



Universidad Nacional Autónoma de México
Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología



Aplicación de un Modelo Inverso para estimar la Biomasa Zooplanctónica en la Bahía de Campeche

T E S I S

Que para obtener el grado de
Maestra en Ciencias del Mar y Limnología
(Biología Marina)

P r e s e n t a

Bíol. Mar. María de Lourdes Figueroa Núñez

Director de Tesis

Dr. David Alberto Salas de León

Comité Tutorial

Dr. Raúl Aguirre Gómez

Dr. Xavier Chiappa Carrara

Dra. María Adela Monreal Gómez

Dra. Martha Signoret Poillon

México, D. F., 2010



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta 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 titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIA

Al hombre más sabio de este mundo, muchas gracias por compartir conmigo toda tu experiencia, por aconsejarme y enseñarme que cuando uno quiere algo, siempre puede lograrlo!!! Muchas gracias por todo lo que hemos compartido, por llegar cada domingo a preguntarme si estoy dormida, por bailar siempre conmigo “ El Negro José” , por cantar “Me importas tu” y por cada vez que me has levantado diciendo “animó cara de perro”, porque si la vida diera un reconocimiento tu tendrías un posdoctorado , eres el mejor padre del mundo!!!

A la mujer más hermosa!!!! porque eres la mejor médico, con un abrazo curas mis penas y con un beso mis heridas, porque siempre has estado ahí para mí aún cuando no estás de acuerdo conmigo, gracias por todo lo que me has dado desde las idas a todos los parques del DF, hasta la preocupación que te causa cada vez que me voy al mar, eres lo mejor que me pudo haber pasado en la vida, eres mi ángel más grande y el mejor regalo es ver tu sonrisa, aun cuando me regañes por no querer planchar mi ropa, te amo mami!!!

A Jaimito, por cada una de las pláticas que hemos tenido en los desayunos, aunque a veces provocas que se me haga tarde, por tus abrazos cuando realmente los necesito (aunque te arriesgues a salarte), todavía recuerdo cuando nos despedimos por primera vez cuando me fui a Vallarta, me dijiste que todo era por algo bueno y venos ahora terminando el segundo paso de una larga carrera, gracias por ser mi hermano mayor que yo seré siempre tu burro, y seguiremos viendo Gladiador hasta que algún día el emperador gane!!!

A mi primo, porque más que un hermano eres mi primo!!! Gracias por tantas cosas que he aprendido, por enseñarme a nadar en el mar a pesar de los animales mortíferos que nos encontrábamos, por apoyarme siempre en todo momento, por enseñarme muy a tu manera que la vida es para disfrutarse con responsabilidad e instruirme en la humildad cada vez que me degradabas de copiloto master a junior por no querer ir por los refrescos, muchas gracias por ser mi mejor amigo y compartir tantos momentos conmigo, tu eres el culpable

de que ahora mi vida sea el mar y es algo que te agradeceré infinitamente, porque siempre seremos Primos!!!!

A mi hermana, eres la mujer más bella!!!! Gracias por aguantarme todos estos años, por perdonar cada vez que me ponía tu ropa y tomaba tus zapatos, o cuando me quedaba viendo cómo te arreglabas, pero no me podías culpar por ser como tú, una mujer fuerte pero muy tierna, más cuando me pellizcabas la lengua o me amarrabas con las corbatas, pero sé que eso era un entrenamiento para la vida, por jugar tackleado conmigo hasta que mi pequeño cuerpecito fue un poco grande y, por cada uno de los éxitos que has compuesto para mí: Doña Mariquita, el burrito está triste, el burrito está contento, el burrito agarro el cloro... eso solo por mencionar algunos, gracias por ser mi amiga y mi confidente!!!

A todos ustedes les dedico este trabajo, porque son cada uno de los pilares que sostiene mi mundo, porque por ustedes son el faro que me lleva a puerto aún en la más terrible tormenta, los amo muchísimo y agradezco a Dios el que me haya mandado 12 años después a terminar de construir lo que ahora somos, un grupo de 6 amigos al que llamamos familia.

AGRADECIMIENTOS

Al doctor David Alberto Salas de León, muchísimas gracias por todo el apoyo que me dio durante estos 4 años, por escucharme y aconsejarme, porque más que un director de tesis ha sido un gran ejemplo, por llevarme al lado oscuro de los modelos matemáticos y enseñarme tanto acerca de la vida.

A la Dra. María Adela Monreal Gómez por sus comentarios acerca del trabajo y las enseñanzas en el laboratorio, a la Dra. Martha Signoret Poillon por todas las sugerencias en el campo biológico, al Dr. Raúl Aguirre Gómez por sus críticas en la metodología y al Dr. Xavier Chiappa Carrara por su aporte en la parte estadística y el desarrollo de la investigación, muchas gracias por enriquecer esta tesis con su conocimiento y experiencia.

Al posgrado de Ciencias del Mar y Limnología por brindarme la oportunidad de realizar la maestría y darme todo el apoyo para su desarrollo, en especial a Gabriela Almaraz, Guadalupe Godoy y Chantal Ruiz, muchas gracias por su paciencia.

A CONACYT, por brindarme el apoyo económico durante el posgrado.

A mi familia por todo el apoyo que me han brindado, por su paciencia y amor, porque siempre estuvieron ahí para alentarme, los amo profundamente.

A la familia Chacón García, porque ustedes fueron pieza fundamental del inicio de esta carrera, por aceptarme 4 años sin pedir nada a cambio y apoyarme siempre. A la María y a Keima, porque todo era más fácil cuando estábamos juntas.

A mis hermanas Rosa Argumedo, Annelisse Bárcenas (mi Moshá) y Katia Gonzales, son unas mujeres hermosas, muchas gracias por todo lo que hemos compartido, sus enseñanzas y sobre todo por el apoyo en los momentos difíciles. A mis hermanos Leonardo Luna, George Morales, Javier Seguame (que raro es decirte Javier), Julio Pastor, Carlomagno

Zarate, por todos sus consejos, por las risas, por el llanto, por todo, dicen que los amigos son los hermanos que uno escoge y ustedes son parte de mi familia, los amo.

A los laboratorios de oceanografía física y procesos oceanográficos: Sarai, Erika, Tania, Laura, Erick, Elizabeth, Ana, Jorge, muchas gracias por todo el apoyo, los avisos, por todo lo que me enseñaron, porque a pesar de la distancia siempre me hicieron sentir parte del grupo, pero sobre todo muchas gracias por su amistad.

A la compañía de teatro “Aquí estamos”, porque siempre han sido y serán parte importante de mi vida!!!, muchas gracias por estar siempre ahí ya sea en tierra o en el horizonte, los quiero mucho.

A Lupita Peña, una señora hermosa, muchas gracias por todo el apoyo que me ha dado en este tiempo, por su amistad y comprensión, la quiero muchísimo!!! y a Carlos Ramírez, por todos los momentos que hemos compartido, por las risas, las platicas y hasta los momentos moñomoñescos, esta es la primera de muchas metas que conquistamos juntos, muchas gracias por todo lo que has despertado en mi y apoyo que me has brindado, te amo.

Y a todos mis amigos que no por ser mencionados son menos importantes, muchas gracias a todos los que de alguna u otra manera influyeron aunque sea un poco en el desarrollo de este trabajo.

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1 Importancia Ecológica del Zooplancton	3
1.2 Planteamiento del Problema	8
1.3 Los Modelos Inversos	9
2. OBJETIVO	11
3. ANTECEDENTES	12
3.1 Modelación de Zooplancton	12
3.2 Zona de Estudio	14
3.3 El Zooplancton en la Bahía de Campeche	19
4. METODOLOGÍA	21
4.1 Origen de los Datos	21
4.1.1 Datos de Biomasa	21
4.1.1.1 Procesamiento de Datos y Análisis Estadístico	25
4.1.2 Datos de Temperatura, Salinidad y Profundidad	25
4.2 Análisis de datos	26
4.3 Formulación del Modelo Inverso	27
4.4 Desarrollo del modelo inverso	30
4.4.1 Ecuaciones de Primer Grado	30
4.4.2 Ecuaciones de Segundo y Tercer Grado	31
4.5 Validación del modelo	32

5. RESULTADOS	34
5.1 Análisis de Datos	34
5.2 Modelación	37
5.2.1 Modelación de Primer Grado	38
5.2.1.1 Modelación de todos los puntos de muestreo	38
5.2.1.2 Modelación por grupos de similitud	39
5.2.1.3 Modelación por profundidad	47
5.2.1.4 Modelación completa por profundidad	54
5.2.2 Modelación de Segundo Grado	61
5.2.3 Modelación de Tercer Grado	65
6. DISCUSIÓN	73
7. CONCLUSIONES	78
8. REFERENCIAS	80

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1	Ubicación de la Bahía de Campeche	15
Fig. 2	Derrotero correspondiente al crucero FIBAC-I	26
Fig. 3	Modelo de regresión entre la biomasa y la temperatura	35
Fig. 4	Modelo de regresión entre la biomasa y la profundidad	35
Fig. 5	Modelo de regresión entre la biomasa y la salinidad	36
Fig. 6	Modelo de correlación múltiple entre biomasa, temperatura, salinidad y profundidad, basada en análisis de regresión múltiple.	37
Fig. 7	Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada	39
Fig. 8	Análisis de agrupamiento de los puntos de muestreo	40
Fig. 9	Agrupamiento de puntos de muestreo al 80%.	40
Fig. 10	Principales agrupamientos de los puntos de muestreo a 80% de similitud	41
Fig. 11	Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada correspondiente al grupo 1.	43
Fig. 12	Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada correspondiente al grupo 2.	44
Fig. 13	Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada correspondiente al grupo 3.	44
Fig. 14	Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada correspondiente al grupo 4.	45

Fig. 15	Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada correspondiente al grupo 5.	45
Fig. 16	Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada correspondiente al grupo 6.	46
Fig. 17	Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada correspondiente al grupo 7.	46
Fig. 18	Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada a los 20 m de profundidad	49
Fig. 19	Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada a los 36 m de profundidad	49
Fig. 20	Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada a los 52 m de profundidad	50
Fig. 21	Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada a los 68 m de profundidad	50
Fig. 22	Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada a los 84 m de profundidad	51
Fig. 23	Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada a los 100 m de profundidad	51
Fig. 24	Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada a los 116 m de profundidad	52
Fig. 25	Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada a los 132 m de profundidad	52

Fig. 26	Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada a los 148 m de profundidad	53
Fig. 27	Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada a los 164 m de profundidad	53
Fig. 28	Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada obtenida a partir de la ecuación completa aplicada a 20 m de profundidad.	56
Fig. 29	Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada obtenida a partir de la ecuación completa aplicada a 36 m de profundidad.	56
Fig. 30	Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada obtenida a partir de la ecuación completa aplicada a 52 m de profundidad.	57
Fig. 31	Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada obtenida a partir de la ecuación completa aplicada a 68 m de profundidad.	57
Fig. 32	Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada obtenida a partir de la ecuación completa aplicada a 84 m de profundidad.	58
Fig. 33	Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada obtenida a partir de la ecuación completa aplicada a 100 m de profundidad.	58
Fig. 34	Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada obtenida a partir de la ecuación completa aplicada a 116 m de profundidad.	59
Fig. 35	Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada obtenida a partir de la ecuación completa aplicada a 132 m de profundidad.	59
Fig. 36	Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada obtenida a partir de la ecuación completa aplicada a 148 m de profundidad.	60

Fig. 37	Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada obtenida a partir de la ecuación completa aplicada a 164 m de profundidad.	60
Fig. 38	Relación entre la biomasa real y los valores calculados, utilizando la ecuación de la modelación de segundo grado para el grupo 1.	62
Fig. 39	Relación entre la biomasa real y los valores calculados, utilizando la ecuación de la modelación de segundo grado para el grupo 2.	63
Fig. 40	Relación entre la biomasa real y los valores calculados, utilizando la ecuación de la modelación de segundo grado para el grupo 3.	63
Fig. 41	Relación entre la biomasa real y los valores calculados, utilizando la ecuación de la modelación de segundo grado para el grupo 4.	64
Fig. 42	Relación entre la biomasa real y los valores calculados, utilizando la ecuación de la modelación de segundo grado para el grupo 5.	64
Fig. 43	Relación entre la biomasa real y los valores calculados, utilizando la ecuación de la modelación de segundo grado para el grupo 6.	65
Fig. 44	Relación entre la biomasa real y los valores calculados, utilizando la ecuación de la modelación de tercer grado para el grupo 2	67
Fig. 45	Comparación de los valores de biomasa calculada y real a 20 m de profundidad.	68
Fig. 46	Comparación de los valores de biomasa calculada y real a 36 m de profundidad.	68
Fig. 47	Comparación de los valores de biomasa calculada y real a 52 m de profundidad.	69

Fig. 48	Comparación de los valores de biomasa calculada y real a 68 m de profundidad.	69
Fig. 49	Comparación de los valores de biomasa calculada y real a 84 m de profundidad.	70
Fig. 50	Comparación de los valores de biomasa calculada y real a 100 m de profundidad.	70
Fig. 51	Comparación de los valores de biomasa calculada y real a 116 m de profundidad.	71
Fig. 52	Comparación de los valores de biomasa calculada y real a 132 m de profundidad.	71
Fig. 53	Comparación de los valores de biomasa calculada y real a 148 m de profundidad.	72
Fig. 54	Comparación de los valores de biomasa calculada y real a 164 m de profundidad.	72

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Categorías de clasificación de acuerdo al tamaño de los organismos planctónicos	4
Tabla 2	Velocidades de propagación del sonido en aguas costeras del sur del Golfo de México	24
Tabla 3	Medidas de tendencia central y variación de biomasa, temperatura y salinidad	34
Tabla 4	Características de grupos de similitud	41
Tabla 5	Ecuaciones de la modelación por grupos	42
Tabla 6	Comparación de los valores χ^2	42
Tabla 7	Ecuaciones de la modelación por profundidad	47
Tabla 8	Comparación de los valores χ^2	48
Tabla 9	Ecuaciones de la modelación por profundidad	54
Tabla 10	Comparación de los valores χ^2	55
Tabla 11	Valores de χ^2 para la modelación de segundo grado por grupos	61

RESUMEN

La distribución y abundancia de la biomasa de zooplancton se encuentra fuertemente ligada con la distribución de la temperatura (T), la salinidad (S) y la presión (P) o profundidad. De hecho, se pueden usar algunos organismos del zooplancton como indicadores de ciertas masas de agua. La dependencia del zooplancton con las variables ambientales antes mencionadas, ha sido ampliamente usada para inferir la dinámica hidrográfica de ciertas regiones del océano. No obstante los avances tecnológicos, los estudios de campo del zooplancton siguen siendo puntuales y de baja densidad de muestreo. En fechas recientes se han estado usando los perfiladores acústicos de corrientes Doppler (ADCP) lo cual ha aumentado la resolución y densidad en las determinaciones de la biomasa del zooplancton, sin embargo, aún así siguen siendo estudios de baja densidad de muestreo, ya que el área que cubre es pequeña en relación a la total. La importancia económica y ecológica del zooplancton debe de motivarnos a buscar y desarrollar métodos alternos para el estudio de la distribución y abundancia de su biomasa, por lo que el objetivo de este estudio fue desarrollar y aplicar un modelo inverso entre la biomasa del zooplancton (B) y las variables ambientales temperatura (T), salinidad (S) y profundidad (Z), en la Bahía de Campeche. Los métodos inversos son técnicas de análisis y reconstrucción de datos muy útiles que permiten estimar el comportamiento de una variable en zonas donde no se efectuaron mediciones. No obstante, no existen modelos inversos aplicados a aspectos biológicos en los océanos, por lo que esta propuesta representa el primer intento de estructuración de un modelo de esta naturaleza. Se analizaron 3128 datos recabados durante el crucero FIBAC-I, realizado del 14 de agosto al 1 de septiembre de 1996, correspondientes a 930 puntos de muestreo, mediante regresiones lineales y múltiples; para finalmente realizar el modelo inverso en primer, segundo y tercer grado; obteniendo así seis ecuaciones con las que se puede calcular la biomasa, sin encontrar diferencias significativas ($\alpha=0.01$) entre los valores reales y los modelados.

ABSTRACT

Distribution and abundance of zooplankton biomass are strongly linked with temperature (T), salinity (S) and pressure (P) or depth in the ocean. In fact, some zooplankton organisms can be used as characteristic of certain water masses. The dependence of zooplankton on the environmental variables mentioned above has been widely used in order to infer the dynamics of certain regions of the ocean. Despite technological advances, field studies of zooplankton remain being punctual and low density sampling. Recently, acoustic Doppler current profilers (ADCP) have been used to increase the resolution and density measurements of zooplankton biomass, however, studies still remain low density sampling. The economical and ecological importance of zooplankton should motivate us to seek and to develop alternative methods for studying the distribution and abundance of zooplankton biomass, so the objective of this study was to develop and to implement an inverse model between zooplankton biomass (B) and temperature (T), salinity (S) and depth (Z) variables. Data were obtained from the FIBAC-I cruiser, conducted in the summer of 1996 at the Campeche Bay. Inverse methods are analytical techniques of reconstruction data for estimating the behavior of a variable in areas where no measurements were made, however there are no inverse models applied to biological aspects in the oceans, so this thesis represents the first attempt at structuring a model of this nature. We analyzed 3128 data collected during the FIBAC-I cruise, held from August 14th to September 1st 1996, according to 930 sampling points, using linear and multiple regressions, to finally perform the inverse model at the first, second and third degree, thus obtaining six equations with which biomass can be calculated, without finding significant differences ($\alpha= 0.01$) between real and modeled values.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los aspectos de mayor interés en ecología ha sido y sigue siendo el estudio de los factores bióticos y abióticos que regulan la dinámica y estructura de las comunidades naturales. Conocer las interacciones entre estos factores y cuantificar su importancia relativa representa uno de los principales problemas con los que se enfrenta la ecología (Conde-Porcuna et al., 2004).

