J., y Milicua M. B. P. (2017). Variation of the structure of the intertidal fish community of the Pacific coast of Baja California Sur, México. *International Journal of Marine Science*, 7(48), 455-461. doi: 10.5376/ijms.2017.07.0048
- Bellwood, D. R., Hughes, T. P., Folke, C., y Nyström, M. (2004). Confronting the coral reef crisis. *Nature*, 429, 827-833. doi: 10.1038/nature02691
- Benfield, S., Baxter, L., Guzman, H. M., y Mair, J. M. (2008). A comparison of coral reef and coral communities fish assemblages in Pacific Panama and environmental factors governing their structure. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 88(7), 1331-1341.

doi:10.1017/S0025315408002002

- Bozec, Y. M., Doledec, S., y Kulbicki, M. (2005). An analysis of fish-habitat associations on disturbed coral reefs: chaetodontid fishes in New Caledonia. *Journal of Fish Biology*, 66(4), 966-982. doi: 10.1111/j.0022-1112.2005.00652.x.
- Brandl, S. J., Goatley, C. H. R., Bellwood, D. R., y Tornabene, L. (2018). The hidden half: ecology and evolution of cryptobenthic fishes on coral reefs. *Biological Reviews*. Wiley Online Library, 93(4), 1846-1873. doi: 10.1111/brv.12423
- Brandl, S. J., Tornabene, L., Goatley, C. H. R., Casey, J. M., Morais, R. A., Côté, I. M., Baldwin, C. C., Parravicini, V., Schiettekatte, N. M. D., y Bellwood, D. R. (2019). Demographic dynamics of the smallest marine vertebrates fuel coral reef ecosystem functioning. *Science*, 364, 1189-1192. doi: 10.1126/science.aav3384
- Briggs, J. C., y Bowen, B. W. (2012). A realignment of marine biogeographic provinces with particular reference to fish distributions. *Journal of Biogeography*, 39(1), 12-30. doi: 10.1111/j.1365-2699.2011.02613.x
- Brokovich, E., Baranes, A., y Goren, M. (2006). Habitat structure determines coral reef fish assemblages at the northern tip of the Red Sea. *Ecological Indicators*, 6(3), 494-507. doi: 10.1016/j.ecolind.2005.07.002
- Brower, J. E., Zar, J. H., y Von Ende, C. N. (1998). *Field and laboratory methods for general ecology*. 4.a ed. McGraw-Hill, Boston.
- Bruno, J. F., y Valdivia, A. (2016). Coral reef degradation is not correlated with local human population density. *Scientific Reports*, 6(1), 1-8. doi: 10.1038/srep29778
- Cabral-Tena, R. A., López-Pérez, A., Reyes-Bonilla, H., Calderon-Aguilera, L. E., Norzagaray-López, C. O., Rodríguez-Zaragoza, F. A., Cupul-Magaña, A., Rodríguez-Troncoso A. P., y Ayala-Bocos, A. (2018). Calcification of coral assemblages in the eastern Pacific: reshuffling calcification scenarios under climate change. *Ecological Indicators*, 95(1), 726-734. doi: 10.1016/j.ecolind.2018.08.021
- Cabral-Tena, R. A., López-Pérez, A., Álvarez-Filip, L., González-Barrios, F. J., Calderon-Aguilera, L. E., y Aparicio-Cid, C. (2020). Functional potential of coral assemblages along a typical Eastern Tropical Pacific reef tract. *Ecological Indicators*, 119, 106795. doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106795
- Carricart-Ganivet, J. P., Cabanillas-Terán, N., Cruz-Ortega, I., y Blanchon, P. (2012). Sensitivity of calcification to thermal stress varies among genera of massive reef-building corals. *PLoS ONE*, 7(3). doi: 10.1371/journal.pone.0032859
- Chapa-Balcorta, C., Hernández-Ayon, J. M., Durazo, R., Beier, E., Alin, S. R., y López-Pérez, A. (2015). Influence of post-Tehuano oceanographic processes in the dynamics of the CO<sub>2</sub> system in the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(12), 7752-7770. doi:10.1002/2015JC011249.
- Chappell, J. (1980). Coral morphology, diversity and reef growth. *Nature*, 286(5770), 249-252. doi: 10.1038/286249a0

- Chávez-Comparán, J. C., Patiño Barragán, M., Calderón Riveroll, G., Lezama Cervantes, C., Lara Chávez, B., Ibarra Casillas, M., y Bautista Laureano, S. (2010). Lista de peces generada por censos visuales submarinos en la Isla Socorro Colima, México. *Revista Cubana de Investigaciones Pesqueras*, 27(1), 72-78.
- Cheng-Han, T., Sweatman, H. P., Thibaut, L. M., y Connolly, S. R. (2022). Volatility in coral cover erodes niche structure, but not diversity, in reef fish assemblages. *Science advances*, 8(24), 1-10. doi: 10.1126/sciadv.abm6858
- Christensen, V., y Pauly, D. (1993). Trophic models of aquatic ecosystems. ICLARM. Conference Proceedings, 26, 390.
- Coker, D. J., Wilson, S. K., y Pratchett, M. S. (2014). Importance of live coral habitat for reef fishes. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 24(1), 89-126. doi: 10.1007/s11160-013-9319-5
- Coker, D. J., DiBattista, J. D., Sinclair-Taylor, T. H., y Berumen, M. L. (2018). Spatial patterns of cryptobenthic coral-reef fishes in the Red Sea. *Coral Reefs*, 37, 193-199. doi: 10.1007/s00338-017-1647-9
- Combosch, D. J., Guzman, H. M., Schuhmacher, H., y Vollmer, S. V. (2008). Interspecific hybridization and restricted trans-Pacific gene flow in the Tropical Eastern Pacific *Pocillopora*. *Molecular Ecology*, 17(5), 1304-1312. doi: 10.1111/j.1365-294X.2007.03672.x
- Contreras Espinosa, F., López, C., Hernández, P., y Aureliocoaut, M. (2002). Caracterización e importancia de las Lagunas Costeras. *La Pesca en Veracruz y sus Perspectivas de Desarrollo*, SAGARPA/INP/UV, 31-43.
- Cortés, J., Enochs, I. C., Sibaja-Cordero, J., Hernández, L., Alvarado, J. J., Breedy, O., Cruz-Barraza, J. A., Esquivel-Garrote, O., Fernández-García, C., Hermosillo, A., Kirstie L., Medina-Rosas, P., Morales-Ramírez A., Pacheco, C., Pérez-Matus, A., Reyes-Bonilla, H., Riosmena-Rodríguez R., Sánchez-Noguera, C., Wieters, E. A., y Zapata, F. A. (2017). Marine biodiversity of Eastern Tropical Pacific coral reefs. In: Glynn, P., Manzello, D., Enochs, I. (eds) *Coral Reefs of the Eastern Tropical Pacific*. *Coral Reefs of the World*, 8, 203-250. Springer, Dordrecht. doi: 10.1007/978-94-017-7499-4\_7
- Costanza, R., D'arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P., y Van Den Belt, M. (1998). The value of ecosystems services: putting the issues in perspective. *Ecological economics*, 25(1), 67-72.
- Cox, E. F. (1986). The effects of a selective corallivore on growth rates and competition for space between two species of Hawaiian corals. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 101(1-2), 161-174. doi: 10.1016/0022-0981(86)90047-X
- Darling, E. S., McClanahan, T. R., y Isabelle, M. C. (2010). Combined effects of two stressors on Kenyan coral reefs are additive or antagonistic, not synergistic. 3(2), 122-130. doi: 10.1111/j.1755-263X.2009.00089.x
- De Groot, R., Brander, L., Vander Ploeg, S., Costanza, R., Bernard, F., Braat, L., Christie, M., Crossman, N., Ghermandi, A., Hein, L., Hussain, S., Kumar, P., McVittie, A., Portela, R., Rodríguez, L. C., ten Brink, P., y Van Beukering, P. (2012). Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services*, 1(1), 50-61. doi: 10.1016/j.ecoser.2012.07.005

- Denis, V., Ribas-deulofeu, L., Sturaro, N., Kuo, C., y Chen, C. A. (2017). A functional approach to the structural complexity of coral assemblages based on colony morphological features. *Scientific Reports*, 7(1), 1-11. doi: 10.1038/s41598-017-10334-w
- Depczynski, M., y Bellwood, D. R. (2005). Wave energy and spatial variability in community structure of small cryptic coral reef fishes. *Marine Ecology Progress Series*, 303, 283-293. doi: 10.3354/meps303283
- Díaz, S., Kattge J., Cornelissen J. H. C., Wright, I. J., Lavorel, S., Dray, S., Reu, B., Kleyer, M., Wirth, C., Prentice, I. C., Garnier, E., Bönsch, G., Westoby, M., Poorter, H., Reich, P. B., Moles, T. A., Dickie, J., Gillison, A. N., Zanne, A. E., Chave, J., Wright, S. J., Sheremet'ev, S. N., Jactel, H., Baraloto, C., Cerabolini, B., Pierce, S., Shipley, B., Kirkup, D., Casanoves, F., Joswig, J. S., Günther, A., Falczuk, V., Rüger, N., Mahecha, M. D. y Gorné L. D. (2016). The global spectrum of plant form and function. *Nature* 529, 167-171. doi: 10.1038/nature16489
- Dominici-Arosemena, A., Brugnoli-Olivera, E., Cortés, J., Molina-Ureña, H., y Quesada-Alpizar, M. (2005). Community structure of eastern Pacific reef fishes (Gulf of Papagayo, Costa Rica). *Tecnociencia*, 7(2), 19-41.
- Dominici-Arosemena, A. y Wolff, M. (2006). Reef fish community structure in the tropical Eastern Pacific (Panamá): living on a relatively stable rocky reef environment. *Helgoland Marine Research*, 60(4), 287-305. doi: 10.1007/s10152-006-0045-4
- Espinoza, M., y Salas, E. (2005). Estructura de las comunidades de peces de arrecife en las Islas Catalinas y Playa Ocotal, Pacífico Norte de Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 53(3-4), 523-536.
- Fiedler, P. C. y Talley, L. D. (2006). Hydrography of the Eastern Tropical Pacific: a review. *Progress in Oceanography*, 69(2-4), 143-180. doi: 10.1016/j.pocean.2006.03.00
- Fraser, R. H., y Currie, D. J. (1996). The species richness-energy hypothesis in a system where historical factors are thought to prevail: coral reefs. *The American Naturalist*, 148(1), 138-159. doi: 10.1086/285915
- Friedlander A. M., Brown E. K., Jokiel P. L., Smith W. R., y Rodgers K. S. (2003). Effects of habitat, wave exposure, and marine protected area status on coral reef fish assemblages in the Hawaiian archipelago. *Coral Reefs*, 22(3), 291-305. doi: 10.1007/s00338-003-0317-2.
- Fulton, C. J., y Bellwood, D. R. (2005). Wave-induced water motion and the functional implications for coral reef fish assemblages. *Limnology and Oceanography*, 50(1), 255-264. doi: 10.4319/lo.2005.50.1.0255
- Galván-Villa, C. M., Arreola-Robles, J. L., Ríos-Jara, E., y Rodríguez-Zaragoza F. A. (2010). Ensamblajes de peces arrecifales y su relación con el hábitat bentónico de la Isla Isabel, Nayarit, México. *Revista de biología marina y oceanografía*, 45(2), 311-324. doi: 10.4067/S0718-19572010000200013
- Galván-Villa, C. M., López-Uriarte, E., y Arreola-Robles, J. L. (2011). Diversidad, estructura y variación temporal del ensamble de peces asociados al arrecife coralino de Playa Mora, Bahía de Tenacatita, México. *Hidrobiológica*, 21(2), 135-146.
- Glynn, P.W. y Leyte-Morales, G. E. L. (1997). Coral reefs of Huatulco, West Mexico: reef development in upwelling Gulf of Tehuantepec. *Revista de Biología Tropical*, 45(3), 1033-1047.

- Glynn, P. W. (2001). Eastern Pacific coral reefs: new revelations in the twentieth century. *Atoll Research Bulletin*, 494, 119-158. doi: 10.5479/si.00775630.494-8.119
- Glynn, P. W. y Ault, J. S. (2000). A biogeographic analysis and review of the far eastern Pacific coral reef region. *Coral Reefs*, 19(1), 1-23. doi: 10.1007/s003380050220
- Glynn, P. W., Alvarado, J. J., Banks, S., Cortés, J., Feingold, J. S., Jiménez, C., Maragos, J. E., Martínez, P., Maté, J. L., Moanga, D. A., Navarrete S., Reyes-Bonilla, H., Riegl, B., Rivera, F., Vargas-Ángel, B., Wieters, E. A., y Zapata, F. A. (2017). Eastern Pacific coral reef provinces, coral community structure and composition: an overview. *Coral reefs of the eastern tropical Pacific*, 8, 107-176. doi: 10.1007/978-94-017-7499-4\_5
- Gómez, F. D. y Vieira, C. (1996). Ictiofauna asociada a los arrecifes coralinos hermatípicos de la ensenada de Utría, Chocó, Pacífico colombiano. *Universitas Scientiarum*, 3(1-2), 53-61.
- Gomon, M. F. (1995). Labridae. Viejas, doncellas, señoritas. *Guía FAO para Identificación de Especies para lo Fines de la Pesca. Pacífico Centro-Oriental*, 3, 1201-1225.
- González-Barrios, F. J. y Álvarez-Filip, L. (2018). A framework for measuring coral species-specific contribution to reef functioning in the Caribbean. *Ecological Indicators*, 95, 877-886. doi: 10.1016/j.ecolind.2018.08.038
- Graham, N. y Nash, K. L. (2013). The importance of structural complexity in coral reef ecosystems. *Coral Reefs*, 32(2), 315-326. doi: 10.1007/s00338-012-0984-y
- Gratwicke, B. y Speight, M. R. (2005). The relationship between fish species richness, abundance and habitat complexity in a range of shallow tropical marine habitats. *Journal of fish biology*, 66(3), 650-667. doi: 10.1111/j.0022-1112.2005.00629.x
- Green, A. L., y Bellwood, D. R. (2009). Monitoring functional groups of herbivorous reef fishes as indicators of coral reef resilience: In *A practical guide for coral reef managers in the Asia Pacific region*. Gland, Switzerland, IUCN.
- Guzmán, H. M. y Cortés, J. (2016). Arrecifes coralinos del Pacífico oriental tropical: revisión y perspectivas. *Revista de Biología Tropical*, 41 (3A), 535-557.
- Hastie, T. J. (1992). *Generalized Additive Models*. En T. J. Hastie. (Eds.), *Statistical Models in S*. Routledge, New York.
- Hernández-Velasco, A., Caamal, J., Suarez, A., Pérez-Alarcón, F., y Fulton, S. (2018). *Protocolo de Monitoreo para reservas marinas*. Comunidad y Biodiversidad AC, Guaymas, Sonora.
- Hixon, M. A., y Beets, J. P. (1993). Predation, prey refuges, and the structure of coral-reef fish assemblages. *Ecological Monographs*, 63(1), 77-101. doi: 10.2307/2937124
- Hixon, M. A. y Menge, B. A. (1991). Species diversity: prey refuges modify the interactive effects of predation and competition. *Theoretical Population Biology*, 39(2), 178-200. doi: 10.1016/0040-5809(91)90035-E.
- Hixon, M. A. (1997). Effects of Reef Fishes on Corals and Algae. In *Life and Death of Coral Reefs*, (Ed.). C. Birkeland, 230-248. New York, Chapman and Hall.