1.1 Importancia Ecológica del Zooplancton

El zooplancton juega un importante papel en la red trófica de los organismos acuáticos, ya que junto con el fitoplancton, son la base de la producción biológica del ecosistema marino, sosteniendo así subsecuentes niveles. El fitoplancton transforma la energía radiante o radiación solar en energía química, a partir de materias primas inorgánicas ($\text{CO}_2 + \text{Agua}$) el zooplancton transfiere la energía de los productores primarios a los consumidores secundarios (omnívoros, carnívoros primarios, carnívoros secundarios y carnívoros terciarios) (Raymont, 1983), jugando un papel significativo en el potencial productivo de cualquier ambiente acuático (Wickstead, 1979). En este sentido, el papel del zooplancton herbívoro, adquiere una importancia relevante dentro de la estructura ecológica de los ambientes marinos (Sverdrup, *et al.*; 1970), además de tener un alto impacto en los niveles tróficos superiores, donde su abundancia es directamente proporcional a la cantidad de peces (Marvelias y Reid, 1997; Aoki y Komatsu, 1997). Además, representa un importante transporte de biomasa desde zonas profundas a superficiales debido a sus migraciones verticales (Longhurst y Harrison, 1988; Longhurst et al., 1990; Morales, 1999).

Diversos factores oceanográficos afectan la magnitud y la tasa de la producción primaria (Riley y Chester, 1989), lo que influye directamente en niveles superiores. Desde hace más de tres décadas el punto central de muchos estudios ecológicos ha sido describir los flujos de energía dentro de los sistemas, además de desarrollar técnicas para el cálculo de las interacciones biológicas entre la mayoría de los grupos que los conforman (Edmonson y

Winberg,1971; Holme y McIntyre, 1971; Bagenal, 1978; Fasham, 1984). El grado en el cual los ecosistemas marinos son controlados por los procesos de flujo de energía depende del balance de ésta en ambos sentidos (Verita y Smeteack, 1996; Harris et al., 2000) desde los productores primarios hasta los depredadores tope.

La estructura trófica que poseen los ambientes acuáticos consta de 4 a 5 niveles alimenticios (Lalli y Parsons, 1993). El papel ecológico de los organismos se determina por su posición en la red trófica, donde el tamaño (tabla 1) y alimentación son características categóricas para el zooplancton (Lenz, 2000).

Tabla 1. Categorías de clasificación de acuerdo al tamaño de los organismos planctónicos.

Grupo	Límites	Constituido por:
Picoplancton	0.2- 1 μm	Cianobacterias
Ultrananoplancton	< 2 μm	Bacterias libres
Nanoplancton	2–20 μm	Hongos, flagelados, diatomeas
Microplancton	20–200 μm	La mayoría de las especies fitoplanctónicas, foraminíferos, ciliados, rotíferos, nauplios de copépodos.
Mesoplancton	200 μm –2 mm	Cladóceros, copépodos, larváceos
Macroplancton	2–20 mm	Pterópodos, copépodos, eufáusidos, quetognatos
Micronecton	20–200 mm	Cefalópodos, mictófidos
Megaloplancton	> 20 mm	Sifozoos y taliáceos

(Modificada de Omori e Ikeda, 1992).

La variación de las poblaciones marinas respecto al zooplancton ha recibido gran atención, como lo demuestran Malchow et al. (2001), en una síntesis de modelos aplicados a la dinámica del plancton. Se han desarrollado modelos predictivos que muestran cómo las modificaciones del ambiente afectan la producción pelágica mediante la relación de la producción primaria y el zooplancton (Evans y Pepin, 1989; Flagg et al., 1994; Malchow et al., 2001). La importancia del conocimiento del zooplancton es primordial para un buen manejo de las pesquerías, ya que la fase planctónica de las especies determina su variabilidad y regulación (Cushing, 1972, 1996; Horwood et al; 2000). La UNESCO (1979) reporta una relación directa entre la abundancia de zooplancton como alimento y la variación en el reclutamiento poblacional en peces; que se define como el punto de partida del crecimiento poblacional, donde los individuos enfrentan las condiciones que el medio les ofrece; por lo que su papel económico y ecológico es fundamental. Hoy en día se da una gran importancia al estudio del plancton como entidad dinámica. Ninguna población de animales es estática y la del zooplancton es muy fluctuante, tanto a corto como a largo plazo. Cualquier alteración de los factores endógenos (ej.:sexo y edad) y exógenos (ej.:luz, temperatura, salinidad) (Ashijanet al., 2006; Forward, 1988; Huntley y Brooks, 1982; Thomson y Allen, 2000) que influyen sobre una población producirá, de alguna manera, un cambio en ella. Es por ello que gran parte de las investigaciones realizadas en el estudio del zooplancton, tienen por objeto descubrir de qué modo los cambios en los factores ambientales les afectan y qué cambios se esperarían en él como consecuencia (Wickstead, 1979).

Otro aspecto relevante del zooplancton es el hecho de que su distribución, su composición y abundancia son producto de un conjunto de condiciones físicas, químicas y biológicas. Por ello, la presencia de ciertas especies o grupos de especies en determinada zona representa también, la ocurrencia de ciertas condiciones. De este modo, varios de estos organismos (por ejemplo los Quetognatos) pueden ser considerados como indicadores de condiciones oceanográficas (Bratkovich, 1988) o de la presencia de una determinada masa de agua (Salas de León et al., 2005).

La heterogeneidad en la distribución del zooplancton ha sido reconocida desde hace muchos años (Hardy, 1936; tomado de Seuront y Lagadeuc, 2001). Los organismos zooplanctónicos, en su mayoría, son nadadores activos; aunque sus movimientos no son comparables con la distancia que recorren al ser transportados por las corrientes. Las condiciones hidrográficas, los procesos físicos tales como giros y frentes, influyen en su distribución (Gómez-Ponce y Gracia, 2003). Se ha visto que la variabilidad en la estructura física de la columna de agua puede causar la redistribución de los organismos a través de procesos de mezcla, o puede aislar comunidades biológicas en diferentes masas de agua (Gallager et al., 1996). Estos procesos hidrodinámicos que inciden en la distribución del plancton, operan en varios niveles, desde la escala mayor que representa la advección de grandes masas de agua, hasta la turbulencia y otros fenómenos locales, pasando por fenómenos a mesoescala como las surgencias, giros ciclónicos y anticiclónicos y las corrientes de marea (Mc Gowan, 1967; Wiebe et al., 1976); por lo que crean parches de diferente tamaño y forma, que presentan movimientos verticales y horizontales (Hutchinson, 1967).

La luz es considerada como el principal factor que dispara la migración vertical y así mismo, se considera que regula los tiempos de ésta (Russell, 1927; Hutchinson, 1967; Forward, 1988; Haney, 1993; Rigelber, 1993). Son dos las hipótesis que se han propuesto para explicar este hecho: Una es la Hipótesis de Preferendum o de la isoluma, en la cual se propone que el plancton asciende y desciende siguiendo la isoluma de su preferencia y, por otro lado, la hipótesis de razón de cambio que establece que la migración comienza con el cambio en la velocidad y dirección de la luz, es decir que al atardecer la velocidad de cambio de la luz aumenta, disminuyendo su intensidad en la superficie, lo que provoca un movimiento de ascenso, mientras que al amanecer la intensidad aumenta en la superficie, así como, la velocidad de cambio, provocando un descenso (Ringelberg, 1964; Forward, 1988).

El estudio del zooplancton inició en el siglo XIX, dirigiéndose principalmente a conocer la composición zooplanctónica. Actualmente los estudios se enfocan principalmente al conocimiento de la biología de las especies comerciales (aspectos morfológicos,

taxonómicos, ecológicos y zoogeográficos) y a la exploración y evaluación pesquera en zonas de desove, detección de recursos potenciales, estimación de biomasa y producción sostenible, básicamente en regiones costeras.

Debido al tamaño que pueden alcanzar algunos parches de organismos, es importante ecológicamente evaluar su biomasa y no sólo su número, ya que de ella depende su papel en la dinámica costera (Gasca y Suárez, 1991). La biomasa es la cantidad de materia viva o carbono existente en un área determinada (Powell, 1989). Para el caso del zooplancton la biomasa puede ser considerada como un índice de la cantidad de materia viva presente en la forma de uno o varios tipos de organismos que comprenden una comunidad de plancton (Ohman y Smith, 1995).

Varias propiedades del zooplancton que incluyen tamaño, peso, volumen y composición química se usan comúnmente como índice de biomasa. Los métodos clásicos de medir biomasa pueden ser clasificados en tres: gravimétricos, volumétricos y químicos.

El método más utilizado para estudiar el zooplancton tanto cualitativa como cuantitativamente, es a través de su captura con redes. Este método permite el reconocimiento de especies, determinar el intervalo de talla de los organismos colectados debido a la apertura de malla y si se adiciona un contador de flujo a la red es posible calcular la densidad de los organismos. Presenta ciertos inconvenientes como son la variación de malla, la obstrucción de la red y errores al calcular el flujo del agua a través del arrastre (Burd y Thomson, 1993), además que la información que proporcionan las redes es restrictiva tanto espacial, como temporalmente.

El estudio de la biomasa, distribución y agregación del zooplancton da información crucial para entender a la comunidad planctónica marina. Actualmente el uso de ecosondas y ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), permiten obtener una estimación confiable de la concentración y la abundancia de la biomasa del zooplancton, aunque aún no del tipo de organismos registrados, esto a través de transductores que transmiten una señal que rebota contra los organismos y es reflejada hacia canales de recepción, así al cuantificar la

diferencia entre la intensidad de onda emitida respecto a la reflejada y después de una serie de transformaciones matemáticas, se determina la biomasa de zooplancton.

1.2 Planteamiento del Problema

El estudio de la Bahía de Campeche es importante desde las perspectivas física, química, geológica y biológica; ya que presenta un gran número de procesos hidrodinámicos como mareas, giros de varias escalas, ondas internas (Díaz Flores, 2004), inestabilidades atmosféricas y el paso de huracanes, entre otros; asimismo, mantiene pesquerías de escama, crustáceos y moluscos de importancia comercial (Aguilar, 1998; Arroyo, 2001; García-Salgado, 2001; Martínez, 2001; Montaña, 2005) y registra la existencia de especies de gran interés turístico (López-Padierna, 2007). Además, de esta región, México extrae el 70 % del petróleo de exportación (Villanueva, 2000); por lo que el estudio de esta zona debe ser una de las prioridades en la investigación científica en México.

La forma de obtención de la biomasa de zooplancton ha evolucionado y es posible conocerla en forma casi continua durante las campañas oceanográficas, a partir de sistemas hidroacústicos; sin embargo, no se ha avanzado en el desarrollo y aplicación de métodos matemáticos que nos permitan explorar satisfactoriamente la información obtenida ya sea por redes o por sistemas hidroacústicos (Salas de León, *com.per*, 2008).

La relación entre la biomasa de zooplancton (B), la temperatura (T), la salinidad (S) y la presión (P) ha sido ampliamente explorada usando métodos estadísticos clásicos y en la actualidad constituye una forma rutinaria en el estudio del zooplancton marino. Sin embargo, la existencia de discontinuidades en el océano, tales como las regiones frontales o la termoclina, haloclina y pycnoclina (las clinas), son fuentes de variabilidad en la distribución y abundancia del zooplancton y, los modelos estadísticos simples dan valores diferentes de los esperados o de los observados, al considerar las variables como continuas, por lo que no logran reproducir satisfactoriamente los valores observados de zooplancton.

En la actualidad es muy socorrido el uso de interpoladores como Kriging que tiene el programa Surfer, o bien métodos matemáticos más sofisticados como el análisis objetivo (Emery y Thomson, 1997); sin embargo, estos métodos tratan las variables como entidades continuas y no se preocupan por la parte dependiente de aspectos ambientales ó por la existencia de fuertes gradientes que forman barreras infranqueables para algunos organismos. Los métodos inversos parten de suponer la dependencia de una variable en otras de tipo ambiental, contemplando de forma implícita estas condiciones.

1.3 Los Modelos Inversos

Menke (1989) define el problema inverso como el conjunto de métodos usados para extraer información útil de nuestro entorno a partir de medidas físicas o datos. La información útil vendrá especificada como valores numéricos de alguna propiedad de este entorno. Estas propiedades también se referirán como parámetros del modelo. Se presupone que hay algún método específico (normalmente una teoría matemática o modelo) que relaciona los parámetros con los datos. Normalmente el problema inverso es más difícil de resolver que su correspondiente problema directo. El problema inverso contrasta con el problema directo, donde se predicen los datos a partir de los parámetros y de un modelo.

Dos de los campos donde se ha desarrollado en gran medida esta técnica son la tomografía en la geofísica. Otro campo, más próximo a la geotecnia, donde también ha tenido un papel destacado en los últimos 20 años, ha sido la hidrología subterránea (Bakus, 1970; Parker, 1977; Menke, 1989; Tarantola, 2005; Peschiera, 2002). También, existen trabajos en la medicina, procesamiento de imágenes y oceanografía física (Machín-Jiménez, 2003; Maestre y Fernández- Cara, 2009).

Los métodos inversos son técnicas de análisis y reconstrucción de datos útiles que permiten estimar el comportamiento de una variable en zonas donde no se efectuaron mediciones. Unas de las características esenciales de los modelos inversos, es que son robustos, esto es el error en la predicción es forzado a permanecer bajo. Además, los modelos inversos son

espacial y temporalmente coherentes, ya que, los coeficientes de acoplamiento o ajuste son forzados a permanecer dentro de ciertos límites de tal forma que los valores de las predicciones cambien suavemente entre regiones o de un tiempo a otro. Una de las novedades que trataremos de incorporar en este trabajo es que trataremos de forzar los residuales a cero, con lo cual eliminaremos el problema de la sobredeterminación en el sistema de ecuaciones de los modelos inversos.

No obstante el potencial que tienen estos modelos, no se han desarrollado ni aplicado a procesos biológicos, por lo que en esta tesis se pretendió desarrollar y aplicar un modelo inverso para reproducir la distribución y abundancia de la biomasa de zooplancton en la Bahía de Campeche. Una de las novedades que se incorporó en este trabajo y que no había sido tratado en otros modelos inversos, es que los residuales fueron considerados como cero, con lo cual se eliminó el problema de la sobredeterminación en el sistema de ecuaciones (Salas de León, 2008, *com. per.*), esto con la finalidad de forzar al modelo a llegar a los datos de biomasa reales.

2. OBJETIVO

Desarrollar y aplicar un modelo inverso entre la biomasa de zooplancton (B) y las variables ambientales temperatura (T), salinidad (S) y profundidad (Z), para la Bahía de Campeche, utilizando datos tomados durante el crucero FIBAC – I (14 de agosto al 1 de septiembre de 1996), con la finalidad de calcular valores de biomasa que no sean estadísticamente diferentes de los datos reales, con los que se pueda reproducir la distribución y abundancia de la biomasa zooplanctónica.

3.ANTECEDENTES

No hay antecedentes de modelos inversos en el estudio del zooplancton, por lo que se van a tratar antecedentes generales del estudio del zooplancton.

3.1 Modelación de Zooplancton

La exploración de los patrones de formación en sistemas complejos no-lineales, que son aquellos compuestos por varias partes interconectadas o entrelazadas cuyos vínculos crean información adicional no visible antes por los observadores, es uno de los problemas centrales en las ciencias sociales, naturales y tecnológicas. El desarrollo de la teoría de auto-organización temporal, espacial, funcional o estructural en estos sistemas lejos del equilibrio, ha sido una de los puntos de búsqueda más importantes a través del tiempo (Haken, 1977). Los modelos matemáticos se han vuelto una valiosa herramienta para mejorar el entendimiento de la generación de estos mecanismos, como es en el caso del plancton.

La historia de la modelación de la dinámica del plancton fue iniciada por la ciencia pesquera a principios del siglo XIX, donde el principal objetivo era desarrollar el entendimiento de las redes alimenticias y su dependencia con factores externos e internos. Por esta razón, los modelos matemáticos de la dinámica poblacional no sólo se centraron en el crecimiento e interacciones, también, en los procesos espacio-temporales que han llevado a la variabilidad en el ambiente (Malchow et al., 2001).

La abundancia de las especies de plancton es afectada por factores ambientales como la temperatura, la salinidad y la intensidad de luz (Raymont, 1980; Sommer, 1994). Debido a esto el zooplancton ha estado bajo estudio por cientos de años, combinando observaciones de campo y laboratorio, pero fue hasta finales del siglo XIX que la ciencia pesquera estimula su modelación debido a la fuerte correlación que se encontró entre la abundancia de plancton y de peces.

El primer modelo matemático fue desarrollado a principios del siglo XX para entender y predecir la dinámica de reclutamiento y su correlación con los factores físicos y biológicos, además de la intervención humana (Cushing, 1975; Gulland, 1977; Steele, 1977).

Los florecimientos de fitoplancton fueron modelados por Fleming en 1939, utilizando una ecuación diferencial de la dinámica de la biomasa de fitoplancton. Otra aproximación fue la aplicación de la ecuación de Lotka-Volterra para describir la relación depredador-presa entre el zooplancton y el fitoplancton (Segel y Jackson, 1972; Dubois, 1975; Levin y Segel, 1975; Vinogradov y Menshutkin, 1977; Mimura y Murray, 1978).

También, se desarrollaron modelos de ecosistemas marinos que fueron manejados con la idea de que mientras más especies se incluyeran, la predictibilidad del modelo sería mejor. Como resultado aparecieron modelos que detallaban muy bien la red alimenticia (DeAngelis, 1992; Jorgensen, 1994; Yodzis, 1994). Sin embargo, el incremento de factores muchas veces empeoraba la efectividad del modelo, por lo que considerando solamente los principales factores o especies el modelo era de mayor credibilidad (Pascual, 1993; Petrovskii y Malchow, 1999; 2001).

Otro problema interesante es la dinámica de sistemas forzados externamente en el laboratorio, de manera periódica (diaria, estacional o anual) en ciclos fotosintéticos, intensidad de luz, temperatura y nutrientes (Evans y Parslow, 1985; Truscott, 1995; Popova et al., 1997; Ryabchenko et al., 1997; Scheffer et al., 1997; Steffen et al., 1997; Marín et al., 2004). También, existen modelos que han considerado gradientes de densidad, temperatura, turbulencia y ondas internas (Yoder et al., 1994; Franks, 1997; Abraham, 1998), todo esto en relación a la distribución y abundancia del plancton.

La abundancia de zooplancton ha sido generalmente modelada desde la perspectiva de nutrientes-fitoplancton-zooplancton (NPZ) (Frost y Frazen, 1992; Frost, 1993). Sin embargo, Aoki et al. (1999) modelaron la biomasa de zooplancton en respuesta a los cambios hidrográficos en el mar del noreste en Japón, a través de análisis multivariado y redes neurales; otros modelos se basaron en el ciclo de vida u otros aspectos específicos del

zooplancton como producción de huevos (Prestige et al., 1995; Calbeth y Agustí, 1999), migración (Richards et al., 1996). Todos estos realizados en regiones particulares.

En el 2001, Wood-Walker desarrolla un modelo aplicado al océano Atlántico mediante redes neurales y, Patrick et al. (2009) realizaron una estimación global de la biomasa de zooplancton a través de imágenes satelitales.

El conocimiento en el funcionamiento y la dinámica de los principales procesos del zooplancton ha avanzado mucho, pero aún quedan muchos mecanismos espacio-temporales de los que no se sabe el efecto en el zooplancton.

3.2 Zona de estudio

La Bahía de Campeche está situada en el sur del Golfo de México entre los 18.1° y los 22° de latitud norte y entre los 90.5° y 97.4° de longitud oeste (Fig. 1). La bahía se caracteriza por tener una plataforma muy amplia en el Banco de Campeche (parte este), y profundidades que superan los 2500 m en el centro.

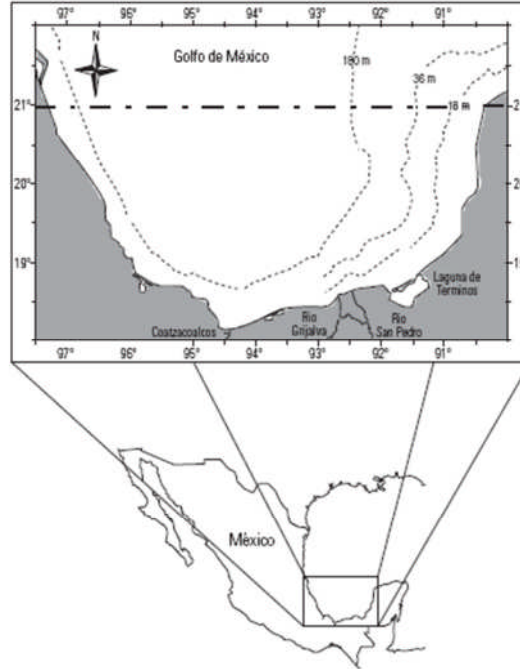


Fig. 1. Ubicación de la Bahía de Campeche (tomada de Flores, *et al* 2009).

Por encontrarse en el sur del golfo y tener una extensa frontera abierta con el resto del golfo, la Bahía de Campeche presenta una continuidad a los procesos hidrodinámicos entre ambas regiones, siendo influenciada así, por lo que pasa en el resto del golfo (Díaz Flores, 2004).

Las condiciones atmosféricas en el Golfo de México son tales que el intercambio entre las masas de aire frío y seco provenientes del continente y las masas de aire propias del golfo de origen marítimo y tropical, provocan fuerte frontogénesis (Nortes), durante el invierno y principios de la primavera. Durante el verano, esta región es afectada por tormentas tropicales, de las cuales 60% alcanzan intensidades de huracán. El 80% de los huracanes se forman fuera del golfo, su centro se desplaza hacia la costa noroeste o hacia la Península de Florida. La dinámica del golfo está condicionada tanto por el viento, como por el transporte de masa que entra y sale del golfo (Monreal- Gómez y Salas de León, 1997) y la circulación termohalina.

Los vientos del norte afectan la circulación de la Bahía de Campeche provocando el hundimiento de la termoclina. Sin embargo, el frente halino del sistema Grijalva-Usumacinta persiste a pesar de la presencia de estos vientos (Alatorre et al., 1988).

Las temperaturas superficiales varían desde 23° C (invierno) hasta 29° C (verano) (Aldeco y Hernández, 1988). La distribución de la temperatura en la superficie de la bahía oscila entre estos valores sin marcadas diferencias estacionales (Villalobos y Zamora, 1975; Padilla-Pilotze et al., 1986). Existen aportes de aguas continentales en general más frías, que establecen gradientes térmicos en la zona costera (Villalobos y Zamora, 1975; Czitrom-Gauss et al., 1986). La temperatura del agua disminuye con la profundidad, presentándose la máxima en julio a 5 m con 28.5 °C y la mínima a 300 m con 12.6 °C. Esto indica una disminución del gradiente térmico de aproximadamente 0.5 °C por cada 10 m.

Durante la campaña FIBAC I, se reportó que existe una zona de baja temperatura en forma de lengüeta, en la plataforma de la región nororiental de la bahía, los valores de temperatura van de 26 a 28 °C, probablemente asociados al agua fría de la surgencia de Yucatán, la cual se presenta en primavera y verano (Merino, 1992). En la parte oeste de la bahía la temperatura es más alta y uniforme con valores que sólo varían de 28 a 29.5 °C. Esta distribución muestra los valores máximos en la parte noroeste del área de estudio que es la ruta de los núcleos cálidos. Frente al sistema de ríos, al sur de la bahía se observó la temperatura muy uniforme alrededor de 28.5 °C (Monreal- Gómez *et al*; 2004).

La bahía presenta valores de salinidad superficial elevados ($S > 36.40$) en la zona oeste del Banco de Campeche; estas aguas de alta salinidad se encuentran inicialmente del lado este del banco; siguen una trayectoria dirigida hacia la parte central del banco y en seguida suben, desplazándose al mismo tiempo hacia el oeste del Banco de Campeche (Monreal-Gómez y Salas de León, 1997).

Durante la campaña analizada en este estudio, la salinidad superficial varió de 34.2 a 36.6, con menor valor frente a la desembocadura del sistema Grijalva-Usumacinta, donde se observó un núcleo de forma elíptica con inclinación hacia el oeste, indicando una corriente

costera en esta dirección. Al este de la Laguna de Términos se presentó agua con mayor salinidad, la cual ha sido atribuida a una zona de alta evaporación donde en algunas ocasiones se ha reportado una salinidad de hasta 37 (Monreal-Gómez et al., 1992). Los mayores gradientes horizontales de salinidad superficial se observaron en la parte sur y central de la bahía. La región norte al igual que la temperatura mostró valores altos y más uniformidad.

Las características de las masas de agua del golfo fueron analizadas por Nowlin (1972), quien estableció la existencia de varias capas o masas de agua. La capa superficial es conocida como capa de mezcla y ocupa los primeros 150 m.

La Bahía de Campeche presenta una circulación predominantemente ciclónica (Nowlin, 1972; Molinari *et al.*, 1978; Merrell y Morrison, 1981). Sin embargo, Monreal Gómez y Salas de León (1990), efectuaron la simulación de la circulación de la Bahía de Campeche mediante un modelo numérico hidrodinámico y concluyeron que esta región tiene características ciclónicas con centros fríos en su circulación de febrero a abril y de julio a diciembre; en el periodo de mayo a julio el giro desaparece y la circulación es en sentido este-oeste. Los giros actúan como una frontera natural para el crecimiento y dispersión de los organismos planctónicos. En la Bahía de Campeche se observa una alta concentración de organismos en su parte noreste (Flores-Coto y Gracia-Gasca, 1993).

Esta zona recibe gran aporte de aguas continentales de los ríos más caudalosos que posee México; se encuentra influenciada en su porción occidental por los sistemas Grijalva-Usumacinta y Laguna de Términos y, la del río Champotón y Coatzacoalcos en la parte oriental, los cuales repercuten hasta el borde de la plataforma continental (Villalobos, 1975). El ciclo anual de descargas de los ríos al Golfo de México se puede describir de la siguiente manera: de febrero a marzo la descarga de los ríos es escasa, entre julio y agosto se encuentra la mayor descarga y de noviembre a diciembre se considera una descarga media (Flores-Coto et al., 1988).

El aporte de aguas epicontinentales en las zonas neríticas induce la formación de frentes oceánicos con diferencias en la salinidad. En estas zonas la distribución espacial de la densidad está gobernada por la estructura halina la cual presenta un fuerte gradiente (Alatorre et al., 1988). El frente termohalino principal en la Bahía de Campeche es formado por la descarga fluvial del sistema Grijalva- Usumacinta (Espinosa, 2004).

Rosales Navarro (2003) reportó que en el verano de 1996, la capa de los 0 a 1000 m de profundidad estuvo ocupada principalmente con Agua Subtropical Subsuperficial del Golfo de México (AS_SGM), Agua Común del Golfo (ACGM) y Agua Intermedia Antártica (AIA). Los resultados del cálculo de velocidades geostroficas realizadas por esta autora, muestran un giro ciclónico en la región sur de la bahía y una porción del giro anticiclónico en la parte noreste; la influencia de ambos ocupa toda la columna hasta 1000 m de profundidad. El giro ciclónico que se reportó estaba centrado en los 20° N y 94° W y tenía una forma elíptica con un semieje mayor de aproximadamente 280 km, mientras que la circulación anticiclónica del noroeste de la bahía es parte del giro anticiclónico semipermanente que se desprende de la Corriente de Lazo.

En las aguas de la Bahía de Campeche, el oxígeno disuelto en la superficie varía de 4.6 a 5.1 mL⁻¹. En los meses de mayo a julio se presentan concentraciones máximas a 50 m de profundidad (5.2 mL⁻¹), mientras que de noviembre a marzo las máximas se registran a 25 m. Para el mes de noviembre se reporta que a 300 m la disolución es de 2.8 mL⁻¹ (Cachero, 1990).

La bahía de Campeche es una zona que representa una geomorfología heterogénea, en la plataforma interna se destaca la influencia de los materiales terrígenos descargados en la parte occidental; en la parte media, sedimentos mixtos y la de sedimentos calcáreos al oriente; mientras que en la plataforma externa se encuentra el Escarpe de Campeche y sedimentos limo-arcillosos calcáreos de origen arrecifal y autigénico (Gío-Argaez, 2002).

3.3 El Zooplancton en la Bahía de Campeche

Para el Golfo de México, la mayoría de los trabajos existentes hacen referencia a la composición específica (Espinoza, 2004; Flores-Coto et al., 1988 y 1993; Sanvicente-Añorve et al., 1998), lo cual es muy importante, ya que continuamente se siguen registrando especies nuevas. Sin embargo, en muy pocos estudios se trata la cuantificación, la distribución o la relación de estos parámetros con las características del ambiente (Alba-Hurtado, 2001).

Dentro de los principales grupos zooplanctónicos reportados en la bahía se encuentran copépodos calanoides (que tienden a ser el grupo dominante), quetognatos, eufásidos, misidáceos, hidromedusas, salpas, pterópodos, sifonóforos, sergéstidos y larvas de crustáceos bentónicos, entre otros.

La existencia de una variación anual en la biomasa zooplanctónica en el suroeste del Golfo de México, presenta dos núcleos de alta concentración en invierno ($> 50 \text{ g } 100 \text{ m}^{-3}$) localizados en la zona nerítica y decrecen conforme se aproximan a la Laguna de Términos (Sanvicente-Añorve, 1990).

En primavera se registran valores altos en aguas neríticas entre los 18 y 36 m y menores en el borde de la plataforma. Para verano se tienen los valores más altos de biomasa en aguas costeras frente a diferentes ríos dentro de los que destaca el sistema Grijalva – Usumacinta (Alba, 2001).

La distribución de las comunidades está marcada por el régimen general de circulación de la bahía. La formación de un giro ciclónico en la parte sureste da lugar a una ruptura en la comunidad nerítica y una distribución más homogénea de la comunidad de influencia fluvio – lagunar que se extiende desde la desembocadura del Grijalva – Usumacinta hasta el este de la Laguna de Términos (Salas de León et al, 1998). En primavera, debido a la corriente que entra por el Canal de Yucatán, se presenta un desplazamiento de los frentes hacia el

oeste y como consecuencia se tienen núcleos de mayor abundancia zooplanctónica e ictioplanctónica con el mismo patrón de distribución; por lo que la distribución de organismos se extiende hacia el oeste de la bahía.

En verano se observan las mayores abundancias frente a la desembocadura del sistema fluvial Grijalva-Usumacinta. Durante el invierno es cuando se encuentra la menor abundancia de zooplancton en la pluma del Grijalva-Usumacinta. La mayor abundancia se observa en los bordes del giro ciclónico que comienza a formarse en verano, pero que para esta época se encuentra ya bien desarrollado y ubicado hacia el oeste de la bahía (Salas de León et al, 1998).

4. METODOLOGIA

4.1 Origen de los Datos

Los datos usados en la construcción del modelo inverso, correspondieron a los resultados de la determinación de la biomasa de zooplancton efectuada por Santamaría (2007) y los datos de temperatura, salinidad y presión reportados por Rosales Navarro (2003), ambos de la campaña oceanográfica FIBAC I (Física de la Bahía de Campeche I) realizada en la Bahía de Campeche del 14 de agosto al 1 de septiembre de 1996.

Los datos de biomasa de zooplancton o biovolúmenes estimados por Santamaría (2007) son un caso excepcional ya que tienen una cobertura muy grande y pueden usarse para elaborar el modelo; así como, eliminar algunos datos al azar para después, mediante el modelo, inverso reconstruir el campo de biomasa a partir de la temperatura, profundidad y salinidad, para comparar los resultados del modelo con los obtenidos por Santamaría (2007) y, de esta forma validar el modelo.

Los datos de temperatura, salinidad y presión se tomaron en una malla que va de 10' × 10' cerca de la costa hasta 30' × 30' en la región central de la Bahía de Campeche y coinciden con los puntos en donde se tienen estimaciones de la biomasa.

Con la finalidad de clarificar la técnica utilizada por Santamaría y Rosales Navarro se describe su metodología en los puntos 4.1.1 y 4.1.2.

4.1.1 Datos de biomasa

La distribución de la biomasa zoopláctónica en la Bahía de Campeche fue estimada por Santamaría (2007) a partir de datos de intensidad acústica absoluta obtenidos con un perfilador acústico Doppler (ADCP) de 75 kHz de la Compañía RD Instruments. El ADCP

usado durante este estudio fue especialmente diseñado para fijarse en un buque y cuenta con 4 transductores, los cuales tienen una inclinación en sus vértices de 30° con respecto a la vertical. El equipo tiene un amplificador de poder y cuatro canales de recepción. El número de transductores que posee permite que cada uno de ellos cuantifique una componente de la velocidad y de la intensidad de eco por separado, lo cual permite conocer la intensidad del eco a diferentes profundidades.