- Holbrook, S. J., Adam, T. C., Edmunds, P. J., Schmitt, R. J., Carpenter, R. C., Brooks, A. J., Lenihan, H. S., y Briggs, C. J. (2018). Recruitment Drives Spatial Variation in Recovery Rates of Resilient Coral Reefs. *Scientific Reports*, 8(1), 1-11. doi: 10.1038/s41598-018-25414-8
- Hooper, D. U., Chapin, F. S., Ewel, J. J., Hector, A., Inchausti, P., Lavorel, S., Lawton, J. H., Lodge, D. M., Loreau, M., Naeem, S., Schmid, B., Setälä, H., Symstad, A. J., Vandermeer, J. Wardle, D. A. (2005). Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecological monographs*, 75: 3-35. doi: 10.1890/04-0922
- Hughes, T. P., Kerry, J. T., Álvarez-Noriega, M., Álvarez-Romero, J. G., Anderson, K. D., Baird, A. H., Babcock, R. C., Beger, M., Bellwood, D. R., Berkelmans, R., Bridge, T. C., Butler, I. R., Byrne, M., Cantin, N. E., Comeau, S., Connolly, S. R., Cumming, G. S., Dalton, S. J., Diaz-Pulido, G., Eakin, C. M., Figueira, W. F., Gilmour, J. P., Harrison, H. B., Heron, S. F., Hoey, A. S., Hobbs, J. P. A., Hoogenboom, M. O., Kennedy, E. V., Kuo, C. Y., Lough, J. M., Lowe, R. J., Liu, G., McCulloch, M. T., Malcolm, H. A., McWilliam, M. J., Pandolfi, J. M., Pears, R. J., Pratchett, M. S., Schoepf, V., Simpson, T., Skirving, W. J., Sommer, B., Torda, G., Wachenfeld, D. R., Willis, B. L., y Wilson, S. K. (2017). Global warming and recurrent mass bleaching of corals. *Nature*, 543(7645), 373-377. doi: 10.1038/nature21707
- Idjadi, J. A., y Edmunds, P. J. (2006). Scleractinian corals as facilitators for other invertebrates on a Caribbean reef. *Marine Ecology Progress Series*, 319, 117-127.
- Iglesias-Prieto, R., Beltran, V. H., LaJeunesse, T. C., Reyes-Bonilla, H., y Thome, P. E. (2004). Different algal symbionts explain the vertical distribution of dominant reef corals in the eastern Pacific. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 271(1549), 1757-1763. doi: 10.1098/rspb.2004.2757
- Johansen, J. L., y Jones, G. P. (2013). Sediment-induced turbidity impairs foraging performance and prey choice of planktivorous coral reef fishes. *Ecological Applications*, 23(6), 1504-1517. doi: 10.1890/12-0704.1
- Johnson, K. G., Jackson, J. B. C., y Budd, A. F. (2008). Caribbean reef development was independent of coral diversity over 28 million years. *Science*, 319(5869), 1521-1523. doi: 10.1126/science.1152197
- Jones, G. P., McCormick, M. I., Srinivasan, M., Eagle, J. V. (2004). Coral decline threatens fish biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(21), 8251-8253. doi: 10.1073/pnas.0401277101
- Juárez-Hernández, L. G., Tapia-García, M., y Luna-Monsivais, B. (2013). Estructura de las comunidades de peces de las bahías Maguey y Cacaluta, Huatulco, Oaxaca. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 84(4), 1243-1257.
- Juárez-Hernández, L. G. y Tapia-García, M. (2017). Variación espacial en número de especies, abundancia y diversidad de peces en las Bahías de Huatulco, Oaxaca, México. *Revista de Biología Tropical*, 65(4), 1407-1418.
- Juárez-Hernández, L. G. y Tapia-García, M. (2018). Cambios en la comunidad de peces por efecto del desarrollo costero en el Parque Nacional Huatulco (México). *Revista de Biología Tropical*, 66(4), 1569-1579. doi: 10.15517/rbt.v66i4.31908
- Komyakova, V., Munday, P. L., y Jones, G. P. (2013). Relative importance of coral cover, habitat complexity and diversity in determining the structure of reef fish communities. *PloS one*, 8(12), e83178. doi:



10.1371/journal.pone.0083178

- Krebs, C. J. (2014). *Ecological methodology*. 3rd. ed. (in prep)
- Kuffner, I. B., Brock, J. C., Grober-Dunsmore, R., Bonito, V. E., Hickey, T. D., y Wright, C. W. (2007). Relationships between reef fish communities and remotely sensed rugosity measurements in Biscayne National Park, Florida, USA. *Environmental biology of fishes*, 78(1), 71-82.
- Lamy, T., Galzin, R., Kulbicki, M., Lison de Loma, T., y Claudet, J. (2016). Three decades of recurrent declines and recoveries in corals belie ongoing change in fish assemblages. *Coral Reefs*, 35, 293-302. doi: 10.1007/s00338-015-1371-2
- Lara-Lara J. R., Robles-Jarero E. G., Bazán-Guzmán M. C., y Millan-Núñez E. (1998). Productividad del fitoplancton. In: Tapia-García M. (ed.), *El Golfo de Tehuantepec: el ecosistema y sus recursos*. Mexico: Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. 51-58
- Levin, P. S., Tolimieri, N., Nicklin, M., y Sale, P. F. (2000). Integrating individual behavior and population ecology: the potential for habitat-dependent population regulation in a reef fish. *Behavioral Ecology*, 11(5), 565-571. doi: 10.1093/beheco/11.5.565
- Leyte-Morales, G. E., y López-Ortiz, A. M. (2004). Ictiofauna asociada a arrecifes de coral en siete localidades de Zihuatanejo Guerrero, México. En: *Sociedad Ictiologica Mexicana, A. C. (Ed.). Resúmenes del IX Congreso Nacional de Ictiología*, Villahermosa.
- Lluch-Cota, S. E., Álvarez-Borrego, S., Santamaría-Ángel, E., Müller-Karger, F., y Hernández-Vázquez, S. (1997). The Gulf of Tehuantepec and adjacent areas: Spatial and temporal variation of satellite-derived photosynthetic pigments. *Ciencias Marinas*, 23(3), 329-340. doi: 10.7773/cm.v23i3.809
- López-Ortiz, A. M. (2007). Estructura de la comunidad de peces de arrecife en ocho localidades de Ixtapa-Zihuatanejo, Guerrero, México. [Tesis de Licenciatura]. Universidad del Mar, Puerto Angel, Oaxaca, 77.
- López-Pérez, R. A. y Ballesteros, L. M. H. (2004). Coral community structure and dynamics in the Huatulco area, western Mexico. *Bulletin of Marine Science*, 75(3), 453-472.
- López-Pérez, R. A., Mora-Pérez, M. G., y Leyte-Morales, G. E. (2007). Coral (Anthozoa: Scleractinia) recruitment at Bahías de Huatulco, western México: Implications for coral community structure and dynamics. *Pacific Science*, 61(3), 355-369.
- López-Pérez, R. A., Benítez-Villalobos, F., López-Ortiz, A. M., López-Pérez, M. I., Granja-Fernández, M. R., y Domínguez y Gómez, M. T. (2008). La comunidad arrecifal en Isla Cacaluta, Oaxaca. En: J. M. Domínguez-Licona (eds). *Diagnóstico de los Recursos Naturales de la Bahía y Micro-Cuenca de Cacaluta*. Universidad del Mar, Oaxaca.
- López-Pérez, R. A., Pérez-Maldonado, I. L., López-Ortiz, A. M., Barranco-Servín, L. M., BarrientosVillalobos, J., y Leyte-Morales, G. (2010). Reef fishes of the Mazunte-Bahías de Huatulco reef track, Oaxaca, Mexican Pacific. *Zootaxa*, 2422(1), 53-62.
- López-Pérez, R. A., Calderón-Aguilera, L. E., Reyes-Bonilla, H., Carriquiry, J. D., Medina-Rosas, P., Cupul-Magaña, A. L., Herrero-Pérezrul, M. D., Hernández-Ramírez, H. A., Ahumada-Sempoal, M. Á. y Luna-Salguero, B. M. (2012). Coral communities and reefs from Guerrero, southern Mexican

Pacific. Marine Ecology, 33(4), 407-416. doi: 10.1111/j.1439-0485.2011.00505.x

- López-Pérez, R. A., Calderon-Aguilera, L. E., Zepeta-Vilchis, R. C., López Pérez Maldonado, I., y López Ortiz, A. M. (2013). Species composition, habitat configuration and seasonal changes of coral reef fish assemblages in western Mexico. *Journal of Applied Ichthyology*, 29(2), 437-448. doi: 10.1111/jai.12029
- López-Pérez, R. A., Granja-Fernández, R., Aparicio-Cid, C., Zepeta-Vilchis, R. C., Torres-Huerta, A. M., Benítez-Villalobos, F., López-López, D. A., Cruz-Antonio, C., y Valencia-Méndez, O. (2014). Corales pétreos, equinodermos y peces asociados a comunidades arrecifes coralinos del Parque Nacional Huatulco, Pacífico sur mexicano. *Revista mexicana de biodiversidad*, 85(4), 1145-1159. doi: 10.7550/rmb.43848
- López-Pérez, R. A. (2017). Revisiting the Cenozoic history and the origin of the Eastern Pacific coral fauna. En: P. Glynn, D.P. Manzello, I. Enochs (Eds.), *Coral Reefs of the Eastern Tropical Pacific*. Springer, Netherlands.
- Lough, J. M. y Cooper, T. F. (2011). New insights from coral growth band studies in an era of rapid environmental change. *Earth-Science Reviews*, 108 (3-4), 170-184. doi: 10.1016/j.earscirev.2011.07.001
- Luckhurst, B. E. y Luckhurst, K. (1978). Analysis of the influence of substrate variables on coral reef fish communities. *Marine Biology*, 49, 317-323. doi: 10.1007/BF00455026
- Manzello, D. P. (2010a). Coral growth with thermal stress and ocean acidification: Lessons from the eastern tropical Pacific. *Coral Reefs*, 29(3), 749-758. doi: 10.1007/s00338-010-0623-4
- Manzello, D. P. (2010b). Ocean acidification hot spots: Spatiotemporal dynamics of the seawater CO<sub>2</sub> system of eastern Pacific coral reefs. 55(1), 239-248. doi: 10.4319/lo.2010.55.1.0239
- McCulloch, M., Fallon, S., Wyndham, T., Hendy, E., Lough, J., y Barnes, D. (2003). Coral record of increased sediment flux to the inner Great Barrier Reef since European settlement. *Nature*, 421, 727-730. doi: 10.1038/nature01361
- McGill, B. J., Enquist, B. J., Weiher, E., y Westoby, M. (2006). Rebuilding community ecology from functional traits. *Trends in ecology y evolution*. Elsevier, 21(4), 178-185. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2006.02.002>
- McWilliam, M., Hoogenboom, M. O., Baird, A. H., Kuo, C. Y., Madin, J. S., y Hughes, T. P. (2018). Biogeographical disparity in the functional diversity and redundancy of corals. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. National Academy of Sciences, 115(12), 3084-3089. doi: 10.1073/pnas.1716643115
- Medellín-Maldonado, F., Cabral-Tena, R. A., López-Pérez, A., Calderón-Aguilera, L. E., Norzagaray-López, C. O., Chapa-Balcorta, C., y Zepeta-Vilchis, R. C. (2016). Calcification of the main reef-building coral species on the Pacific coast of southern Mexico. *Ciencias Marinas*, 42(3), 209-225. doi: 10.7773/cm.v42i3.2650
- Moberg, F. y Folke, C. (1999). Ecological goods and services of coral reef ecosystems. *Ecological economics*, 29(2), 215-233. doi: 10.1016/S0921-8009(99)00009-9