El ADCP fue diseñado originalmente para cuantificar la velocidad de las corrientes por medio del cambio de frecuencia en el sonido reflejado por una fuente en movimiento relativo entre un receptor y un objeto. Razón por la cual, al no haberse diseñado para cuantificar la intensidad acústica absoluta del reflejo o eco, presenta el problema de calibración. Esta intensidad acústica absoluta (*IAA*) es el objetivo a cuantificar, ya que si se supone que cada eco es el producto del reflejo de la onda en cada organismo zooplanctónico, entonces al cuantificar el total de ecos tendremos la cantidad de organismos. O bien, al cuantificar la diferencia entre la intensidad de la onda emitida y la reflejada se conoce cuanto de ella a sido reflejada por los organismos y mediante una serie de transformaciones, se determina la biomasa zooplanctónica.

La fórmula (proporcionada por RD Instruments) para transformar la amplitud del eco de la señal acústica a intensidad acústica absoluta es la siguiente:

$$IAA = 10 \text{ Log}_{10} \left\{ \frac{\left[4.47 \times 10^{-20} K_2 K_s (T_x + 273) \left(10^{\frac{K_c (E - E_r)}{10}} - 1 \right) R^2 \right]}{cPK_1 10^{\frac{-2\alpha R}{10}}} \right\}$$

Donde:

IAA = Intensidad Acústica Absoluta (dB).

*K*₂ = factor de ruido del sistema

*K*_s = constante del sistema

T_x = temperatura real del transductor ($^{\circ}\text{C}$)

K_c = factor de conversión para la intensidad del eco (dB)

E = intensidad del eco (conteo)

E_r = ruido térmico electrónico de referencia del instrumento durante la calibración (conteo)

R = direccionamiento del rango a la profundidad de la celda

c = velocidad del sonido en cada celda (m s^{-1})

P = longitud del pulso transmitido (m)

K_I = potencia real del sonido en el agua (W m^2)

α = coeficiente de absorción del agua (dB m^{-1})

Los dos componentes fundamentales para la calibración de la *IAA* son:

- a) La estimación del nivel de ruido en los transductores del instrumento.
- b) La determinación de la atenuación de la señal acústica con la profundidad en la columna de agua.

La compañía RDI, fabricante del equipo utilizado, ofrece una explicación clara del nivel de ruido existente, ya que la intensidad acústica absoluta es sensible a la temperatura de los componentes electrónicos del ADCP.

Un aspecto importante del ADCP es la capacidad que tiene de ser programado para dividir el perfil de velocidades y de intensidades de reflejo en segmentos uniformes, que son denominados celdas, a través de la columna de agua. Esto equivale a muestrear el zooplancton con redes verticales a profundidades regulares y uniformes a intervalos de segundos.

Para obtener la *IAA* se requiere considerar la variación de la velocidad del sonido en la vertical respecto a la variación de la densidad. Para esto fueron utilizados valores de la

velocidad del sonido para las zonas costeras del sur del Golfo de México, siguiendo el trabajo realizado por Ruíz-Rentería y Merino-Ibarra (1989) (Tabla 2).

Tabla 2. Velocidades de propagación del sonido en aguas costeras del sur del Golfo de México.

Profundidad (m)	Velocidad del sonido (m s ⁻¹)
100	1534.4
200	1526.2
300	1520.0
400	1514.9
500	1510.8
600	1507.4
700	1504.3
800	1502.4
900	1500.8
1000	1499.5
1100	1498.4
1200	1497.4
1300	1496.8
1400	1496.3
1500	1496.1

Ruíz Rentería y Merino Ibarra (1989)

El ADCP se calibró de acuerdo al método sugerido por la compañía RDI (Technical Manual, 1992, Apéndice V) para poder eliminar el nivel de ruido térmico del aparato; posteriormente se programó para que los pulsos emitidos cada 0.7 de segundo se promediaran cada cinco minutos. Debido a la capacidad que tiene de dividir la columna de agua en capas de profundidad determinada, las celdas se fijaron a 16 m. Finalmente los datos fueron almacenados junto con la posición y la temperatura promedio de los transductores y del agua circundante a ellos.

4.1.1.1 Procesamiento de Datos y Análisis Estadístico

El Laboratorio de Oceanografía Física del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM desarrolló fórmulas para calcular la biomasa zooplanctónica a partir del eco de la intensidad acústica, para perfiladores de corriente (ADCP de la compañía RD Instrument) de 75 kHz, flujómetros acústicos (de la compañía UNIDATA) de 4 MHz y ADP de 600 kHz (marca SONTEK). Los coeficientes de calibración se obtuvieron al comparar resultados de biomazas zooplanctónicas de muestras capturadas con redes, con intensidades de ecos medidos al mismo tiempo que se capturaron los organismos.

Los datos proporcionados por el ADCP fueron convertidos de código binario a código ASCII para procesarse posteriormente y crear una matriz con datos de Control de Ganancia Acústica (Acoustic Gain Control, AGC), tiempo, profundidad, número de celda y otros parámetros de control.

Esta matriz se procesó mediante un programa desarrollado en el Laboratorio de Oceanografía Física del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM para obtener la intensidad acústica absoluta (*IAA*) utilizando la fórmula descrita anteriormente.

4.1.2 Datos de Temperatura, Salinidad y Profundidad

Durante la campaña oceanográfica también se tomaron datos con un perfilador de presión, temperatura y conductividad, CTD Mark IV por sus siglas en inglés (Conductivity, Temperature and Depth), modificado en su sensor de profundidad de acuerdo a las recomendaciones de WOCE. El CTD se programó para tomar un dato de temperatura, presión y conductividad cada 25 cm en la vertical. Con los datos obtenidos se calculó la salinidad y la densidad relativa o sigma t (σ_t) usando los polinomios propuestos por la UNESCO (Fofonov y Millar, 1983).

Los datos de temperatura, conductividad y presión (Rosales-Navarro, 2003) fueron depurados eliminando aquellos que corresponden a ruido del instrumento y se procesaron para crear archivos con información a cada metro de profundidad.

Finalmente se generaron matrices con *IAA*, latitud, longitud, hora, fecha, profundidad, salinidad, temperatura y densidad relativa.

4.2 Análisis de Datos

Para poder cumplir con el objetivo propuesto en este estudio se realizó una matriz con los datos de: profundidad, biomasa, temperatura, salinidad, densidad, latitud y longitud en las siguientes profundidades: 20, 36, 52, 68, 84, 100, 116, 132, 148 y 164 metros, que fueron las profundidades establecidas por Santamaría, para las 93 estaciones establecidas en el derrotero de la campaña oceanográfica FIBAC- I (Fig. 2). Los datos fueron analizados a través de estadística descriptiva calculando medidas de tendencia central y variación: mínimo, máximo, promedio y desviación estándar; para tener una idea clara de los datos que se estaban manejando.

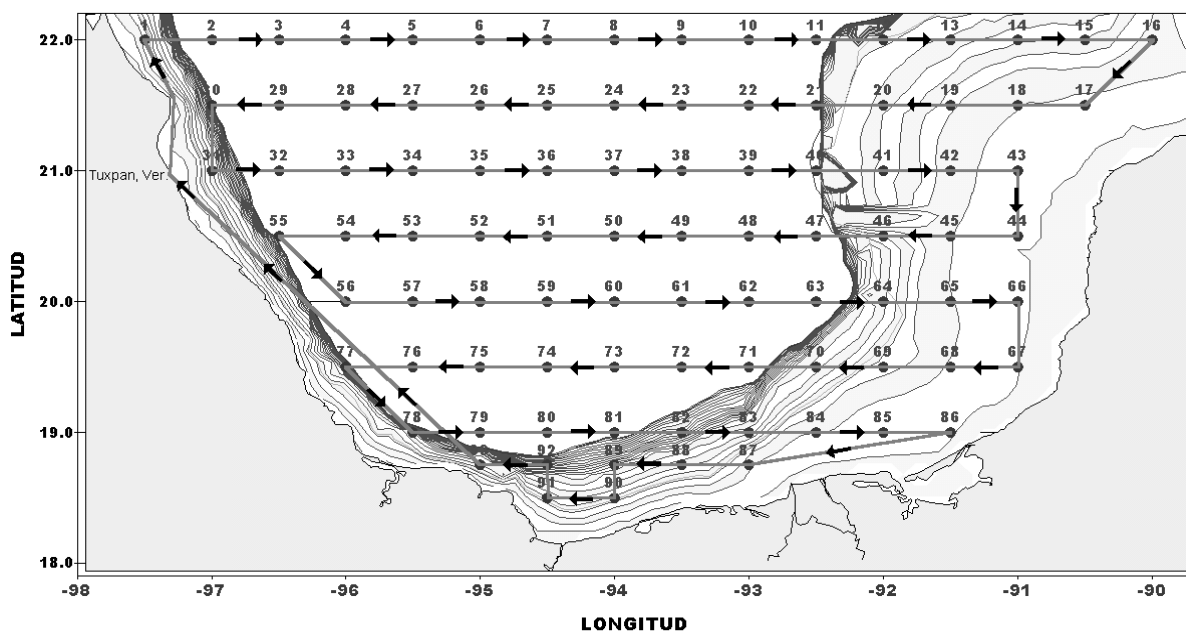


Fig. 2. Derrotero correspondiente al crucero FIBAC-I (Tomada de Díaz Flores, 2004).

Posteriormente se efectuaron análisis de regresión exponencial, logarítmica y múltiple entre la biomasa y la temperatura, salinidad y profundidad, para comprobar la relación existente entre las variables.

4.3 Formulación del Modelo Inverso

En esta tesis se desarrolló y aplicó una aproximación inversa, que controlará el tamaño de los coeficientes y el error en la predicción. El modelo parte de suponer como primera aproximación que la dependencia de la biomasa de zooplancton con las variables ambientales es polinomial. Para fin del modelo, cada una de las variables ambientales (T, S, P) contribuirá en el comportamiento de la distribución y abundancia de la biomasa por separado; esto es equivalente a suponer que existe una independencia entre la dependencia de la biomasa con cada una de las variables ambientales, por lo cual el efecto de una variable sobre la biomasa es independiente del efecto de las otras, esto se probará mediante análisis estadísticos clásicos, correlaciones simples y correlaciones múltiples y análisis multifactorial. Los efectos combinados entre las variables se consideraran pequeños y se incluirán en la parte del error o residuo del modelo. En la elaboración del modelo no se usará la densidad por ser ésta una función de la temperatura, de la salinidad y de la presión, por lo que es una función compuesta.

De acuerdo a lo anterior se puede proponer una forma polinomial de dependencia funcional entre la biomasa de zooplancton (B), la temperatura (T), la salinidad (S) y la presión (P) tal que:

$$B \approx a_0 + a_1T + a_2T^2 + \dots + a_lT^l + b_1S + b_2S^2 + \dots + b_mS^m + c_1P + c_2P^2 + \dots + c_nP^n \quad (1)$$

Donde a , b y c son los coeficientes del polinomio y l , m y n son los grados del polinomio en T , S y P respectivamente. El objeto de la inversión es estimar los coeficientes del polinomio en (1). La ecuación (1) está sobrestimada por el coeficiente a_0 que es la parte que considera los errores o residuales del modelo; sin embargo, este coeficiente en principio se

puede hacer cero y posteriormente adjudicarle el valor de las diferencias entre el modelo y las observaciones.

La ecuación (1) puede escribirse en forma matricial como:

$$B \approx \left(\begin{array}{cccccccc} 1 & T & T^2 & \dots & T^l & S & S^2 & \dots & S^m & P & P^2 & \dots & P^n \end{array} \right) \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_l \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \\ c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{pmatrix} \quad (2)$$

Que finalmente en forma simplificada queda como un conjunto de ecuaciones dado por:

$$B = Ex + r \quad (3)$$

Donde en (3), E considera la formulación del modelo para B como función de (T,S,P) ; x es un vector que contiene las incógnitas, que corresponden a los coeficientes de los polinomios en (1), r es un vector que corresponde a los residuales o diferencias entre el modelo y las observaciones; así como, al comportamiento no lineal o caótico de la distribución y abundancia de la biomasa de zooplancton.

El conjunto de ecuaciones en (3) corresponde a un sistema sobredeterminado y su solución se puede obtener mediante un ajuste por mínimos-cuadrados, esto requiere de la introducción de una función de peso para ajustar los mínimos-cuadrados y minimizar los

residuales y los coeficientes del polinomio. La solución se obtiene después de minimizar la función de costo J dada por:

$$J = r^T W^{-1} r + x^T C^{-1} x \quad (4)$$

Donde r^T y x^T denotan las transpuestas de las matrices r y x respectivamente y W y C son matrices de peso. Los pesos incorporan *a priori* información biológica del comportamiento de la distribución y abundancia de la biomasa del zooplancton, obtenida mediante un análisis estadístico clásico, información que es esencial para entender e interpretar los resultados del modelo inverso.

La covarianza de los residuales, W , está relacionada *a priori* con las incertidumbres en la determinación de la biomasa de zooplancton mediante la relación polinomial (1), entonces se estructurará W como una matriz diagonal, cuya diagonal principal está compuesta por la variancia de B en cada uno de los niveles o profundidades. Para obtener la covarianza de las incógnitas o coeficientes del polinomio C , usamos la variancia de cada columna de E , esto implica que todas las incógnitas tienen la misma importancia en el sistema de ecuaciones. Este método permite estimar la covarianza de las incógnitas y de los residuales (F_{xx} y F_{rr}) usando los datos de biomasa obtenidos de los muestreos e información *a posteriori* tal que:

$$\begin{aligned} x &= (E^T W^{-1} E + C^{-1})^{-1} E^T W^{-1} B \\ r &= B - Ex \\ F_{xx} &= (E^T W^{-1} E + C^{-1})^{-1} \\ F_{rr} &= EF_{xx}E^T \end{aligned} \quad (5)$$

Hasta este momento se planteó el modelo inverso y la forma clásica de solución, otra forma de aproximar la solución del modelo inverso es considerar que los residuales son cero, esto forzaría los coeficientes del polinomio a una solución exacta, con lo cual se eliminaría la sobredeterminación del sistema de ecuaciones en (3) y el problema se reduce a la inversión de un conjunto de matrices ya que (3) se reduce a:

$$B = Ex \tag{6}$$

Con lo cual los coeficientes del polinomio se obtienen mediante:

$$x = E^{-1}B \tag{7}$$

Esta última forma es sumamente sencilla y no conlleva incertidumbres en la solución y es equivalente a suponer que la naturaleza no tiene incertidumbres dadas por su propia constitución no lineal y caótica, lo cual no es del todo cierto, aunque se considerará así para los fines y suposiciones del modelo. Dichas incertidumbres dependen en gran medida del bajo número de observaciones o datos de biomasa con que se cuenta, además de errores en la medición y precisión de los instrumentos, entre otras.

En caso de que la solución no sea exacta, se calcularán los residuales para después ser restados a los valores obtenidos.

4.4 Desarrollo del modelo inverso

Se tomó el total de los datos de Santamaría (2007) y se eliminó de forma aleatoria el 40% de los puntos de muestreo de la campaña FIBAC I, esto para tener datos contra los cuales comparar y validar el modelo resultante.

Los datos de los 391 puntos de muestreo restantes se trabajaron, creando matrices con las que se realizaron ecuaciones de primer, segundo y tercer grado, esto con la finalidad de evaluar cuál de estos lograba reproducir los valores de biomasa reales.

4.4.1 Ecuaciones de Primer Grado

Se elaboró primero un modelo de primer grado tal que:

$$B = a_0 + a_1T + a_2S + a_3Z \tag{8}$$

Donde se busca obtener los cuatro coeficientes mediante una matriz cuadrada de la cual se obtendrá la inversa, que posteriormente será multiplicada por los valores de biomasa, para así, obtener los valores de la ecuación; por lo tanto para trabajar la ecuación a este grado solo se necesitaran 4 puntos de muestreo, cada uno con su biomasa, salinidad, profundidad y temperatura. Debido a esto se obtuvieron diferentes coeficientes, los cuales fueron promediados para cada una de las variables.

Para lograr reproducir los valores de biomasa reales, los datos se trabajaron en cuatro modalidades:

- Modelación de todos los puntos de muestreo
- Modelación por grupos de similitud: Donde, con el fin de optimizar la modelación, se llevó a cabo un análisis de agrupamiento por puntos de muestreo basado en el índice de Bray y Curtis, que fue graficado al 90, 85 y 80% para escoger el nivel de similitud de los grupos con los que se trabajó.
- Modelación por profundidad
- Modelación de todos los puntos de muestreo por profundidad

4.4.2 Ecuaciones de Segundo y Tercer Grado

Para el segundo grado se trabajo con los grupos de similitud obtenidos en el análisis de agrupamiento, con el mismo procedimiento que en la ecuación de primer grado, pero buscando ahora 7 coeficientes, debido a la naturaleza de la ecuación:

$$B= a_0+a_1t+a_2s+a_3z+ a_4t^2+a_5s^2+a_6z^2 \quad (9)$$

Para el tercer grado se trabajó solamente uno de los grupos de similitud, buscando los 10 coeficientes de las variables.

4.5 Validación del modelo

El modelo se validó mediante la comparación de los resultados de las predicciones con los datos de Santamaría (2007), mediante la prueba Chi cuadrada (χ^2) para cada una de las ecuaciones promediadas de las diferentes modalidades o grupos de trabajo de los puntos de muestreo, escogiendo así, el modelo que reproducía mejor los valores de biomasa reales; posteriormente se comparó con el 40% de los datos extraídos en un principio de la base de Santamaría para la Bahía de Campeche, prediciendo así, la distribución y abundancia de la biomasa de zooplancton.

La prueba Chi cuadrada (χ^2) de bondad y ajuste es una metodología útil para validar las hipótesis sobre la distribución teórica en la población que se realiza en la estadística paramétrica, donde se comparan las frecuencias observadas contra las frecuencias esperadas, tratando de decidir si las frecuencias observadas están o no en concordancia con las frecuencias esperadas, en el caso de este estudio se comparó la biomasa calculada (Bc) contra la biomasa real (Br).

Para comprobarlo, se hizo uso de un contraste de hipótesis usando la distribución Chi-cuadrado donde, el estadístico de contraste será:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(Br-Bc)^2}{Bc} \quad (10)$$

Es importante observar que este valor será la suma de k números no negativos. El numerador de cada término es la diferencia entre la frecuencia observada y la frecuencia esperada. Por tanto, cuanto más cerca estén entre sí ambos valores, más pequeño será el numerador y, viceversa. El denominador permite relativizar el tamaño del numerador. Las ideas anteriores sugieren que, cuanto menor sean el valor del estadístico χ^2 , más coherentes serán las observaciones obtenidas con los valores esperados. Por el contrario, valores grandes de este estadístico indicarán falta de concordancia entre las observaciones y lo esperado. En este tipo de contraste se suele rechazar la hipótesis nula (los valores

observados son coherentes con los esperados) cuando el estadístico es mayor que un determinado valor crítico.

.

5. RESULTADOS

5.1 Análisis de Datos

Se analizaron 3128 datos recabados durante el crucero FIBAC– I, realizado del 14 de agosto al 1° de septiembre de 1996, correspondientes a 930 puntos de muestreo. Enfatizando, por la finalidad del estudio, en los valores de biomasa, temperatura y salinidad, se obtuvieron intervalos de 0.0075 a 2.3418 con promedio de 0.1333 g/100 m³ para biomasa; de 13.15 a 29.7 °C con promedio de 21.41 °C para temperatura y de 35.55 a 36.66 con promedio de 36.28 para salinidad (Tabla 3).

Tabla 3. Medidas de tendencia central y dispersión de biomasa, temperatura y salinidad

	Biomasa (g/100m ³)	Temperatura °C	Salinidad
Mínimo	0.007	13.15	35.55
Máximo	2.341	29.70	36.66
Promedio	0.133	21.41	36.28
D.S*	0.2564	4.30	0.16

*D.S: desviación estándar.

Para evaluar la relación entre cada una de las variables y la biomasa, se realizaron análisis de regresión, obteniendo coeficientes de determinación de: 0.3453, 0.0473 y 0.4626 los que nos indica que la biomasa zooplanctónica puede ser explicada en 34, 0.04 y 46% por la temperatura, salinidad y profundidad respectivamente (Fig. 3, 4 y 5); por lo que la biomasa está fuertemente ligada a la profundidad, seguida de la temperatura; esto probablemente debido a las migraciones de los organismos; así que, si la profundidad o la temperatura aumenta mayor será la biomasa de zooplancton, esto sin considerar la intensidad de la luz o la termoclina como barrera física para la distribución y abundancia de los individuos. Mientras que la relación que posee con la salinidad es casi nula.

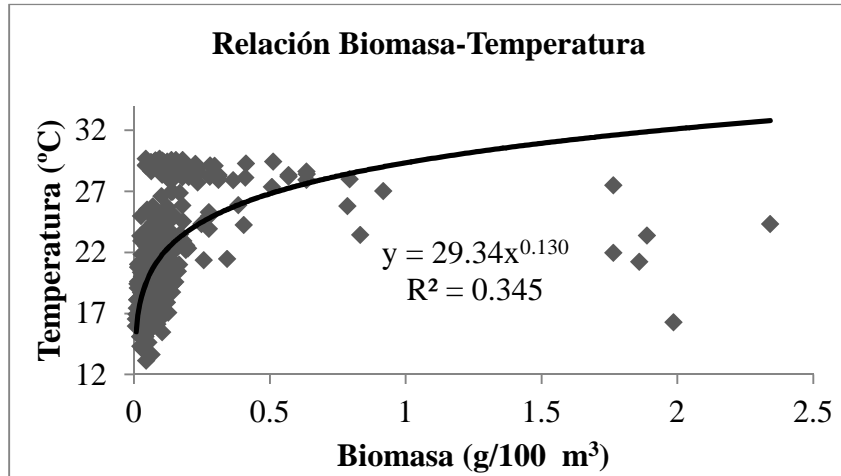


Fig. 3. Modelo de regresión entre la biomasa y la temperatura.

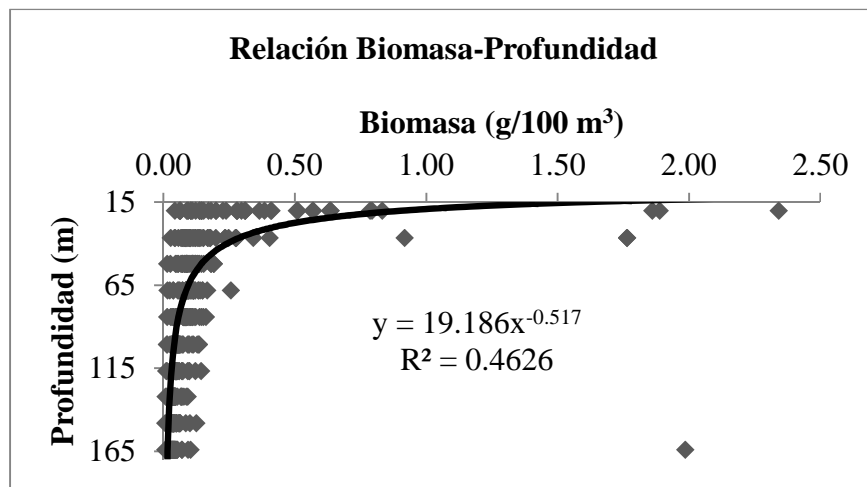


Fig. 4. Modelo de regresión entre la biomasa y la profundidad.

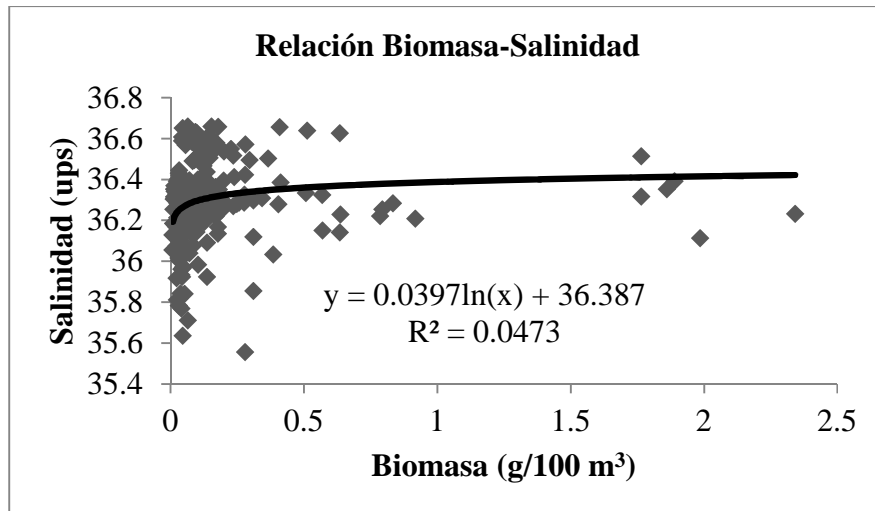


Fig. 5. Modelo de regresión entre la biomasa y la salinidad.

Con la finalidad de evaluar la relación en conjunto de todas las variables con la biomasa se realizó un análisis de regresión múltiple ($\alpha = 0.05$), el cual arrojó la siguiente ecuación de predicción de mínimos cuadrados:

$$B = 0.26493 - 0.11Z + 0.191T - 0.06S, \quad R^2 = 0.081638 \quad (11)$$

Donde los coeficientes de correlación parcial indican que son la temperatura, seguida de la profundidad, los parámetros que se relacionan más con la biomasa, estos dos de manera positiva; pero con un coeficiente de determinación bajo ($R^2 = 0.0816$) explicando así, solamente el 0.08% de los valores de biomasa zooplanctónica, por lo que se puede concluir que las variables en conjunto tienen un efecto menor sobre la biomasa, que por separado.

Con esto se puede concluir que el supuesto del modelo inverso donde se indica que debe existir una independencia entre la dependencia de la biomasa con cada una de las variables ambientales, es verdadero.

Por último para evaluar la relación entre cada una de las variables se realizó un análisis de correlación múltiple (Fig. 6). En el que se puede apreciar una fuerte correspondencia entre la profundidad, la temperatura y la salinidad, esto por las diferentes masas de agua y la

incidencia de luz a través de la columna de agua, lo que significa que no necesariamente son dependientes entre ellas, cabe mencionar que con respecto a la relación entre la biomasa con las variables, sigue siendo la profundidad seguido de la temperatura los parámetro con mayor peso.

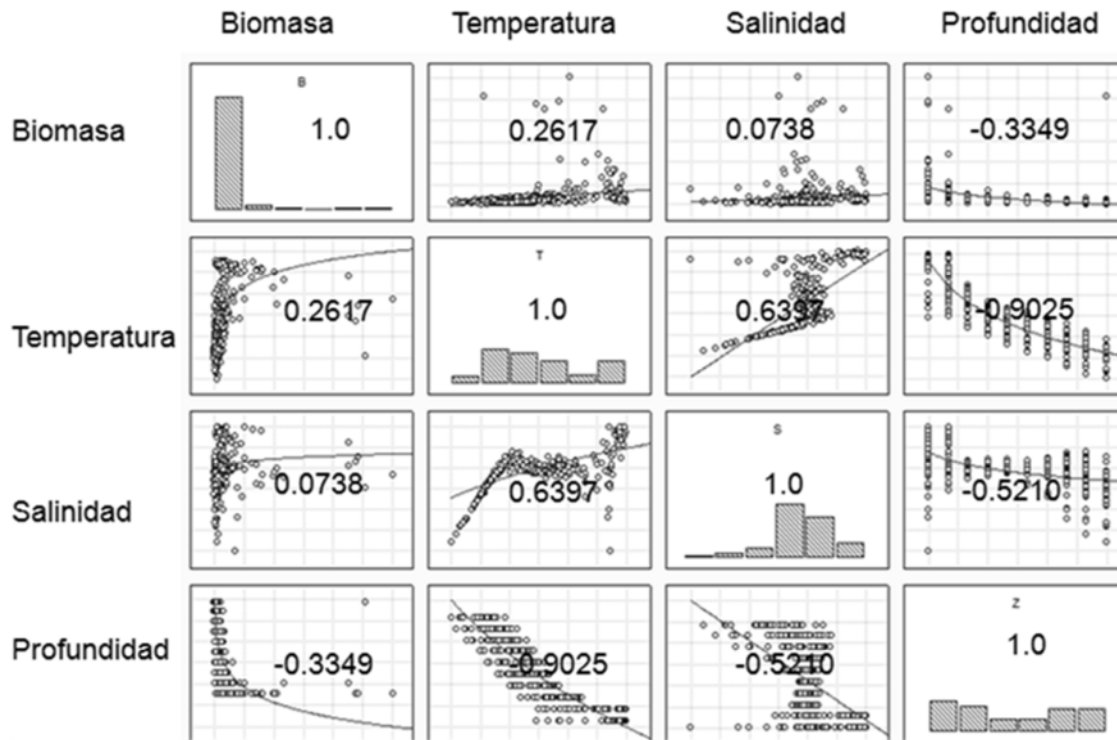


Fig. 6. Modelo de correlación múltiple entre biomasa, temperatura, salinidad y profundidad, basada en análisis de regresión múltiple.

Por lo tanto con base en los resultados de estos análisis, podemos concluir que la modelación inversa es totalmente aplicable a los datos de Santamaría (2007) para la campaña FIBAC-I.

5.2 Modelación

Se desarrollaron y aplicaron modelos inversos de primer, segundo y tercer grado, con la finalidad de evaluar su eficiencia en el cálculo de biomasa, respecto a los valores reales.

5.2.1 Modelación de Primer Grado

$$B = a_0 + a_1T + a_2S + a_3Z \quad (12)$$

Se obtuvieron 78 ecuaciones de primer grado las cuales se trabajaron en cuatro modalidades:

- Modelación de todos los puntos de muestreo
- Modelación por grupos de similitud (obtenidos en el análisis de agrupamiento)
- Modelación por profundidad
- Modelación de todos los puntos de muestreo por profundidad

5.2.1.1 Modelación de todos los puntos de muestreo

Se trabajó con las 78 ecuaciones de los diferentes grupos, las cuales se promediaron obteniendo la ecuación 13:

$$B = -7.3073 + 0.0031T - 0.0672S + 0.0292Z \quad (13)$$

Con la cual se calcularon los valores de biomasa, para posteriormente compararlos contra los valores reales ($\chi^2 = 91584$; $p < 0.001$). Por lo que se calculó el residual promediando la diferencia entre la biomasa calculada y la real resultando en la ecuación 14.

$$B = -7.3073 + 0.0031T - 0.0672S + 0.0292Z + 7.1545 \quad (14)$$

Obteniendo con esto una biomasa calculada, que fue sometida a una prueba χ^2 junto con los valores reales de biomasa, siendo igual a 2836.760, por lo que sigue siendo estadísticamente diferente, por lo que se rechaza el modelo para tratar de reproducir la distribución y abundancia de zooplancton.

Asimismo se calculó el coeficiente de correlación entre la biomasa real y la ajustada, resultando en 0.0853, lo cual es un valor bajo (Fig. 8), por lo que se concluye que esta ecuación no describe los valores de biomasa reales dentro de la Bahía.

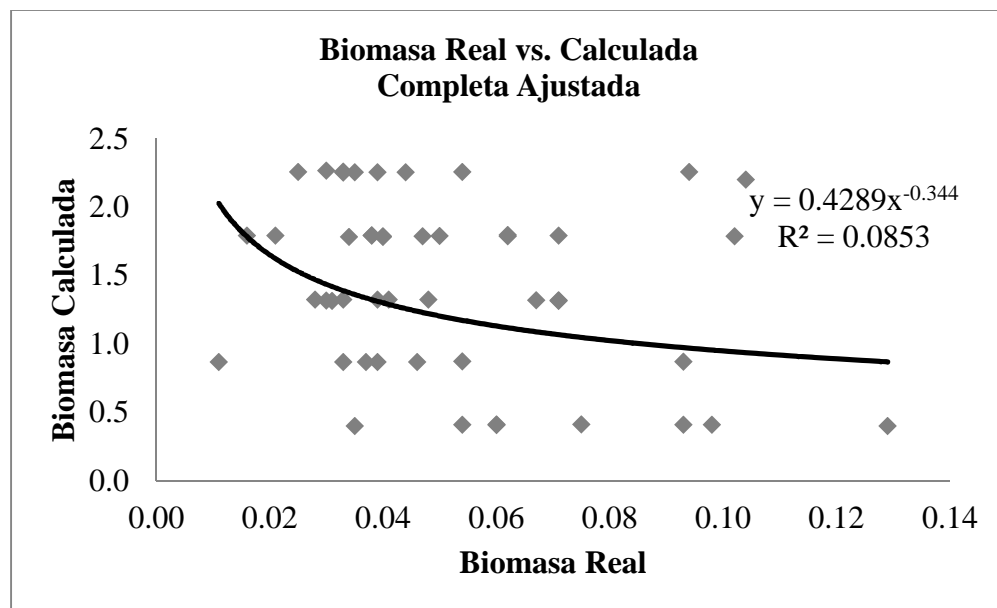


Fig. 7. Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada.

5.2.1.2 Modelación por grupos de similitud

Con el fin de optimizar la modelación, se realizó un agrupamiento de puntos de muestreo, debido a que la zona de estudio no es homogénea en cuanto a factores ambientales, se buscó agrupar los puntos de muestreo similares ejecutando un análisis de conglomerados basado en el índice de Bray y Curtis, el cual arrojó el siguiente dendograma:

NOTA: La figura 8 es sólo indicativa ya que debido al número de estaciones los datos no son apreciables.