- Monreal G. M. A. y Salas D. A. (1998). Dinámica y estructura termohalina. In: Tapia-García M. (ed.), El Golfo de Tehuantepec: el ecosistema y sus recursos. Mexico: Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.
- Montgomery, L.W., Gerrodette, T., y Marshall, L. (1980). Effects of grazing by the yellowtail surgeon fish, *Prionurus punctatus*, on algal communities in the Gulf of California, Mexico. *Bulletin of Marine Science*, 30(4), 901-908
- Mora, C., y Robertson, D. R. (2005). Factors shaping the range-size frequency distribution of the endemic fish fauna of the Tropical Eastern Pacific. *Journal of Biogeography*, 32(2), 277-286. doi: 10.1111/j.1365-2699.2004.01155.x
- Moreno, C. E. (2001). Métodos para medir la biodiversidad. M&T-Manuales y Tesis SEA, Zaragoza.
- Mouillot, D., Graham, N. A. J., Villéger, S., Mason, N. W. H., y Bellwood, D. R. (2013). A functional approach reveals community responses to disturbances. *Trends in ecology y evolution*. Elsevier, 28(3), 167-177. doi: 10.1016/j.tree.2012.10.004
- Mumby, P. J., Edwards, A. J., Arias-Gonzalez, E., Linderman, K. C., Blackwell, P. G., Gall, A., Gorczynska, M., Harborne, A. R., Pescod, C. L., Renten, H., Wabnitz, C. C. y Llewellyn, G. (2004). Mangrove enhance the biomasa of coral reef fish communities in the Caribbean. *Nature*, 427, 533-536. doi: 10.1038/nature02286
- Munday, P. L. (2000). Interactions between habitat use and patterns of abundance in coral-dwelling fishes of the genus *Gobiodon*. *Environmental Biology of Fishes*, 58, 355-369. doi: 10.1023/A:1007689314926
- Munday, P. L. (2004). Habitat loss, resource specialization, and extinction on coral reefs. *Global Change Biology*, 10, 1642-1647. doi: 10.1111/j.1365-2486.2004.00839.x
- Myers, M. C., Wagner, J., y Vaughan, C. (2011). Long-term comparison of the fish community in a Costa Rican rocky shore marine reserve. *Revista de Biología Tropical*, 59 (1), 233-246.
- Nanami, A., Nishihira, M., Suzuki, T., y Yokochi, H. (2005). Species-specific habitat distribution of coral reef fish assemblages in relation to habitat characteristics in an Okinawan coral reef. *Environmental Biology of Fishes*, 72(1), 55-65. doi: 10.1007/s10641-004-4188-3
- Nanami, A. y Nishihira, M. (2001). Survival rates of juvenile coral reef fishes differ between patchy and continuous habitats. *Bulletin of marine science*, 69(3), 1209-1221.
- Norzagaray-López, C. O., Calderon-Aguilera, L. E., Hernández-Ayón, J. M., Reyes-Bonilla, H., Carricart-Ganivet, J. P., Cabral-Tena, R. A., y Balart, E. F. (2015). Low calcification rates and calcium carbonate production in *Porites panamensis* at its northernmost geographic distribution. *Marine Ecology*, 36, 1244-1255. doi: 10.1111/maec.12227
- Öhman, M. C., Munday, P. L., Jones, G. P., y Caley, M. J. (1998). Settlement strategies and distribution patterns of coral-reef fishes. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 225(2), 219-238. doi: 10.1016/S0022-0981(97)00224-4
- Olán-González, M., Reyes-Bonilla, H., Álvarez-Filip, L., Pérez-España, H., y Olivier, D. (2020). Fish diversity divergence between tropical eastern pacific and tropical western Atlantic coral reefs.

- Environmental Biology of Fishes. Springer, 103(11), 1323-1341. doi: <https://doi.org/10.1007/s10641-020-01026-y>
- Palacios Salgado, D. S. (2005). Asociaciones de peces en los arrecifes rocosos de la Bahía de Acapulco, Guerrero, México. [Tesis de Maestría]. Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, 122.
- Palacios-Salgado, D. S., Ramírez-Valdez, A., Rojas-Herrera, A. A., Amores, J. G., y Melo-García, M. A. (2014). Marine fishes of Acapulco, Mexico (Eastern Pacific Ocean). *Marine Biodiversity*, 44(4), 471-490. doi: 10.1007/s12526-014-0209-4
- Pauly, D., y Froese, R. The length-weight relationship of fishes: a review. (2006). *Journal of Applied Ichthyology*, 22(4), 241-253.
- Pérez-España, Galván-Magaña, H. F., y Abitia-Cárdenas L. A. (1996). Variaciones temporales y espaciales en la estructura de la comunidad de peces de arrecifes rocosos del suroeste del Golfo de California, México. *Ciencias Marinas*, 22(3), 273-294.
- Pla, L. (2006). Biodiversidad: Inferencia basada en el índice de Shannon y la riqueza. *Interciencia*, 31(8), 583-590.
- Pratchett, M. S., Munday, M. S., Wilson, S. K., Graham, N. A. J., Cinner, J. E., Jones, G. P., Polunin, N. V. C., McClanahan, T. R., y Bellwood, D. R. (2008). Effects of climate-induced coral bleaching on coral-reef fishes: ecological and economic consequences. *Oceanography and Marine Biology*, 46, 251-296. doi: 10.1201/9781420065756.ch6
- Ramírez-Gutiérrez, J. M., Tapia-García, M., Ramos-Santiago, E., y Ulloa, R. (2007). Fish community structure in San Agustín Bay, Huatulco, México. *Revista Chilena de Historia Natural*, 80, 419-430.
- Ramírez-Ortiz, G., Reyes-Bonilla, H., Fourriere, M., Walther-Mendoza, M., y Calderón-Aguilera, L. E. (2011). Estructura comunitaria de la ictiofauna en arrecifes rocosos y artificiales de la costa de Michoacán, México. En: J. C. Chavez-Compan y J. Mimbela-López. *Avances sobre investigaciones marinas y acuicolas del Pacífico tropical mexicano* (Eds.). Universidad de Colima, Colima, 55-68.
- Ramos-Santiago, E., y Tapia-García, M. (2017). Estructura de la comunidad de peces en la Bahía La Entrega, Oaxaca, México. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 46(1), 7-28.
- Reyes-Bonilla, H. y Leyte-Morales, G. E. (1998). Corals and coral reefs of the Puerto Angel region, west coast of México. *Revista de Biología Tropical*, 46(3), 679-681. doi: 10.15517/rbt.v46i3.20131
- Reyes-Bonilla, H. y López-Pérez, R. A. (1998). Biogeografía de los corales pétreos (Scleractinia) del Pacífico de México. *Ciencias Marinas*, 24(2), 211-224.
- Reyes-Bonilla, H. (2003). Coral reefs of the Pacific coast of México. En: J. Cortés (ed.). *Coral reefs of Latin America*. Elsevier, Amsterdam.
- Reyes-Bonilla, H. y López-Pérez, R. A. (2009). Corals and coral reef communities in the Gulf of California. En: M. E. Johnson y J. Ledesma-Vázquez (eds.). *Atlas of coastal ecosystems in the western Gulf of California: tracking limestone deposits on the margin of a young sea*. University of Arizona Press, Tucson.

- Reyes-Bonilla, H., Calderón-Aguilera, L. E., Cruz-Piñón, G., López-Pérez, R. A., y Medina-Rosas, P. (2010). Evaluación de la diversidad gama de corales arrecifales (Scleractinia) en el Pacífico de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 81(1), 113-121.
- Richardson, L. E., Graham, N. A. J., y Hoey, A. S. (2017). Cross-scale habitat structure driven by coral species composition on tropical reefs. *Scientific Reports. Nature*, 7(1), 1-11. doi: 10.1038/s41598-017-08109-4
- Risk, M. J. (1972). Fish diversity on a coral reef in the Virgin Islands. *Atoll Research Bulletin*, 153, 1-6. doi: 10.5479/si.00775630.153.1
- Roberts, C. M. y Ormond, R. F. (1987). Habitat complexity and coral reef fish diversity and abundance on Red Sea fringing reefs. *Marine Ecology Progress Series*, 41(1), 1-8.
- Robertson, D. R. y Allen, G. R. (2015). Peces costeros del Pacífico Oriental Tropical: sistema de información en línea. Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales, Balboa, República de Panamá. Consultado el 10 de enero de 2023 de <http://biogeodb.stri.si.edu/sftep/es/pages>
- Rodríguez-Romero, J., López-González, L., Galván-Magaña, F., Gutiérrez-Sánchez, F. J., López-Martínez, J., Inohuye-Rivera, R., y Pérez-Urbiola, J. C. (2012). El papel ecológico de los peces en una zona de manglar de la costa occidental de Baja California Sur, México. En J. López-Martínez y E. Morales-Bojórquez (Eds.), *Efectos de la Pesca de Arrastre en el Golfo de California*. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. y Fundación Produce Sonora, México.
- Rodríguez-Zaragoza, F. A., Cupul-Magaña, A. L., Galván-Villa, C. M., Ríos-Jara, E., Ortiz, M., Robles-Jarero, E. G., López-Uriarte, E., y Arias-González, J. E. (2011). Additive partitioning of reef fish diversity variation: a promising marine biodiversity management tool. *Biodiversity and Conservation*, 20, 1655-1675. doi: 10.1007/s10531-011-0053-9
- RStudio Team. (2021). RStudio: integrated development environment for R [internet]. Boston, MA: RStudio, Inc.
- Sánchez-Caballero, C. A., Borges-Souza, J. M., De La Cruz-Agüero, G., y Ferse, S. C. A. (2017). Links between fish community structure and habitat complexity of a rocky reef in the Gulf of California threatened by development: Implications for mitigation measures. *Ocean y Coastal Management*, 137, 96-106. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2016.12.013
- Sandin, S. A., Vermeij, M. J., y Hurlbert, A. H. (2008). Island biogeography of Caribbean coral reef fish. *Global Ecology and Biogeography*, 17(6), 770-777. doi: 10.1111/j.1466-8238.2008.00418.x
- Sebens, K. P. (1994). Biodiversity of coral reefs: what are we losing and why?. *American zoologist*, 34(1), 115-133. doi: 10.1093/icb/34.1.115
- Solís-Gil, C. y Jiménez-Quiroz M. C. (2006). Estructura de la comunidad de peces de arrecife de Bahía de Banderas (1996). En: E. Espino-Barr y M. C. Jiménez-Quiroz (eds.). *Los Recursos Pesqueros y Acuícolas de Jalisco, Colima y Michoacán*. INP, SAGARPA, México.
- Stewart, B. D. y Jones, G. P. (2001). Associations between the abundance of piscivorous fishes and their prey on coral reefs: implications for prey-fish mortality. *Marine Biology*, 138(2), 383-397. doi: 10.1007/s002270000468

- Tapia-García, M., y Juárez-Hernández, L. G. (2006). Composición taxonómica, distribución y abundancia de las comunidades de peces de la zona costera de México: bahías del Parque Nacional Huatulco, Oaxaca. Informe final. UAMI/CBS. Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Iztapalapa, México, DF.
- Thomson, D. A., Findley, L. T., y Kerstitch A. N. (2000). Reef fishes of the Sea of Cortez: the rocky-shore fishes of the Gulf of California. University of Texas Press, Austin.
- Valencia-Méndez, O., Rodríguez-Zaragoza, F. A., Palacios-Salgado, D., Ramírez-Valdez, A., y López-Pérez, A. (2021). Biological inventory and latitudinal gradient of the rocky and reef associated fish along the southern Mexican Pacific. *Marine Biodiversity*, 51(1), 1-11. doi: 10.1007/s12526-020-01145-w
- Veron, J. E. N. (2000). Corals of the world. Australian Institute of Marine Science, Townsville.
- Villarreal-Cavazos, A., Reyes-Bonilla, H., Bermúdez-Almada, B., y Arizpe-Covarrubias O. (2000). Los peces del arrecife de Cabo Pulmo, Golfo de California, México: Lista sistemática y aspectos de abundancia y biogeografía. *Revista de Biología Tropical*, 48(2-3), 413-424.
- Villéger, S., Novack-Gottshall, P. M., y Mouillot, D. (2011). The multidimensionality of the niche reveals functional diversity changes in benthic marine biotas across geological time. *Ecology Letters*. Wiley Online Library, 14(6), 561-568. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01618.x>
- Webster, M. S. y Hixon, M. A. (2000). Mechanisms and individual consequences of intraspecific competition in a coral-reef fish. *Marine Ecology Progress Series*, 196, 187-194. doi: 10.3354/meps196187
- Williams, J., Jordan, A., Harasti, D., Davies, P., y Ingleton, T. (2019). Taking a deeper look: Quantifying the differences in fish assemblages between shallow and mesophotic temperate rocky reefs. *PloS one*, 14(3), e0206778. doi: [doi.org/10.1371/journal.pone.0206778](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206778)
- Wilson, S. K., Graham, N. A., Pratchett, M. S., Jones, G. P., y Polunin, N. V. (2006). Multiple disturbances and the global degradation of coral reefs: are reef fishes at risk or resilient?. *Global Change Biology*, 12(11), 2220-2234. doi: 10.1111/j.1365-2486.2006.01252.x
- Wilson, S. K., Graham, N. A. J., y Polunin, N. V. (2007). Appraisal of visual assessments of habitat complexity and benthic composition on coral reefs. *Marine Biology*, 151(3), 1069-1076. doi: 10.1007/s00227-006-0538-3
- Wood, S. N. (2017). Generalized Additive Models: An Introduction with R. 2nd ed. Chapman and Hall/CRC, New York.
- Yu, X., Yu, K., Chen, B., Liao, Z., Qin, Z., Yao, Q., Huang, Y., Liang, J., y Huang, W. (2021). Nanopore long-read RNAseq reveals regulatory mechanisms of thermally variable reef environments promoting heat tolerance of scleractinian coral *Pocillopora damicornis*. *Environmental Research*, 195, 110782. doi: 10.1016/j.envres.2021.110782
- Zapata, F. A. y Morales, Y. A. (1997). Spatial and temporal patterns of fish diversity in a coral reef at Gorgona island, Colombia. *Proceedings of the 8th international Coral Reef symposium*, 1, 1029-1034.