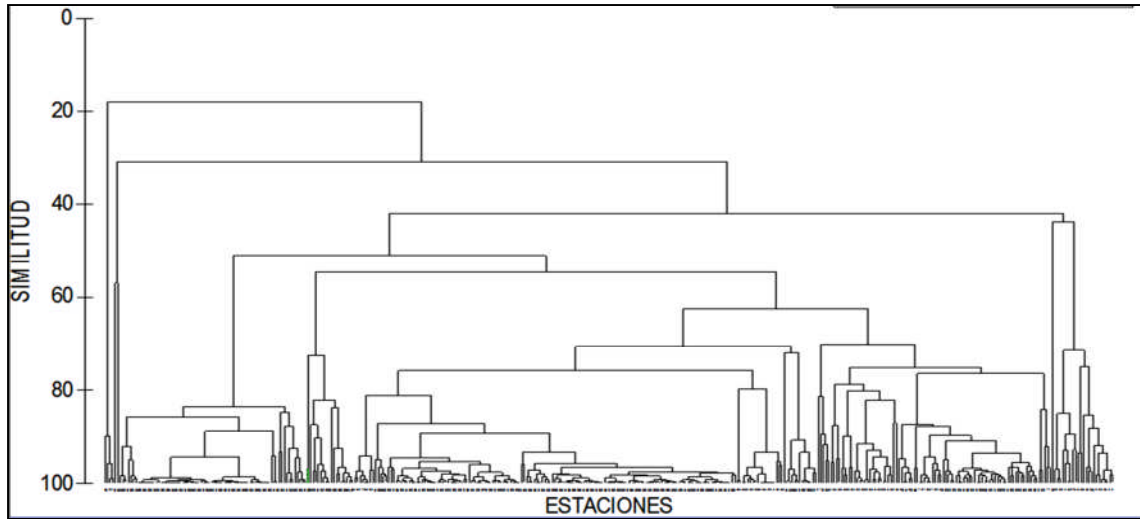


Fig. 8. Análisis de agrupamiento de los puntos de muestreo

Para percibir el nivel de agrupación de los diversos puntos de muestreo se procedió a graficar a 90, 85 y 80% de similitud, es en esta ultima donde se logra apreciar un agrupamiento de los puntos de muestreo por zonas.

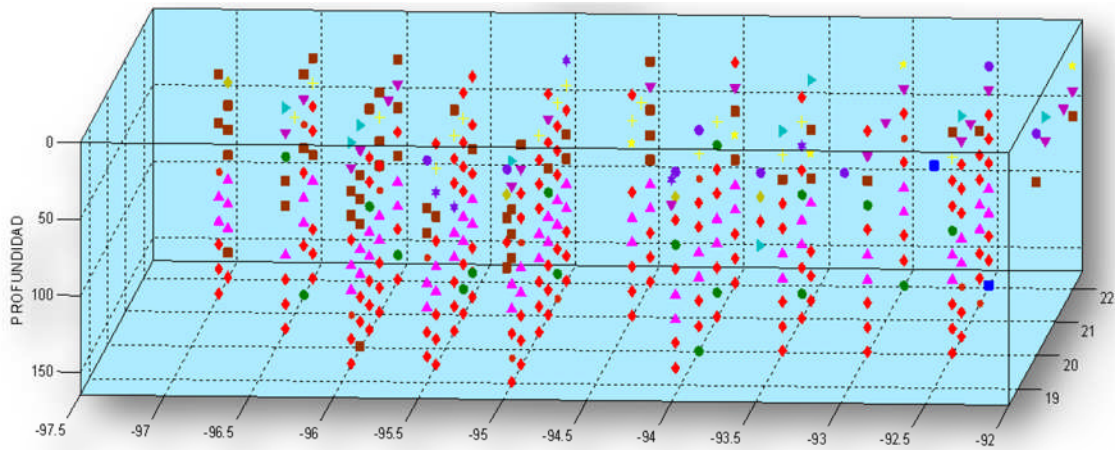


Fig. 9. Agrupamiento de puntos de muestreo al 80%.

Aquí la regionalización es completa y se puede apreciar que la profundidad y no la cercanía a la costa es el principal factor de agrupación de las estaciones, por lo que se procede a la modelación de 7 grupos principales con diferentes características (Tabla 4), considerando 1360 datos (Fig. 14).

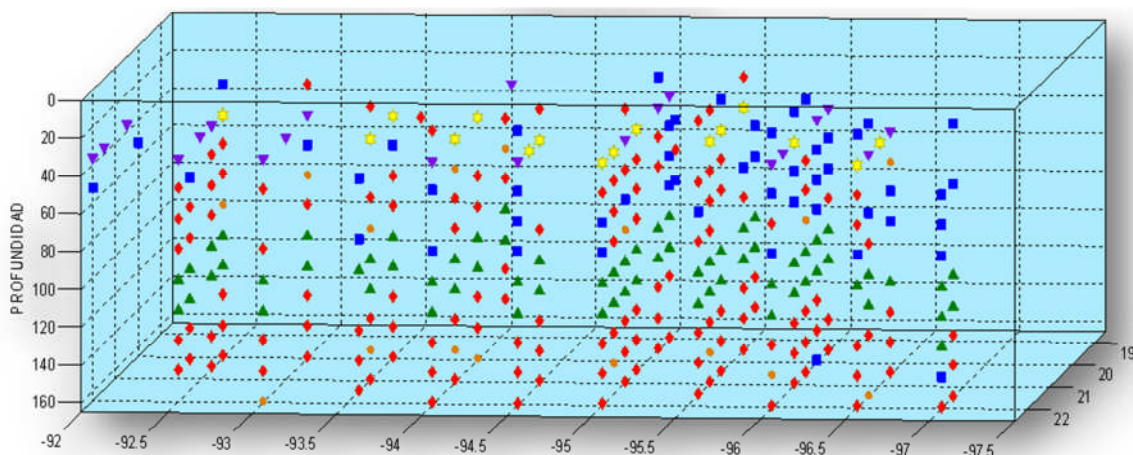


Fig. 10. Principales agrupamientos de los puntos de muestreo a 80% de similitud.

Tabla 4. Características de grupos de similitud

Grupo	Número de puntos de muestreo	Biomasa (g/100 m ³)		Temperatura (°C)		Salinidad		Profundidad (m)
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	
1	71	0.011	0.143	15.926	21.995	36.040	36.379	100, 116
2	17	0.015	0.141	14.051	24.993	35.77	36.445	52, 68, 84, 148, 164
3	147	0.008	0.311	13.156	29.535	35.636	36.651	20, 52, 68, 84, 132, 148, 164
4	17	0.028	0.201	22.945	29.687	36.283	36.652	36
5	12	0.027	0.096	15.65	23.96	36.016	36.344	52, 68, 84, 132, 148, 164
6	22	0.079	1.764	21.91	29.58	36.092	36.659	36
7	54	0.072	0.200	15.487	29.597	35.924	36.602	20, 52, 68, 84

Al igual que con la modelación completa, se promediaron las ecuaciones en cada uno de los grupos, para obtener una sola ecuación, con la que se calculó la biomasa, la cual fue comparada con los valores reales mediante una prueba χ^2 , concluyendo que los valores eran estadísticamente diferentes, por lo que se calculó el residual que se adicionó a la ecuación y se procedió nuevamente al cálculo de los valores de biomasa para ser comparados con los valores reales, obteniendo que también eran estadísticamente diferentes (Tabla 5 y 6).

Tabla 5. Ecuaciones de la modelación por grupos.

Grupo		Ecuación	χ^2
1	Biomasa Calculada	$B=11.5963+0.0756T-.1113S+0.1305Z$	63167.32
	Con Residual	$B=11.5963+0.0756tT-.1113S+0.1305Z +13.1618$	224.4531
2	Biomasa Calculada	$B= -14.35-0.0041T+0.1472S+0.0972Z$	10479.22
	Con Residual	$B= -14.35-0.0041T+0.1472S+0.0972Z -2.0418$	3851.608
3	Biomasa Calculada	$B= -47.5586-0.1010T+0.9951S+0.0891Z$	22390.96
	Con Residual	$B=-47.5586-0.1010T+0.9951S+0.0891Z+8.9001$	659.4931
4	Biomasa Calculada	$B= 100.2655+0.1831T-2.7722S-0.1183Z$	30420.6
	Con Residual	$B=100.2655+0.1831T-2.7722S-0.1183Z+0.2947$	4.731781
5	Biomasa Calculada	$B= -31.6769-0.0588T+0.9058S+0.0007Z$	6.217351
	Con Residual	$B= -31.6769-.0588T+0.9058S+0.0007Z+0.0296$	5.325502
6	Biomasa Calculada	$B= 71.6375+0.3726T-2.6079S-0.3530Z$	102496.3
	Con Residual	$B=71.6375+0.3726T-2.6079S-0.3530Z+26.5310$	58.25634
7	Biomasa Calculada	$B= 36.1584+0.0697T-0.4644S-0.3364Z$	31421.44
	Con Residual	$B= 36.1584+0.0697T-0.4644S-0.3364Z +1.$	9705.215

Tabla 6. Comparación de los valores χ^2

Grupo	χ^2_{Bc}	χ^2_{Cr}	$\chi^2_{\alpha=0.05}$
1	63167.32	224.4531	3.3251
2	10479.22	3851.608	2.7326
3	22390.96	659.4931	3.3251
4	30420.6	4.731781	4.5748
5	6.217351	5.325502	2.7326
6	102496.3	58.25634	5.2260
7	31421.44	9705.215	3.3251

Bc = Biomasa Calculada; Cr = Biomasa calculada con residual

Posteriormente se aplicó un análisis de regresión a cada uno de los grupos, relacionando la biomasa calculada contra la biomasa real; los índices de correlación resultaron: 0.0568, 0.4918, 0.0315, 0.2364, 0.6392, 0.1308 y 0.0515; para los grupos del 1 al 7 respectivamente (Figuras 16-22), por lo que estas ecuaciones tampoco son representativas para la descripción real de la biomasa zooplanctónica; exceptuando el grupo número 5 que posee un índice de correlación alto; esto probablemente por la baja cantidad de puntos de muestreo que posee (9 puntos).

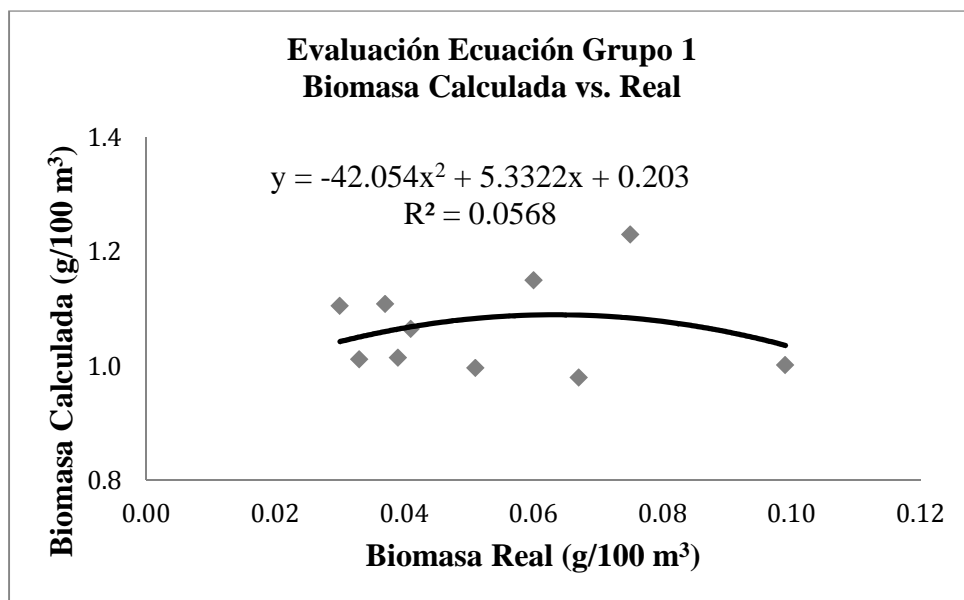


Fig. 11. Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada correspondiente al grupo 1.

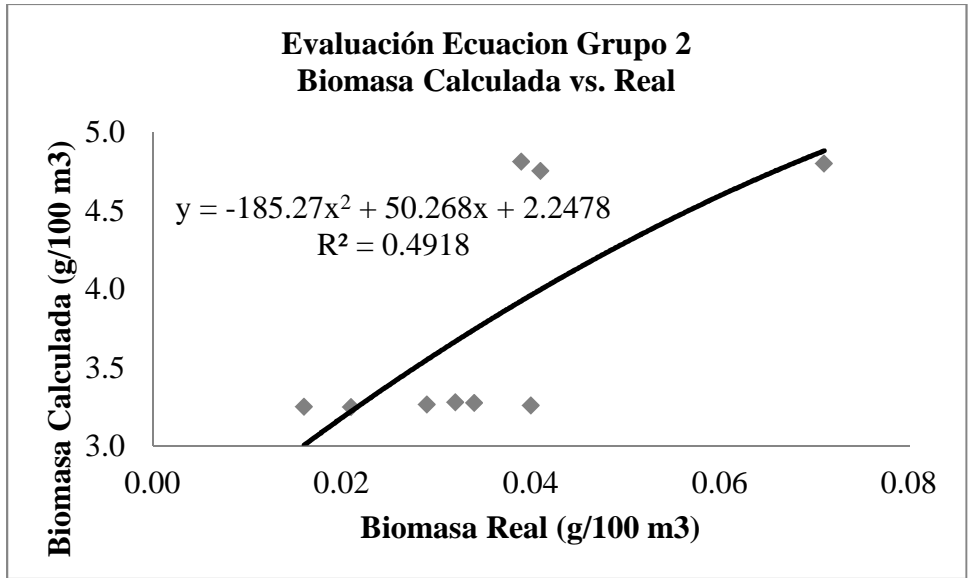


Fig. 12. Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada correspondiente al grupo 2.

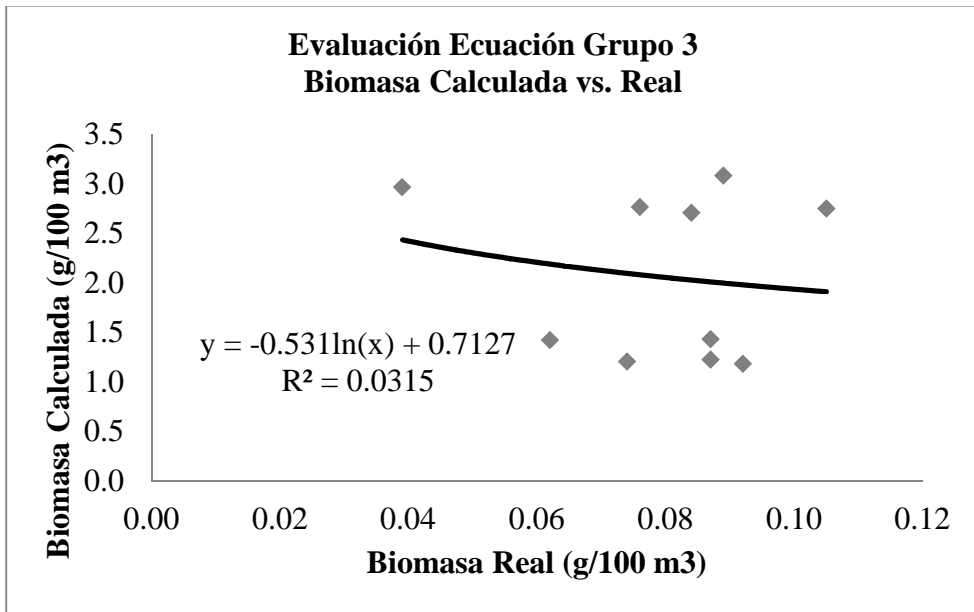


Fig. 13. Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada correspondiente al grupo 3.

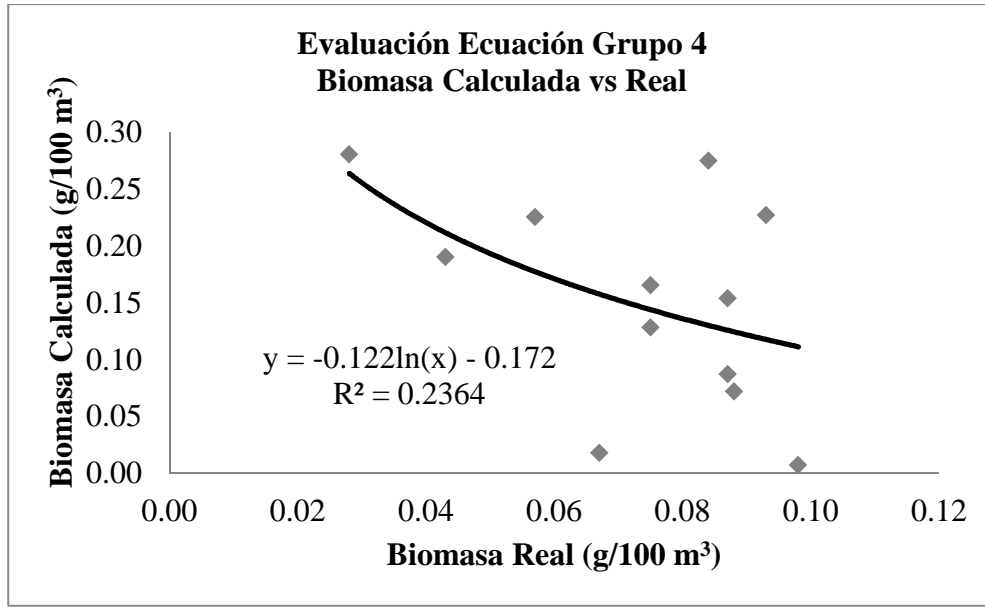


Fig. 14. Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada correspondiente al grupo 4.

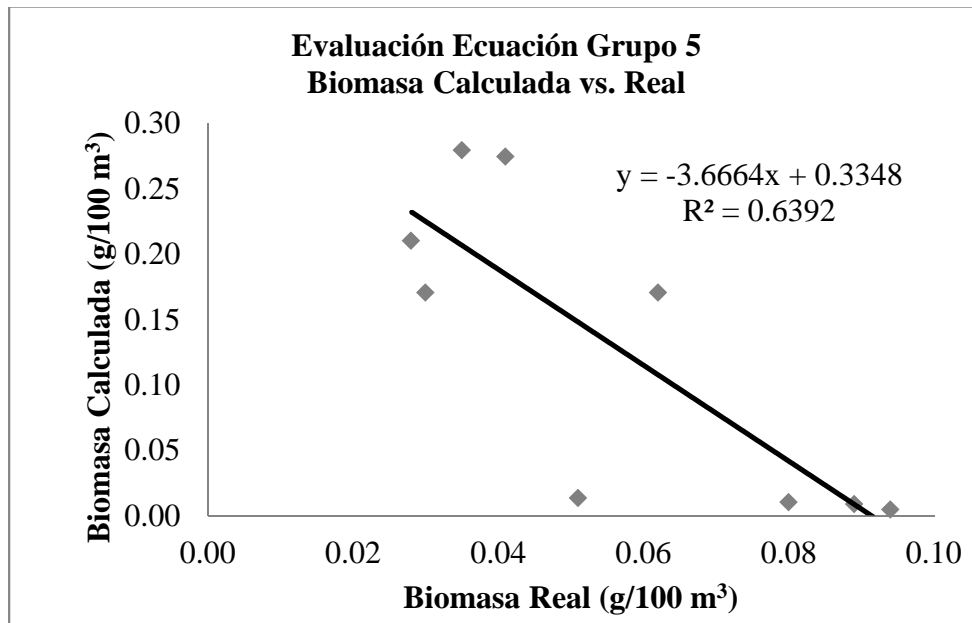


Fig. 15. Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada correspondiente al grupo 5.

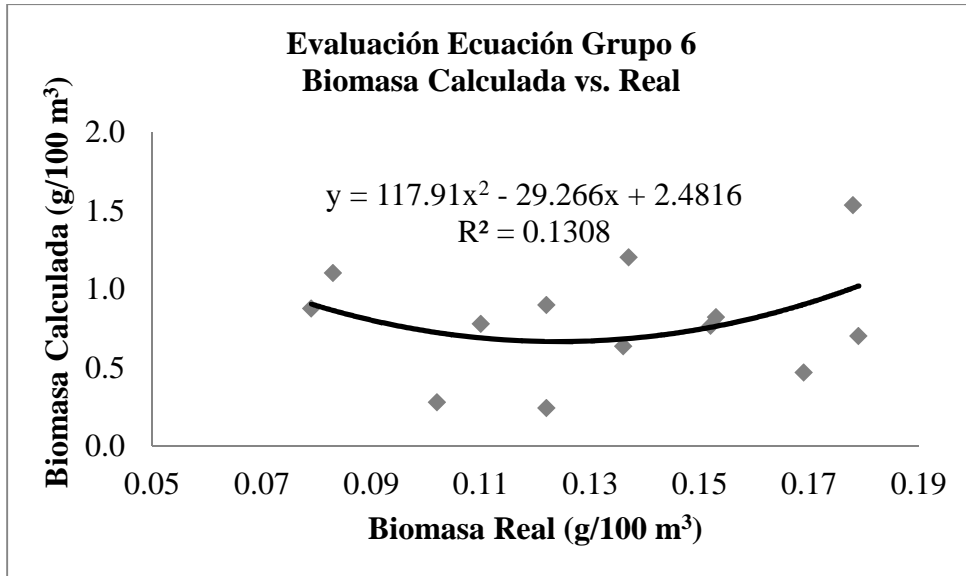


Fig. 16. Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada correspondiente al grupo 6.

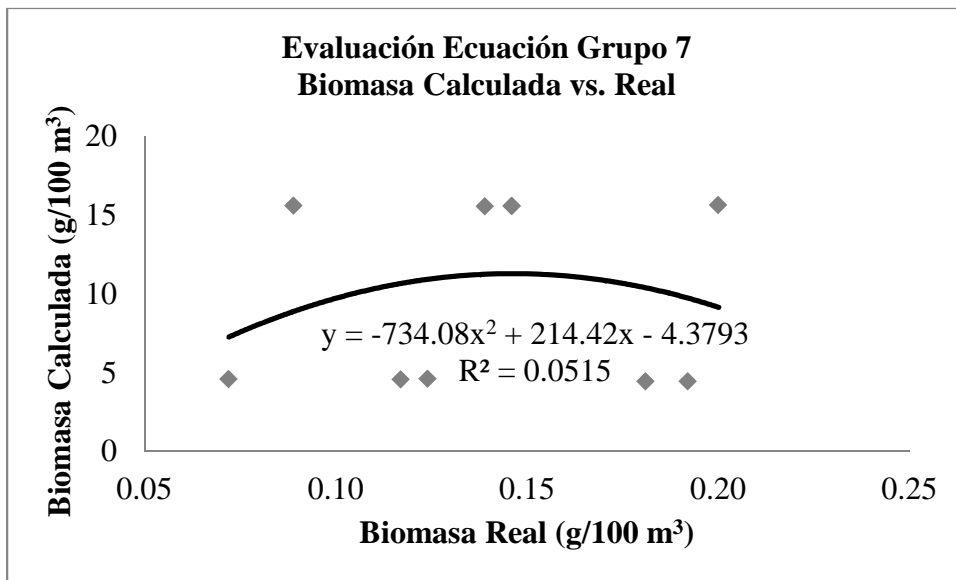


Fig. 17. Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada correspondiente al grupo 7.

Con todo esto se puede concluir que el modelo por grupos de similitud, no resulta en datos estadísticamente similares a los valores reales, por lo que se rechaza para la reconstrucción de biomasa zooplanctónica en la Bahía de Campeche.

5.2.1.3 Modelación por profundidad

Se trabajó con 10 profundidades: 20, 36, 52, 68, 84, 100, 116, 132 y 148 m, respectivamente. Se promediaron las ecuaciones en cada una de las profundidades, para obtener una ecuación única, con la que se calculó la biomasa, la cual fue comparada con los valores reales mediante una prueba χ^2 , concluyendo que los valores eran estadísticamente diferentes, por lo que, se calculó el residual con lo que se ajustó la ecuación y se procedió nuevamente al cálculo de los valores de biomasa para ser comparados con los valores reales, encontrando que no existe diferencia significativa ($\alpha=0.05$) entre los datos de biomasa calculados y los datos observados por Santamaría (Tablas 7 y 8), por lo que se concluye que estas ecuaciones son capaces de reproducir los valores de biomasa de la campaña FIBAC I.

Tabla 7. Ecuaciones de la modelación por profundidad.

Profundidad (m)	Biomasa	Ecuación	χ^2
20	Calculada	$B = -67.5766 + 0.2482T - 2.0144S + 0.4082Z$	1283151
	c/Residual	$B = -67.5766 + 0.2482T - 2.0144S + 0.4082Z + 89.4222$	3.177628
36	Calculada	$B = -87.9963 + 0.2643T - 2.7018S + 0.0837Z$	20.4944
	c/Residual	$B = 87.9963 + 0.2643T - 2.7018S + 0.0837Z + 0.1807$	2.889841
52	Calculada	$B = 30.8713 + 0.0589T - 1.1290S + 0.1696Z$	9086.967
	c/Residual	$B = 30.8713 + 0.0589T - 1.1290S + 0.1696Z + 6.1273$	1.959996
68	Calculada	$B = 1.8302 + 0.0770T + 1.1982S - 0.6885Z$	7.772615
	c/Residual	$B = 1.8302 + 0.0770T + 1.1982S - 0.6885Z - 0.1255$	1.979331
84	Calculada	$B = -29.6418 + 0.0444T + 0.6134S + 0.0786Z$	2.542887
	c/Residual	$B = -29.6418 + 0.0444T + 0.6134S + 0.0786Z - 0.0776$	0.3724146
100	Calculada	$B = 190.3819 + 0.0810T - 1.5756S - 1.3395Z$	1399424
	c/Residual	$B = 190.3819 + 0.0810T - 1.5756S - 1.3395Z - 0.1615$	1.394216

116	Calculada	$B=-118.0999+0.0815T-0.9558S-1.9002Z$	2548026
	c/Residual	$B=-118.0999+0.0815T-0.9558S-1.9002Z-70.0871$	1.314718
132	Calculada	$B=6.8477+0.0022T-0.1666S-0.1880Z$	293040.5
	c/Residual	$B=6.8477+0.0022T-0.1666S-0.1880Z+24.0221$	0.1845687
148	Calculada	$B=-109.1548-0.3758T+2.8410S+0.0865Z$	3.661361
	c/Residual	$B=-109.1548-0.3758T+2.8410S+0.0865Z-0.0074$	0.1404633
164	Calculada	$B=-64.0239-0.3449T+2.2106S-0.0618Z$	1.4990993
	c/Residual	$B=-64.0239-0.3449T+2.2106S-0.0618Z+0.0298$	0.1443188

Tabla 8. Comparación de los valores χ^2

Profundidad (m)	χ^2_{Bc}	χ^2_{Br}	$\chi^2_{\alpha=0.05}$
20	1283151	3.177628	8.6718
36	20.4944	2.889841	5.2260
52	9086.967	1.959996	8.6718
68	7.772615	1.979331	5.8919
84	2.542887	0.3724146	6.6718
100	1399424	1.394216	6.5706
116	2548026	1.314718	3.9403
132	293040.5	0.1845687	8.6718
148	3.661361	0.1404633	8.6718
164	1.4990993	0.1443188	8.6718

Posteriormente se aplicó un análisis de regresión lineal a cada una de las profundidades, relacionando la biomasa ajustada contra la biomasa real: los índices de correlación resultaron: 0.0868, 0.1316, 0.1874, 0.0725, 0.1461, 0.251, 0.409, 0.0839, 0.031 y 0.043 para los 20, 36, 52, 68, 84, 100, 116, 132, 148 y 164 m respectivamente (Fig. 23-32), por lo que no se logra empatar los valores de biomasa reales para ninguna de las profundidades, así, a pesar de que los valores no son estadísticamente diferentes la relación que presentan no es alta.

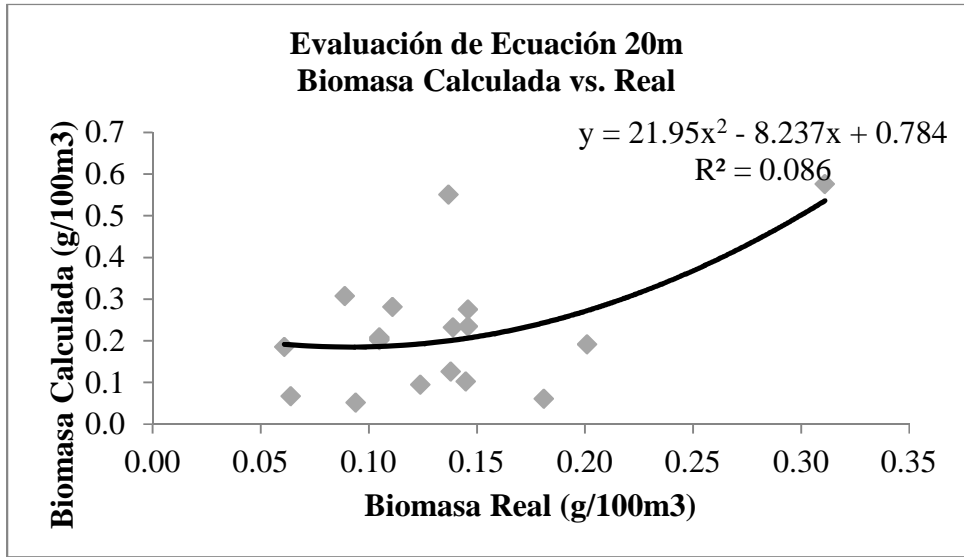


Fig. 18. Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada a los 20 m de profundidad

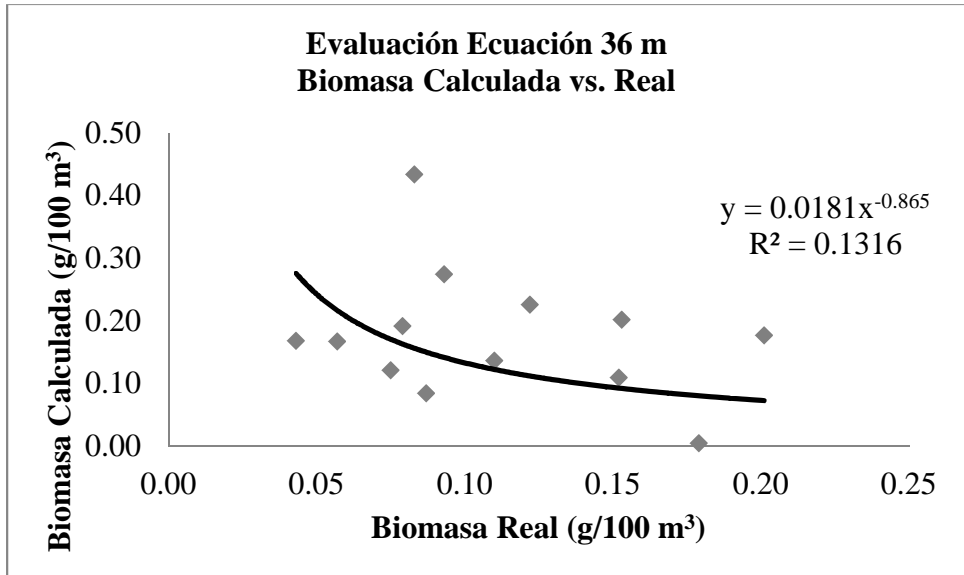


Fig. 19. Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada a los 36 m de profundidad.

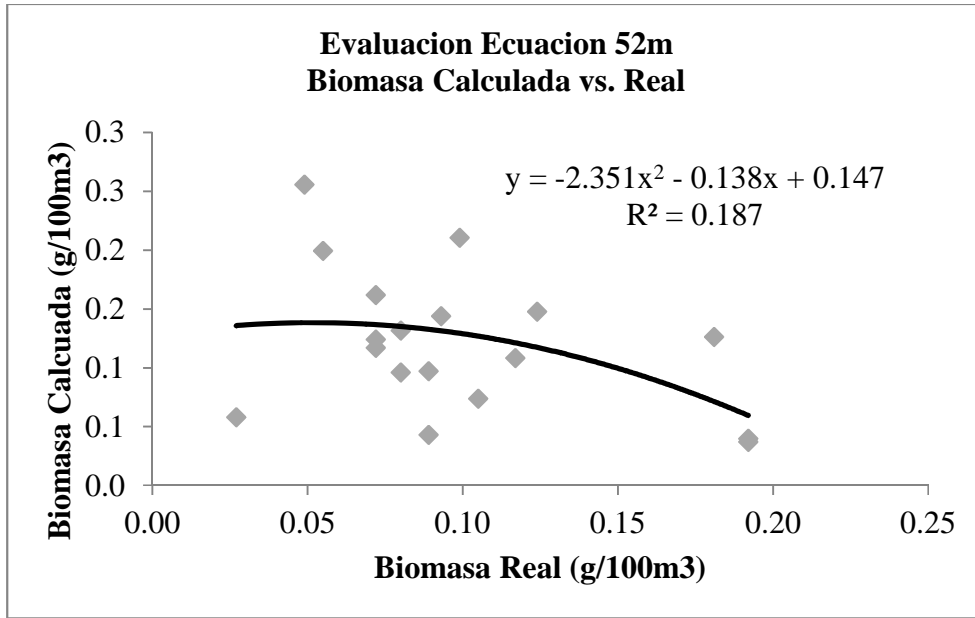


Fig. 20. Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada a los 52m de profundidad.