## Anexos

### Anexo A

**Tabla 15.** Lista sistemática de la ictiofauna registrada en los arrecifes de Huatulco para el año 2019. AGU, San Agustín; RIS, Riscalillo; JIC, Jicaral; HER, Dos Hermanas; IND, La India; CAC, Isla Cacaluta; MAG, Maguey; ENT, La Entrega.

Especies	AGU	RIS	JIC	HER	IND	CAC	MAG	ENT
<b>FAMILIA ACANTHURIDAE</b>								
<i>Prionurus laticlavus</i>	X		X	X		X		X
<b>FAMILIA CHAETODONTIDAE</b>								
<i>Chaetodon humeralis</i>				X		X	X	
<i>Johnrandallia nigristrois</i>		X		X	X	X	X	X
<b>FAMILIA POMACANTHIDAE</b>								
<i>Holacanthus passer</i>			X	X	X	X	X	
<i>Pomacanthus zonipectus</i>							X	
<b>FAMILIA MURAENIDAE</b>								
<i>Gymnomuraena zebra</i>						X	X	
<b>FAMILIA BLENNIIDAE</b>								
<i>Ophioblennius steindachneri</i>	X		X	X		X		
<i>Plagiotremus azaleus</i>	X						X	
<b>FAMILIA CARANGIDAE</b>								
<i>Caranx caballus</i>						X		
<i>Caranx sexfasciatus</i>			X					
<b>FAMILIA CIRRHITIDAE</b>								
<i>Cirrhitichthys oxycephalus</i>						X	X	
<i>Cirrhitus rivulatus</i>					X			
<b>FAMILIA KYPHOSIDAE</b>								
<i>Kyphosus elegans</i>						X		X
<b>FAMILIA HAEMULIDAE</b>								
<i>Haemulon maculicauda</i>		X				X		
<b>FAMILIA LABRIDAE</b>								
<i>Bodianus diplotaenia</i>			X	X	X	X	X	X
<i>Halichoeres chierchiae</i>			X		X	X	X	
<i>Halichoeres dispilus</i>			X	X	X	X	X	
<i>Halichoeres nicholsi</i>		X	X	X	X		X	
<i>Halichoeres notospilus</i>					X	X		
<i>Novaculichthys taeniourus</i>						X		
<i>Thalassoma lucasanum</i>	X	X	X	X	X	X	X	X

<b>FAMILIA LUTJANIDAE</b>								
<i>Lutjanus argentiventris</i>	X	X			X	X	X	X
<b>FAMILIA GOBIIDAE</b>								
<i>Coryphopterus urospilus</i>						X		
<b>FAMILIA HOLOCENTRIDAE</b>								
<i>Myripristis leiognathos</i>							X	
<i>Neoniphon suborbitalis</i>				X			X	X
<b>FAMILIA MULLIDAE</b>								
<i>Mulloidichthys dentatus</i>					X		X	X
<b>FAMILIA POMACENTRIDAE</b>								
<i>Abudefduf troschelii</i>	X			X		X		X
<i>Azurina atrilobata</i>			X	X		X	X	
<i>Microspathodon bairdii</i>			X					
<i>Microspathodon dorsalis</i>	X	X	X	X		X	X	
<i>Stegastes acapulcoensis</i>	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Stegastes flavilatus</i>	X	X	X	X	X	X	X	
<b>FAMILIA SERRANIDAE</b>								
<i>Cephalopholis colonus</i>						X	X	
<i>Cephalopholis panamensis</i>		X	X		X	X	X	X
<i>Epinephelus labriformis</i>								X
<i>Serranus psittacinus</i>			X	X	X	X	X	
<b>FAMILIA FISTULARIIDAE</b>								
<i>Fistularia commersonii</i>								X
<b>FAMILIA BALISTIDAE</b>								
<i>Melichthys niger</i>	X							
<i>Sufflamen verres</i>			X		X	X	X	X
<b>FAMILIA DIODONTIDAE</b>								
<i>Diodon holocanthus</i>			X		X	X		
<i>Diodon hystrix</i>	X		X				X	
<b>FAMILIA MONACANTHIDAE</b>								
<i>Cantherhines dumerilii</i>			X				X	X
<b>FAMILIA TETRAODONTIDAE</b>								
<i>Arothron hispidus</i>				X			X	
<i>Arothron meleagris</i>	X			X			X	X
<i>Canthigaster punctatissima</i>					X		X	
<b>Total</b>	<b>12</b>	<b>9</b>	<b>20</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>27</b>	<b>29</b>	<b>16</b>



## Anexo B

**Tabla 16.** Composición de las especies por abundancia relativa de las especies de peces registradas en los arrecifes de Huatulco para el año 2019. AGU, San Agustín; RIS, Riscalillo; JIC, Jicaral; HER, Dos Hermanas; IND, La India; CAC, Isla Cacaluta; MAG, Maguey; ENT, La Entrega.

Especie	AGU	RIS	JIC	HER	IND	CAC	MAG	ENT
<i>Prionurus laticlavus</i>	0.188	0.39		0.079		0.072		
<i>Chaetodon humeralis</i>					0.014	0.014		0.014
<i>Johnrandallia nigrirostris</i>	0.029		0.007		0.014	0.022	0.007	0.007
<i>Holacanthus passer</i>		0.007			0.065	0.007	0.007	0.029
<i>Pomacanthus zonipectus</i>					0.029			
<i>Gymnomuraena zebra</i>					0.007			0.007
<i>Ophioblennius steindachneri</i>		0.007		0.022		0.21		0.007
<i>Plagiotremus azaleus</i>				0.007	0.022			
<i>Caranx caballus</i>								0.007
<i>Caranx sexfasciatus</i>		0.007						
<i>Cirrhitichthys oxycephalus</i>					0.079			0.238
<i>Cirrhitus rivulatus</i>							0.014	
<i>Kyphosus elegans</i>	0.007							0.043
<i>Haemulon maculicauda</i>			0.007					0.007
<i>Bodianus diplotaenia</i>	0.022	0.065			0.304	0.556	0.26	0.867
<i>Halichoeres chierchiae</i>		0.014			0.014		0.022	0.014
<i>Halichoeres dispilus</i>		0.079			0.311	0.007	0.332	0.94
<i>Halichoeres nicholsi</i>		0.043	0.007		0.022	0.094	0.029	
<i>Halichoeres notospilus</i>							0.007	0.007
<i>Novaculichthys taeniourus</i>								0.007
<i>Thalassoma lucasanum</i>	1.857	1.416	2.71	2.898	7.09	2.024	2.262	5.355
<i>Lutjanus argentiventris</i>	0.036		0.014	0.014	0.022		0.014	0.152
<i>Coryphopterus urospilus</i>								0.072
<i>Myripristis leiognathos</i>					0.007			
<i>Neoniphon suborbitalis</i>	0.007				0.007	0.036		
<i>Mulloidichthys dentatus</i>	0.21				0.043		0.058	
<i>Abudefduf troschelii</i>	0.094			0.007		0.065		0.181
<i>Azurina atrilobata</i>		1.445			16.044	21.681		4.018
<i>Microspathodon bairdii</i>		0.043						
<i>Microspathodon dorsalis</i>		0.072	0.029	0.087	0.022	0.376		0.455
<i>Stegastes acapulcoensis</i>	1.207	2.45	2.869	2.602	1.229	3.455	2.949	2.038
<i>Stegastes flavilatus</i>		0.116	0.029	0.029	0.137	0.556	1.221	0.976
<i>Cephalopholis colonus</i>					0.007			0.007

<i>Cephalopholis panamensis</i>	0.022	0.036	0.007	0.007	0.007	0.014
<i>Epinephelus labriformis</i>	0.007					
<i>Serranus psittacinus</i>		0.007		0.014	0.289	0.188
<i>Fistularia commersonii</i>	0.036					0.405
<i>Melichthys niger</i>			0.007			
<i>Sufflamen verres</i>	0.051	0.007		0.007	0.007	0.007
<i>Diodon holocanthus</i>		0.014			0.014	0.014
<i>Diodon hystrix</i>		0.007	0.007	0.007		
<i>Cantherhines dumerilii</i>	0.007	0.007		0.007		
<i>Arothron hispidus</i>				0.007	0.007	
<i>Arothron meleagris</i>	0.029		0.029	0.101	0.043	
<i>Canthigaster punctatissima</i>				0.029	0.007	

---

## Anexo C

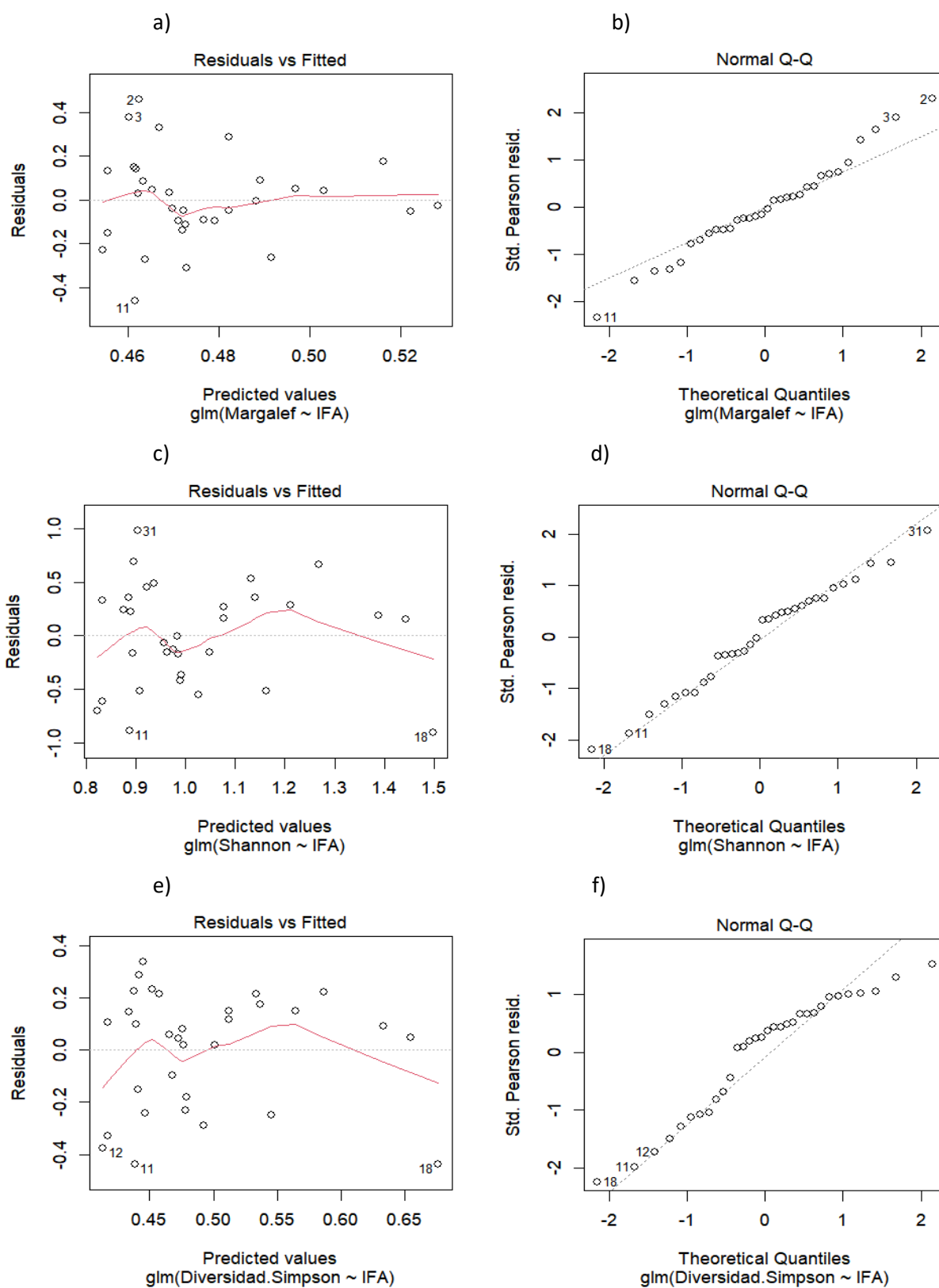
**Tabla 17.** Composición de las especies por biomasa relativa de las especies de peces registradas en los arrecifes de Huatulco para el año 2019. AGU, San Agustín; RIS, Riscalillo; JIC, Jicaral; HER, Dos Hermanas; IND, La India; CAC, Isla Cacaluta; MAG, Maguey; ENT, La Entrega.

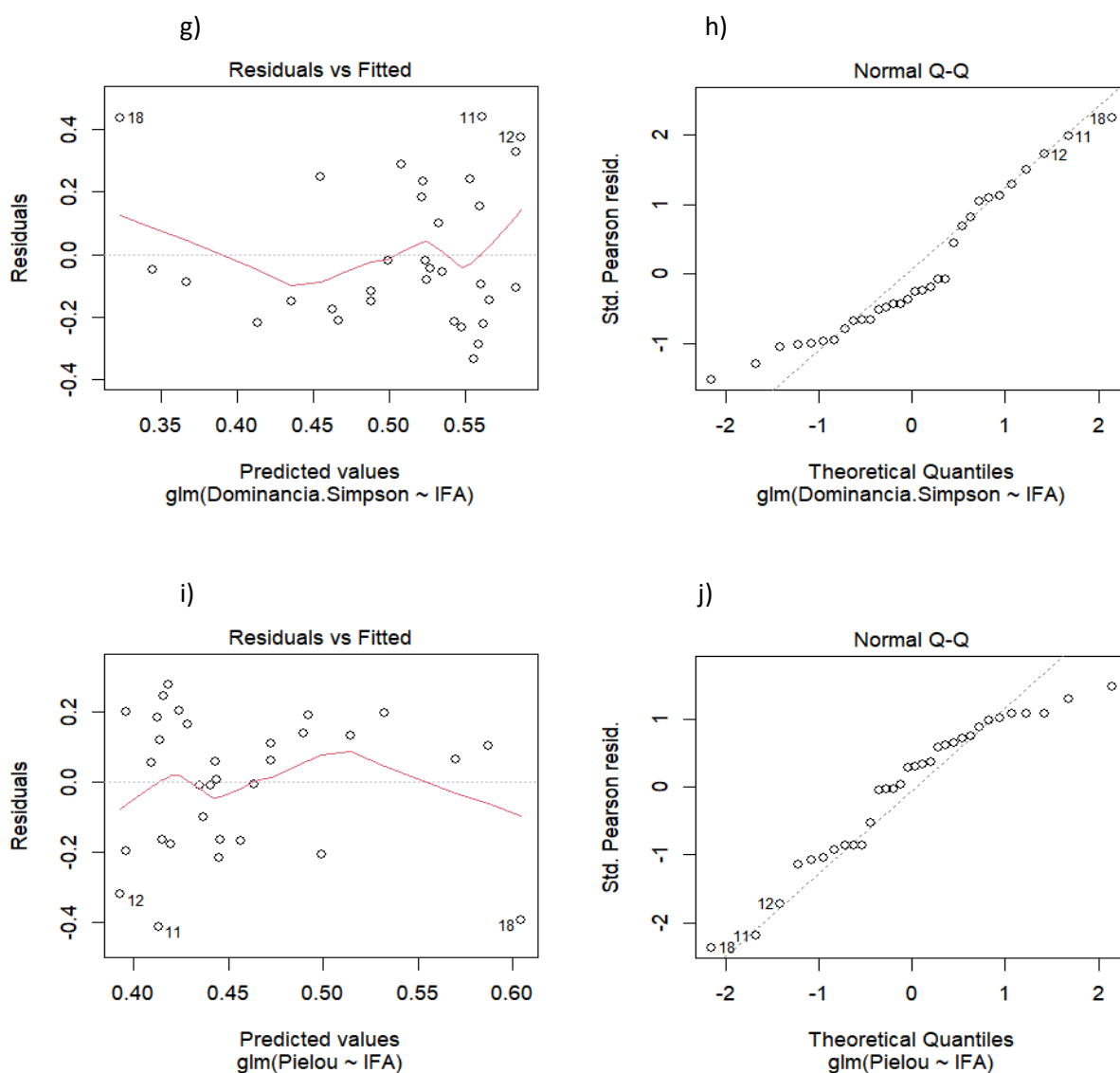
Especie	AGU	RIS	JIC	HER	IND	CAC	MAG	ENT
<i>Prionurus laticlavus</i>	5.431	7.117		2.442		1.227		
<i>Chaetodon humeralis</i>					0.054	0.012		0.054
<i>Johnrandallia nigristrois</i>	0.05		0.035		0.069	0.049	0.007	0.007
<i>Holacanthus passer</i>		0.027			2.141	0.027	0.027	0.153
<i>Pomacanthus zonipectus</i>					0.12			
<i>Gymnomuraena zebra</i>					0.063			0.121
<i>Ophioblennius steindachneri</i>		0.0003		0.006		0.095		0.009
<i>Plagiotremus azaleus</i>				0.0002	0.001			
<i>Caranx caballus</i>								0.018
<i>Caranx sexfasciatus</i>		0.017						
<i>Cirrhitichthys oxycephalus</i>					0.044			0.08
<i>Cirrhitus rivulatus</i>							0.042	
<i>Kyphosus elegans</i>	0.053							0.315
<i>Haemulon maculicauda</i>			0.015					0.015
<i>Bodianus diplotaenia</i>	0.194	0.221			0.326	0.623	0.013	0.073
<i>Halichoeres chierchiae</i>		0.048			0.015		0.036	0.048
<i>Halichoeres dispilus</i>		0.002			0.007	0.007	0.017	0.076
<i>Halichoeres nicholsi</i>		0.369	0.125		12.793	1.090	0.431	
<i>Halichoeres notospilus</i>							0.003	0.035
<i>Novaculichthys taeniourus</i>								0.108
<i>Thalassoma lucasanum</i>	0.189	0.088	0.088	0.318	0.4	0.504	0.212	1.021
<i>Lutjanus argentiventris</i>	0.193		0.027	0.234	0.17		0.092	0.298
<i>Coryphopterus urospilus</i>								0.003
<i>Myripristis leiognathos</i>					0.001			
<i>Neoniphon suborbitalis</i>	0.016				0.016	0.079		
<i>Mulloidichthys dentatus</i>	0.538				0.496		0.108	
<i>Abudefduf troschelii</i>	0.224			0.005		0.226		0.293
<i>Azurina atrilobata</i>		0.003			0.954	1.289		0.239
<i>Microspathodon bairdii</i>		0.313						
<i>Microspathodon dorsalis</i>		0.110	0.680	0.407	0.175	3.770		6.347
<i>Stegastes acapulcoensis</i>	2.768	2.506	1.598	3.258	1.811	7.177	3.112	3.243
<i>Stegastes flavilatus</i>		0.197	0.001	0.002	0.18	0.561	1.796	0.931
<i>Cephalopholis colonus</i>					0.08			0.003

<i>Cephalopholis panamensis</i>	0.156	0.093	0.208	0.112	0.052	0.131
<i>Epinephelus labriformis</i>	0.204					
<i>Serranus psittacinus</i>		0.0003		0.038	0.056	0.101
<i>Fistularia commersonii</i>	0.873					
<i>Melichthys niger</i>			0.022			
<i>Sufflamen verres</i>	0.153	0.022		0.551	0.059	0.059
<i>Diodon holocanthus</i>		0.117			0.064	0.341
<i>Diodon hystrix</i>		0.045	3.031	0.239		
<i>Cantherhines dumerilii</i>	0.117	0.056		1.588		
<i>Arothron hispidus</i>				0.246	0.396	
<i>Arothron meleagris</i>	0.207		0.49	3.763	0.366	
<i>Canthigaster punctatissima</i>				0.002	0.015	

---

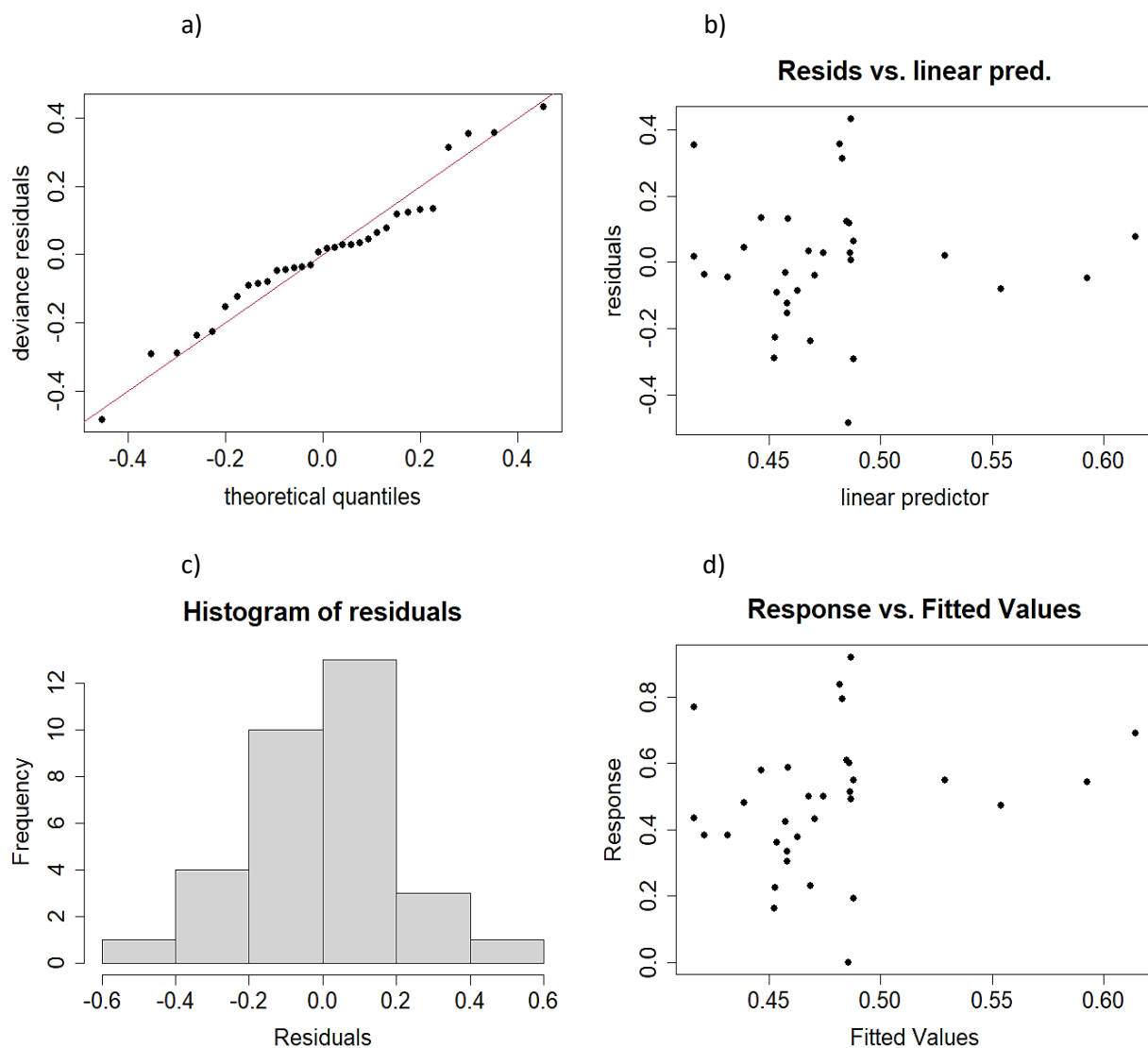
## Anexo D





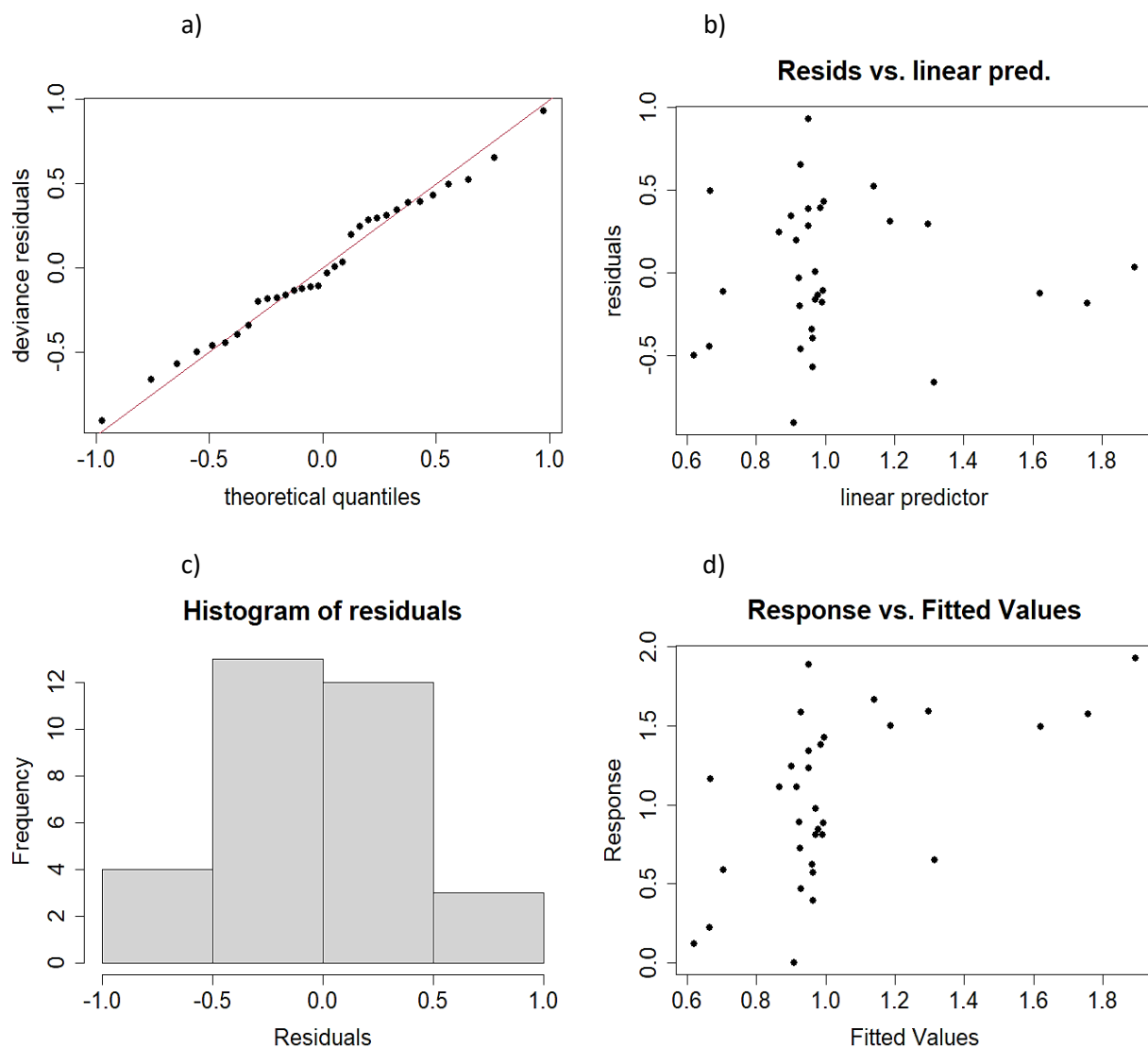
**Figura 22.** Abundancia. Residuos versus los valores pronosticados para el índice de Margalef (a), diversidad de Shannon (c), diversidad de Simpson (e), dominancia de Simpson (g) y equitatividad de Pielou (i). Normalidad Q-Q con el índice de Margalef (b), diversidad de Shannon (d), diversidad de Simpson (f), dominancia de Simpson (h) y equitatividad de Pielou (j).

## Anexo E



**Figura 23.** Abundancia. Análisis de residuales del modelo aditivo generalizado del IFA con el índice de Margalef. Normalidad Q-Q (a), valores residuales (b), histograma de residuos (c) y respuesta frente a los valores ajustados (d).

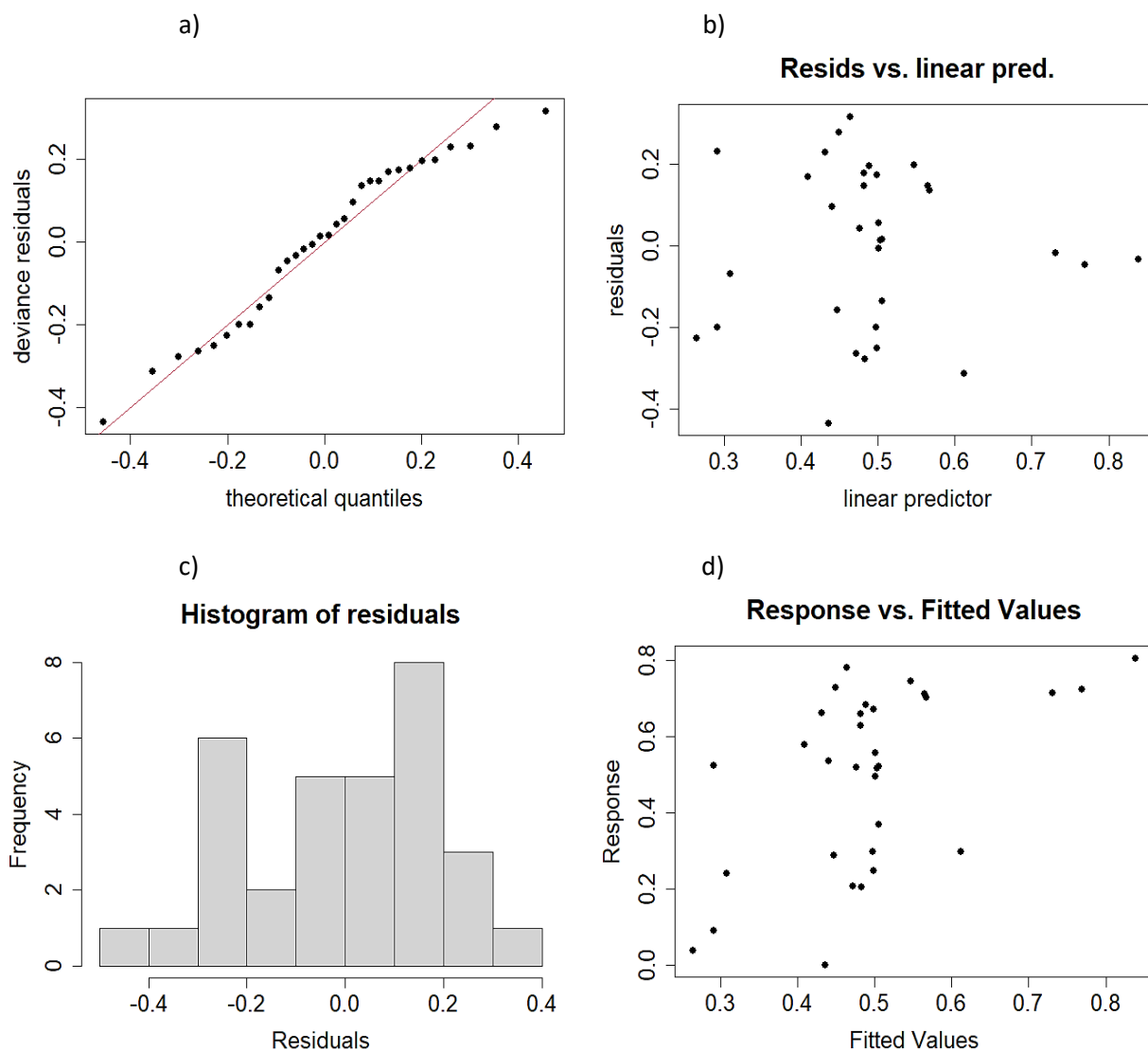
## Anexo F



**Figura 24.** Abundancia. Análisis de residuales del modelo aditivo generalizado del IFA con la diversidad de Shannon. Normalidad Q-Q (a), valores residuales (b), histograma de residuos (c) y respuesta frente a los valores ajustados (d).

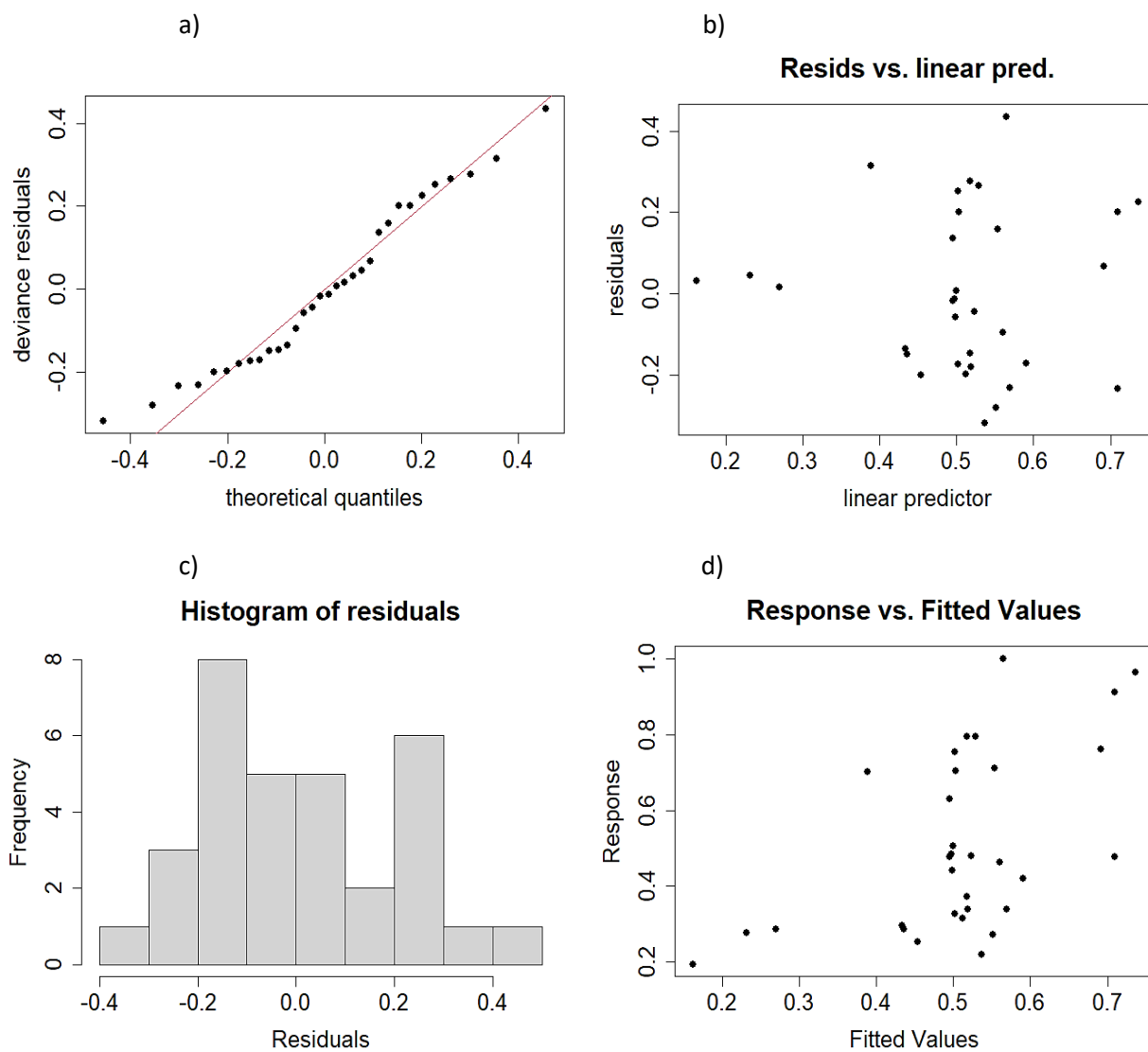


## Anexo G



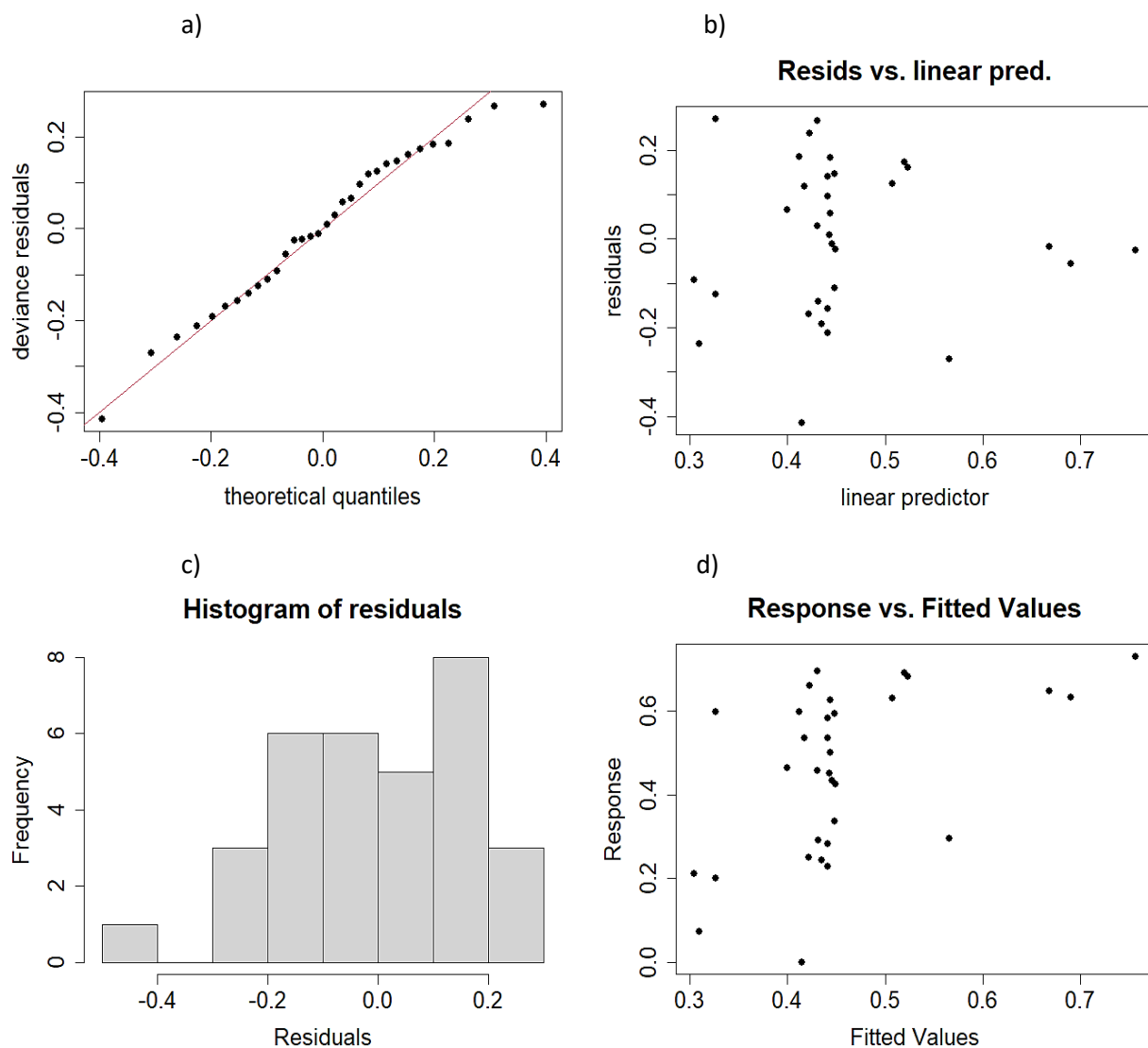
**Figura 25.** Abundancia. Análisis de residuales del modelo aditivo generalizado del IFA con la diversidad de Simpson. Normalidad Q-Q (a), valores residuales (b), histograma de residuos (c) y respuesta frente a los valores ajustados (d).

## Anexo H



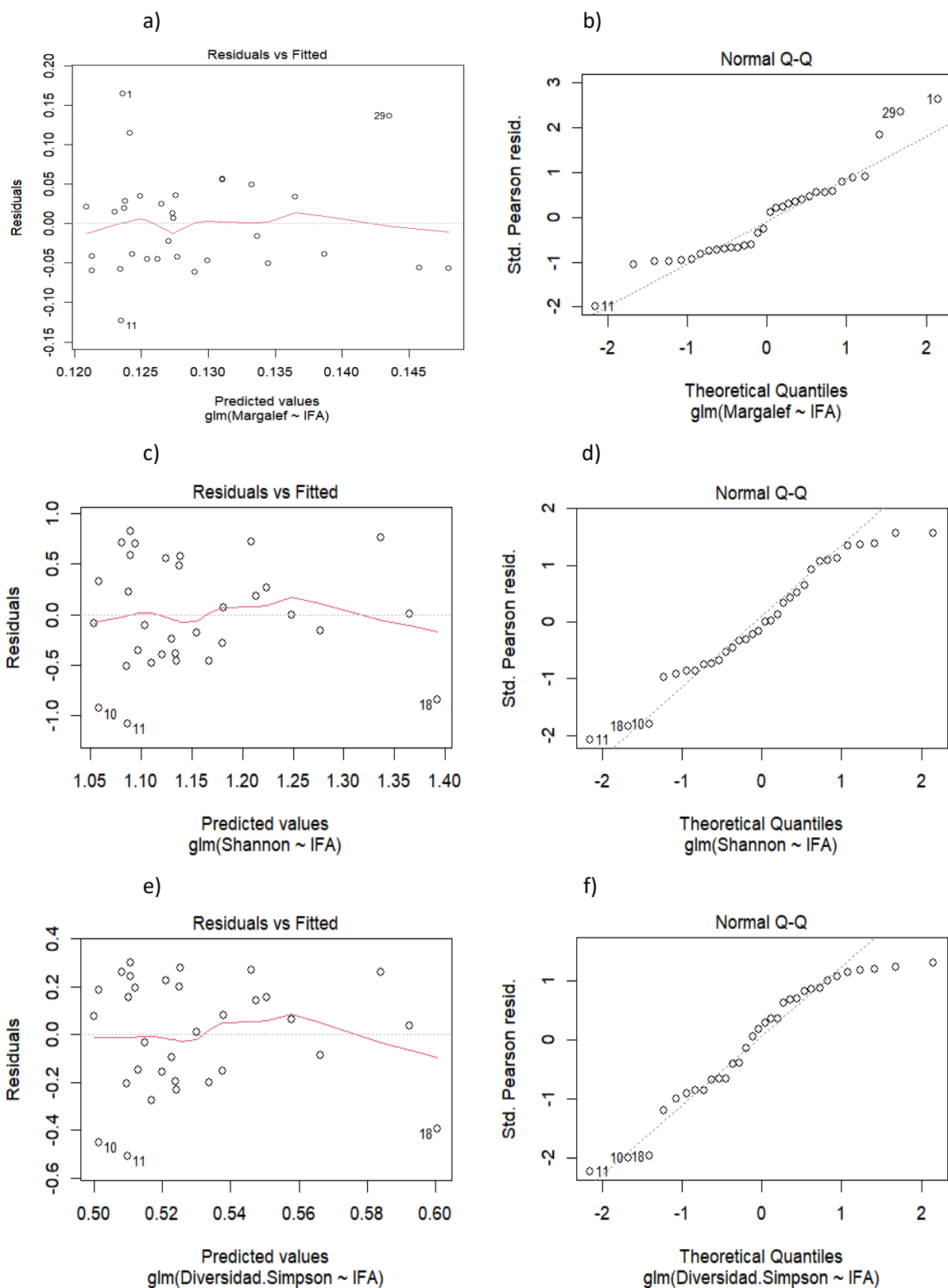
**Figura 26.** Abundancia. Análisis de residuales del modelo aditivo generalizado del IFA con la dominancia de Simpson. Normalidad Q-Q (a), valores residuales (b), histograma de residuos (c) y respuesta frente a los valores ajustados (d).

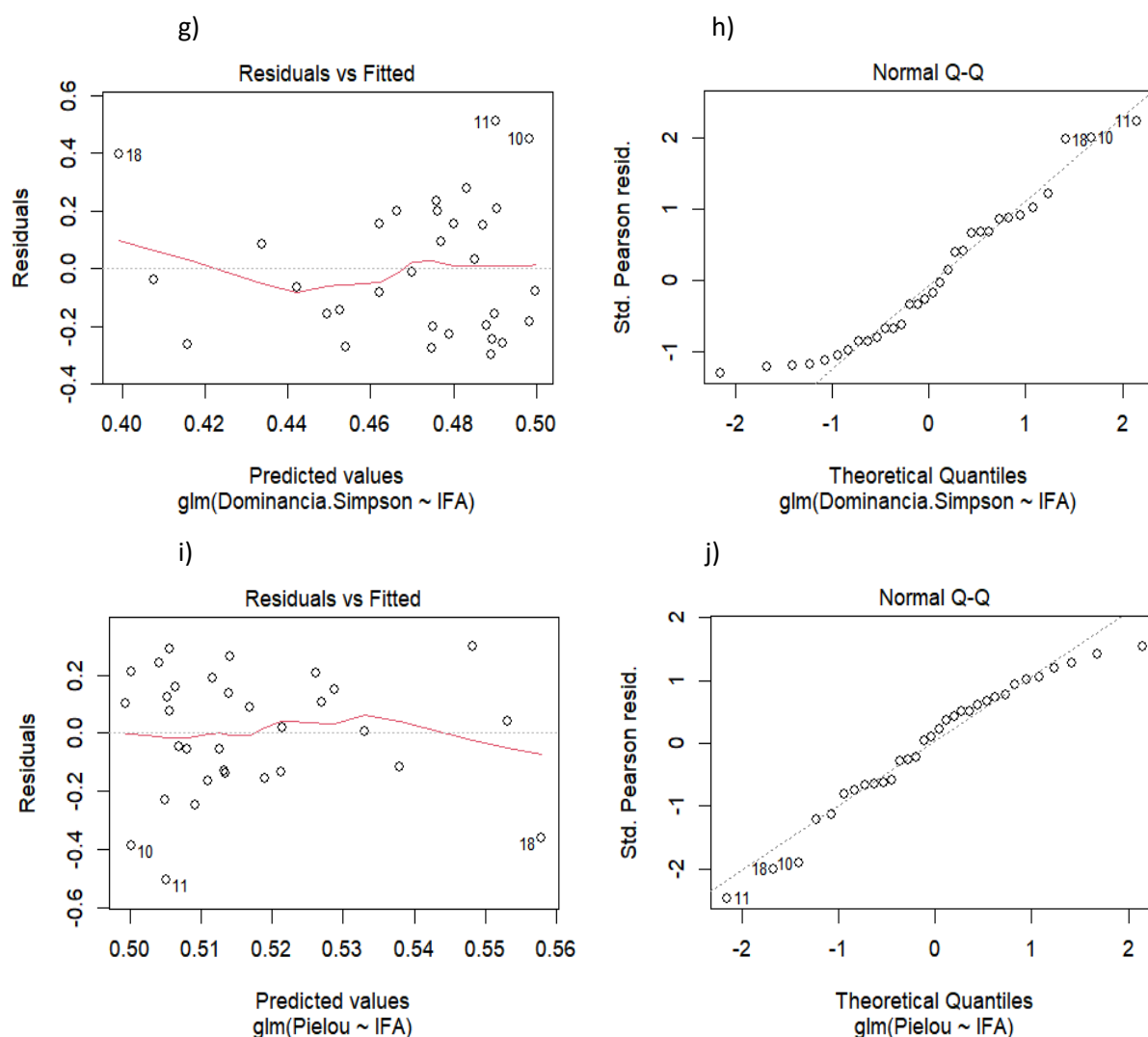
## Anexo I



**Figura 27.** Abundancia. Análisis de residuales del modelo aditivo generalizado del IFA con la equitatividad de Pielou. Normalidad Q-Q (a), valores residuales (b), histograma de residuos (c) y respuesta frente a los valores ajustados (d).

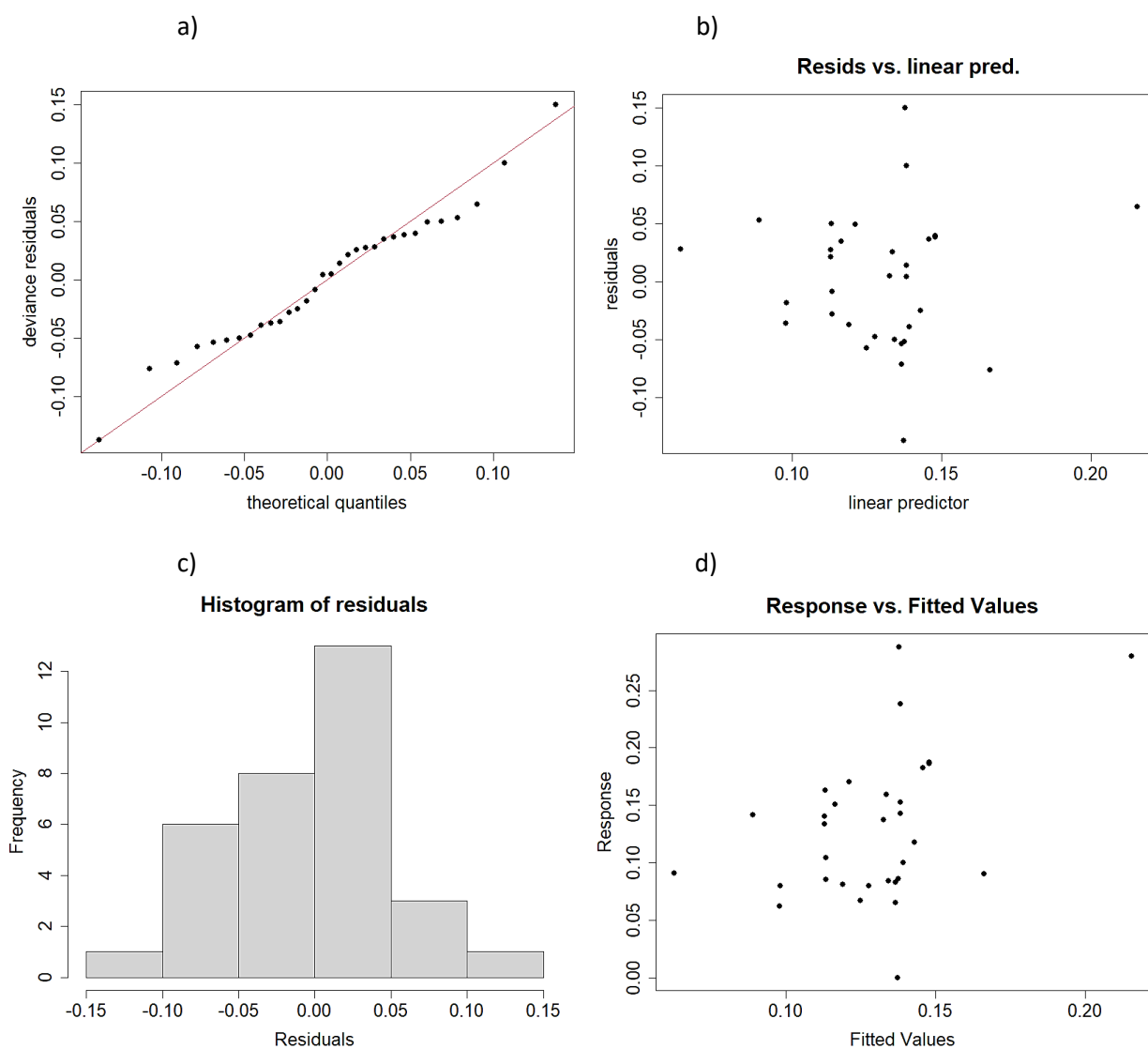
## Anexo J





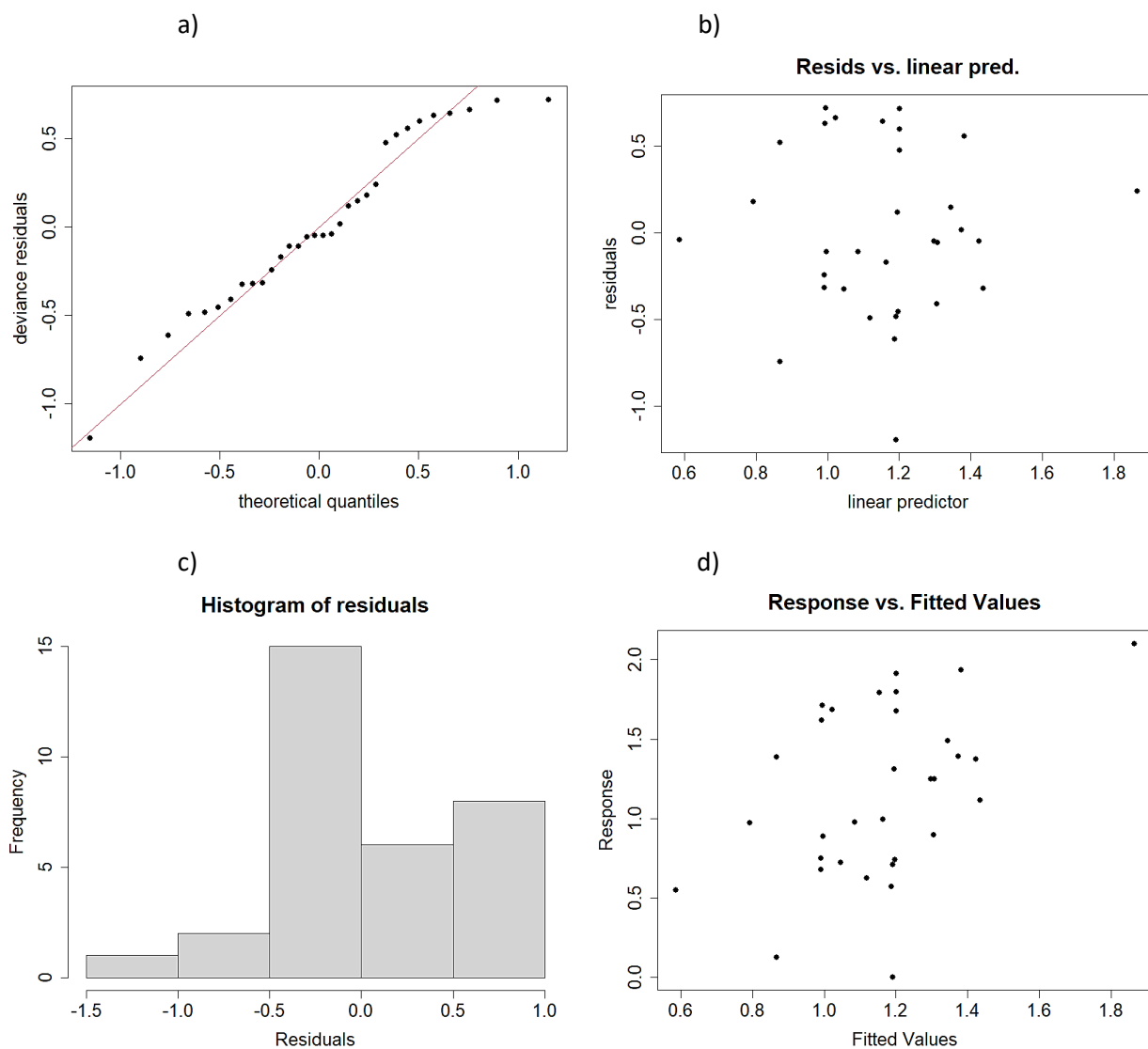
**Figura 28.** Biomasa. Residuos versus los valores pronosticados para el índice de Margalef (a), diversidad de Shannon (c), diversidad de Simpson (e), dominancia de Simpson (g) y equitatividad de Pielou (i). Normalidad Q-Q con el índice de Margalef (b), diversidad de Shannon (d), diversidad de Simpson (f), dominancia de Simpson (h) y equitatividad de Pielou (j).

## Anexo K



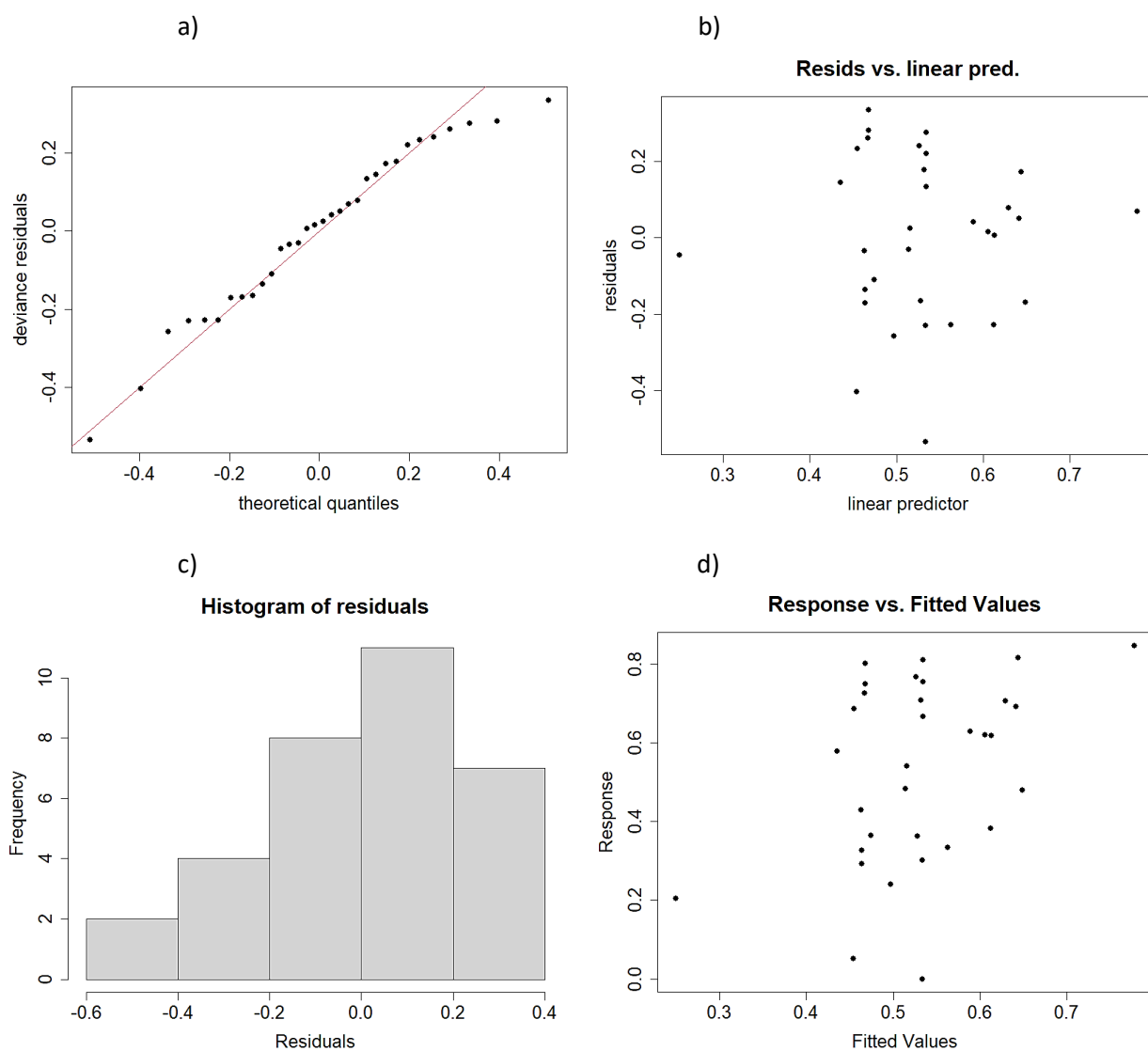
**Figura 29.** Biomasa. Análisis de residuales del modelo aditivo generalizado del IFA con el índice de Margalef. Normalidad Q-Q (a), valores residuales (b), histograma de residuos (c) y respuesta frente a los valores ajustados (d).

## Anexo L



**Figura 30.** Biomasa. Análisis de residuales del modelo aditivo generalizado del IFA con la diversidad de Shannon. Normalidad Q-Q (a), valores residuales (b), histograma de residuos (c) y respuesta frente a los valores ajustados (d).

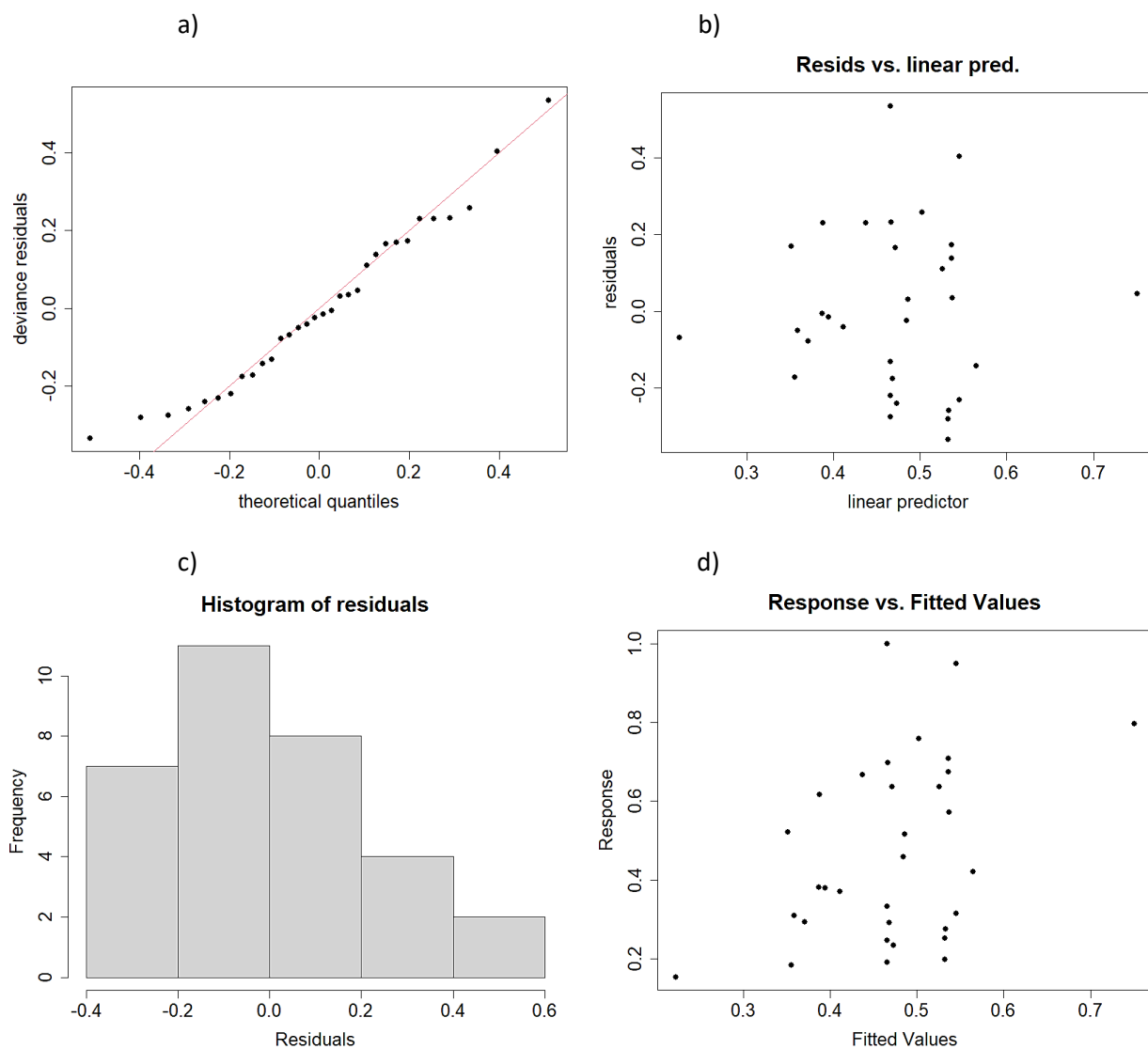
## Anexo M



**Figura 31.** Biomasa. Análisis de residuales del modelo aditivo generalizado del IFA con la diversidad de Simpson. Normalidad Q-Q (a), valores residuales (b), histograma de residuos (c) y respuesta frente a los valores ajustados (d).

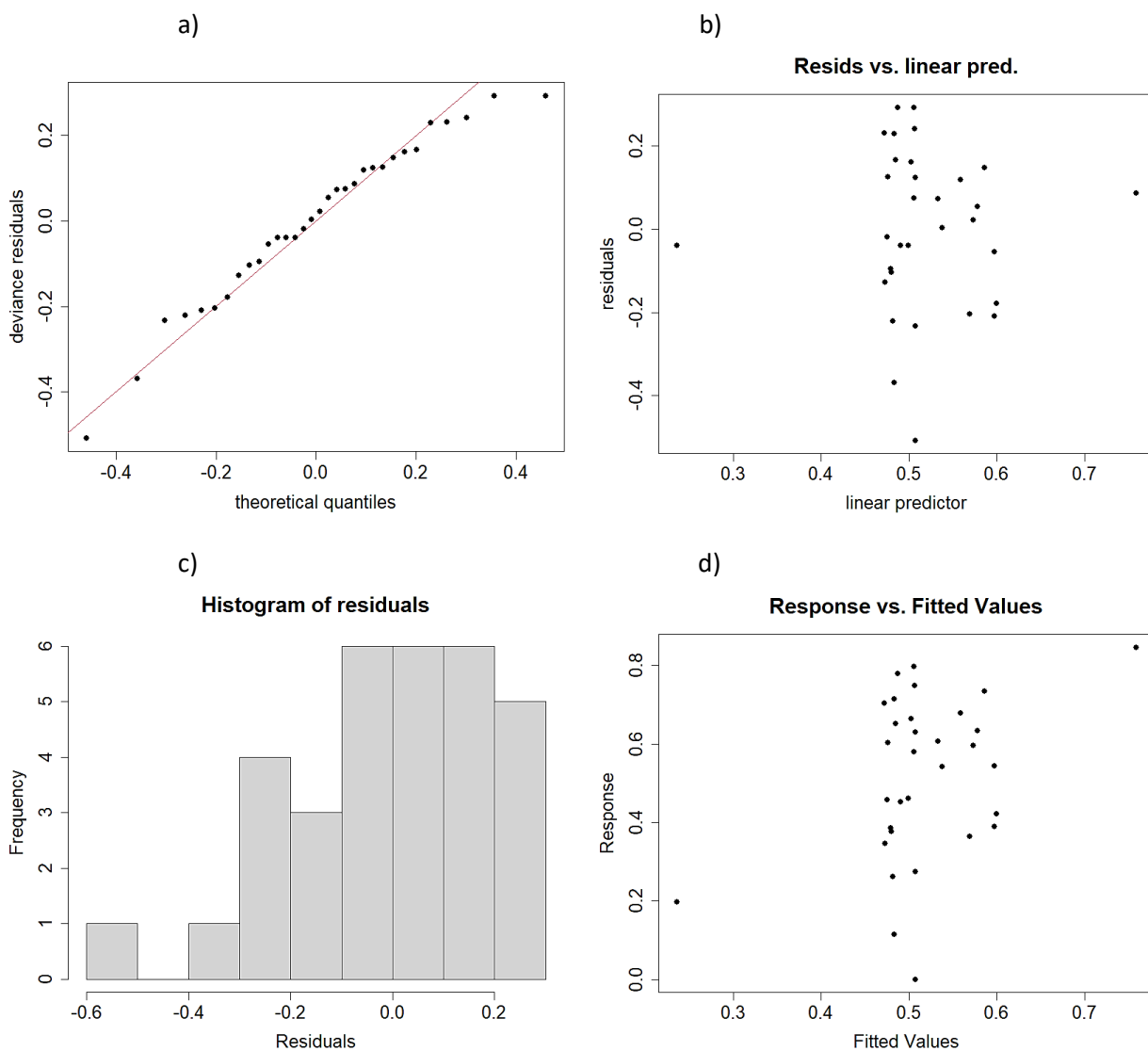


## Anexo N



**Figura 32.** Biomasa. Análisis de residuales del modelo aditivo generalizado del IFA con la dominancia de Simpson. Normalidad Q-Q (a), valores residuales (b), histograma de residuos (c) y respuesta frente a los valores ajustados (d).

## Anexo Ñ



**Figura 33.** Biomasa. Análisis de residuales del modelo aditivo generalizado del IFA con la equitatividad de Pielou. Normalidad Q-Q (a), valores residuales (b), histograma de residuos (c) y respuesta frente a los valores ajustados (d).