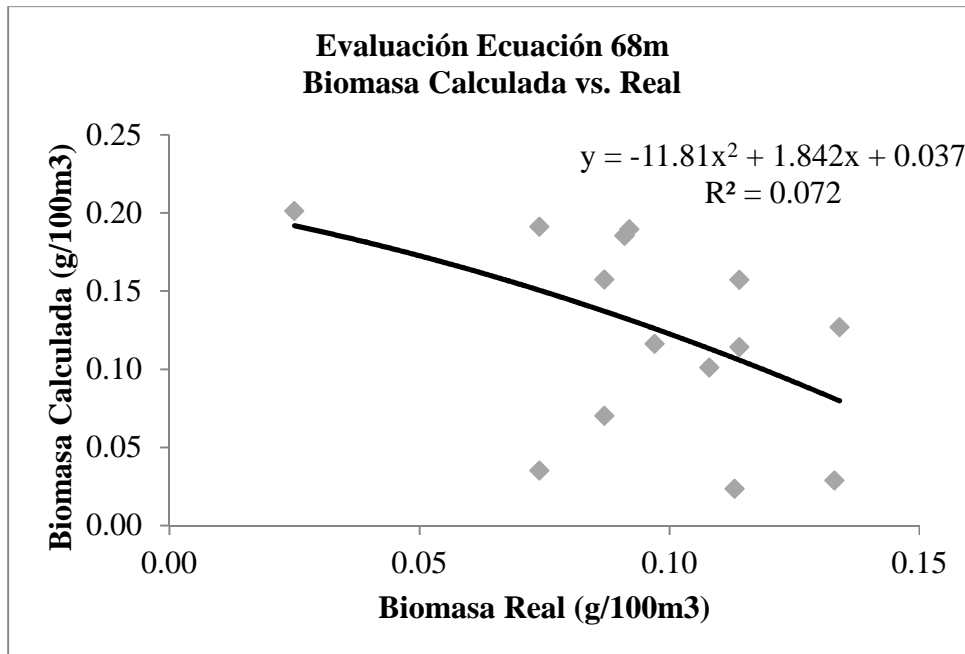


Fig. 21. Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada a los 68 m de profundidad.

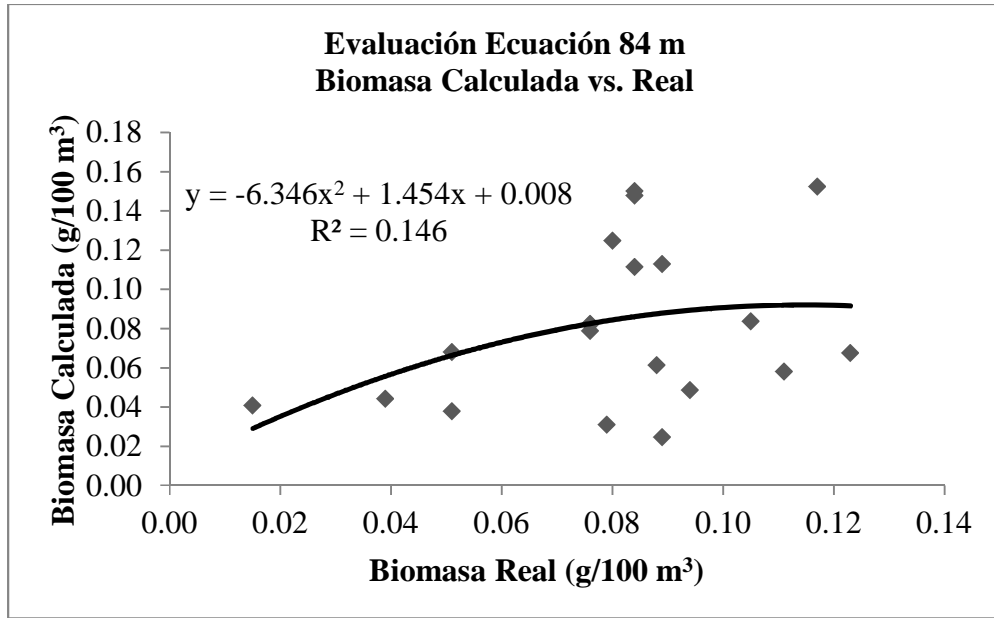


Fig. 22. Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada a los 84 m de profundidad.

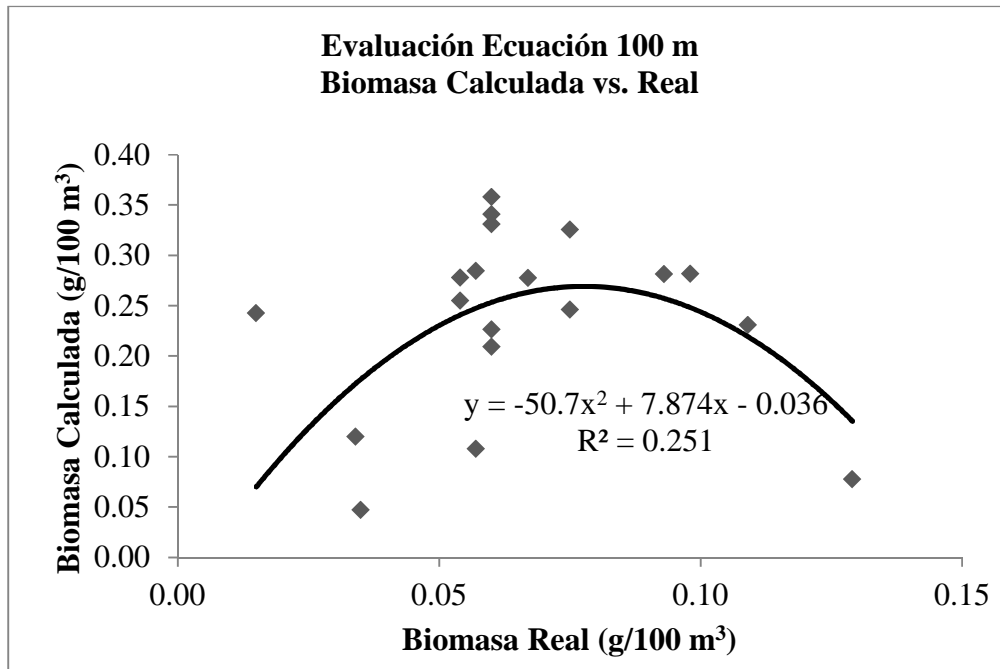


Fig. 23. Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada a los 100 m de profundidad.

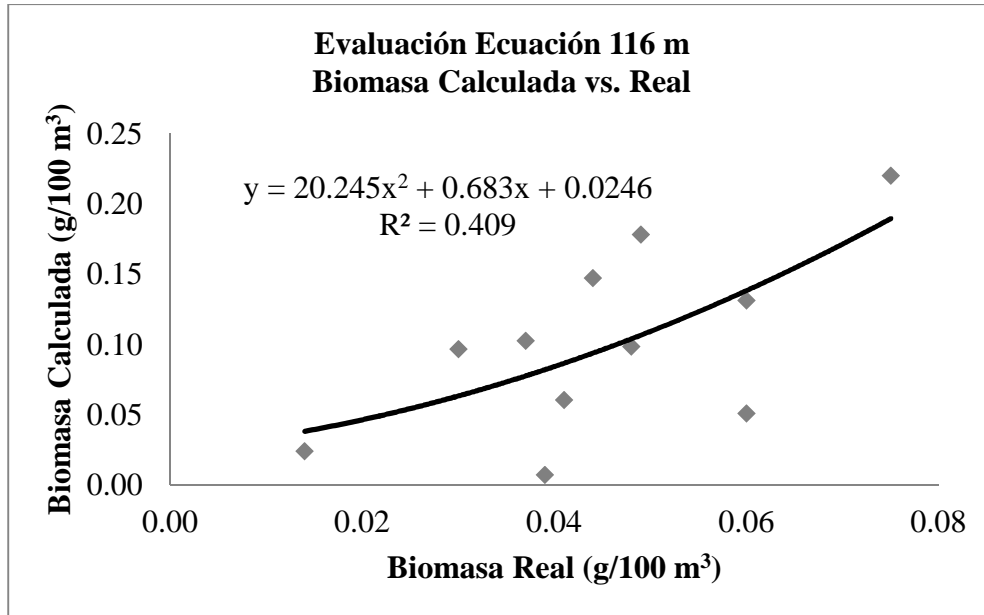


Fig. 24. Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada a los 116 m de profundidad.

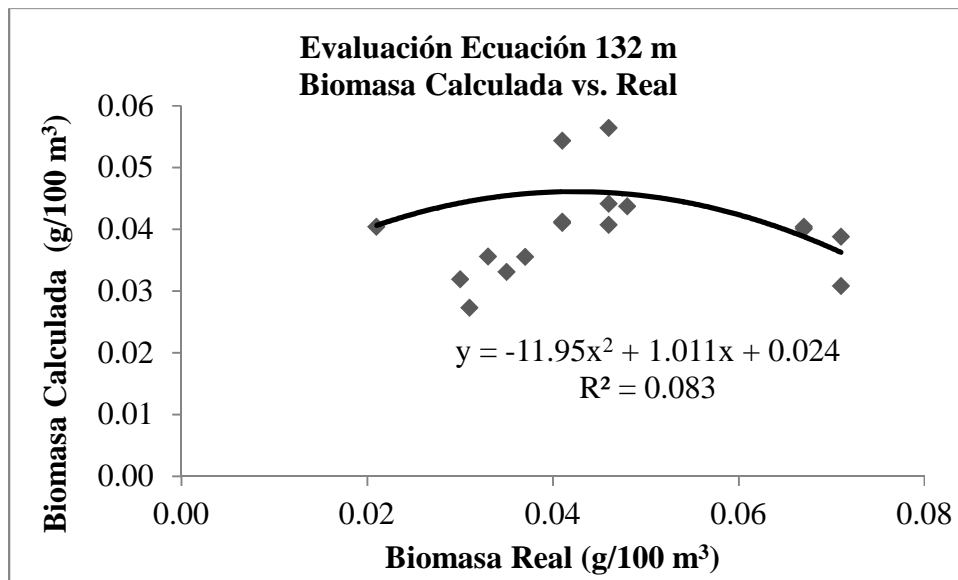


Fig. 25. Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada a los 132 m de profundidad.

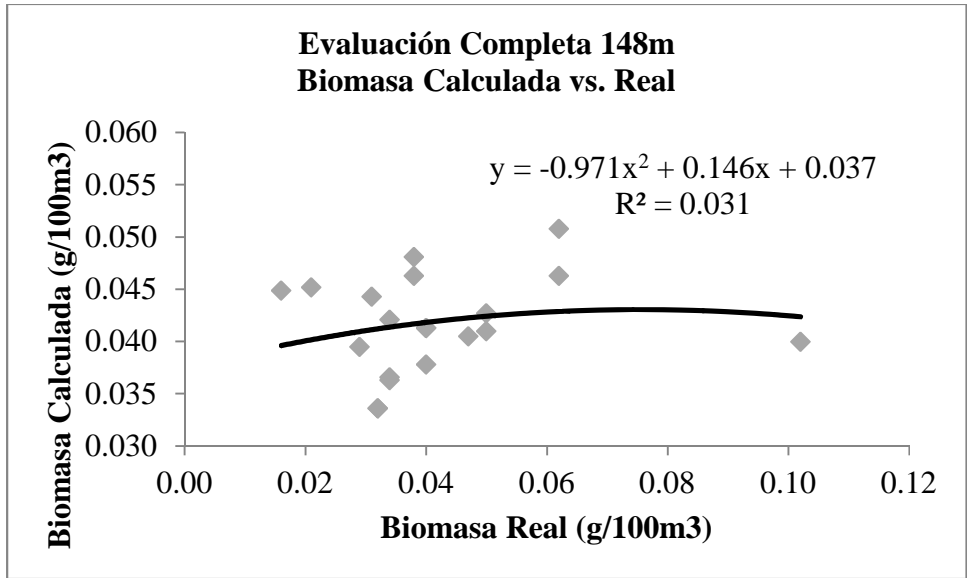


Fig. 26. Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada a los 148 m de profundidad.

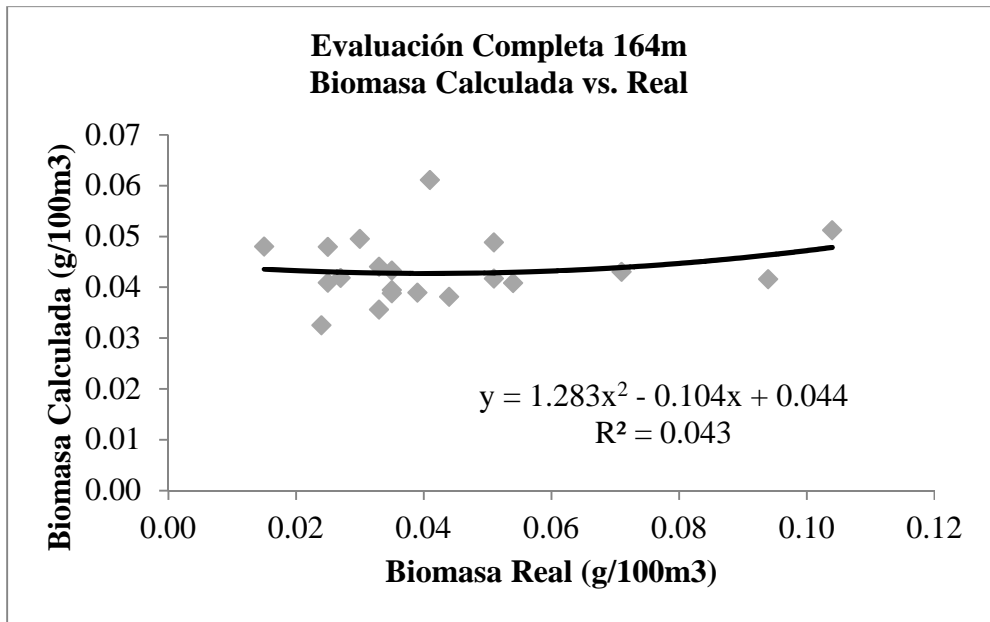


Fig. 27. Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada a los 164 m de profundidad.

5.2.1.4 Modelación completa por profundidad

Buscando una mayor relación entre los valores calculados y los reales se trabajó con la ecuación de la modelación completa (Ecuación 13) aplicándola a cada una de las profundidades: 20, 36, 52, 68, 84, 100, 116, 132 y 148 m para calcular la biomasa que fue comparada contra los valores reales mediante una prueba χ^2 encontrando que eran estadísticamente diferentes; por lo que se procedió a calcular el residual para cada profundidad y nuevamente se obtuvo la biomasa que al ser comparada contra los datos verdaderos, mediante la prueba χ^2 , no reflejó diferencia significativa con un alfa de 0.05 y 0.01 (Tablas 9 y 10), lo que significa que los valores reales contra los calculados son estadísticamente iguales, por lo que este modelo es capaz de reproducir, al menos estadísticamente, la distribución y abundancia de la biomasa de zooplancton en la Bahía de Campeche.

Tabla 9. Ecuaciones de la modelación por profundidad.

Profundidad (m)	Biomasa	Ecuación	χ^2
20	c/Residual	$B = -7.3073 + 0.0031T - 0.0672S + 0.0292Z + 9.2171$	0.5595475
36	c/Residual	$B = -7.3073 + 0.0031T - 0.0672S + 0.0292Z + 8.7122$	0.3569654
52	c/Residual	$B = -7.3073 + 0.0031T - 0.0672S + 0.0292Z + 8.2493$	0.4902661
68	c/Residual	$B = -7.3073 + 0.0031T - 0.0672S + 0.0292Z + 7.7931$	0.2252226
84	c/Residual	$B = -7.3073 + 0.0031T - 0.0672S + 0.0292Z + 7.3086$	0.3176977
100	c/Residual	$B = -7.3073 + 0.0031T - 0.0672S + 0.0292Z + 6.8130$	0.2970543
116	c/Residual	$B = -7.3073 + 0.0031T - 0.0672S + 0.0292Z + 6.3315$	0.1413730
132	c/Residual	$B = -7.3073 + 0.0031T - 0.0672S + 0.0292Z + 5.8771$	0.1498224
148	c/Residual	$B = -7.3073 + 0.0031T - 0.0672S + 0.0292Z + 5.4095$	0.1440130
164	c/Residual	$B = -7.3073 + 0.0031T - 0.0672S + 0.0292Z + 4.9398$	0.2170137

Tabla 10. Comparación de los valores χ^2

Profundidad (m)	R ²	χ^2_{Bc}	χ^2_{Cr}	$\chi^2_{\alpha=0.05}$	$\chi^2_{\alpha=0.005}$
20	0.2737	15570.73	0.5595475	10.117	6.84398
36	0.1436	17049.31	0.3569654	10.117	6.84398
52	0.1042	17498.23	0.4902661	10.117	6.84398
68	0.2304	13307.73	0.2256226	10.117	6.84398
84	0.3577	16577.05	0.3176977	10.117	6.84398
100	0.2513	17828.22	0.2970543	10.117	6.84398
116	0.1944	20754.33	0.141373	10.117	6.84398
132	0.1513	19868.15	0.1498224	10.117	6.84398
148	0.0314	16310.43	0.144013	10.117	6.84398
164	0.0439	13869.04	0.2170137	10.117	6.84398

Posteriormente se aplicó un análisis de regresión a cada una de las profundidades, relacionando la biomasa ajustada contra la biomasa real; los índices de correlación resultaron: 0.02737, 0.1436, 0.1042, 0.2304, 0.3577, 0.2513, 0.1944, 0.1513, 0.0314 y 0.0439; para los 20, 36, 52, 68, 84, 100, 116, 132, 148 y 164 respectivamente, y siguen siendo bajos por lo que no están relacionados (Fig. 33-42). Esto significa que a pesar de que estadísticamente los valores se pueden considerar iguales, no es así en la realidad, por lo que tampoco mediante este modelo se logran reproducir los valores reales.

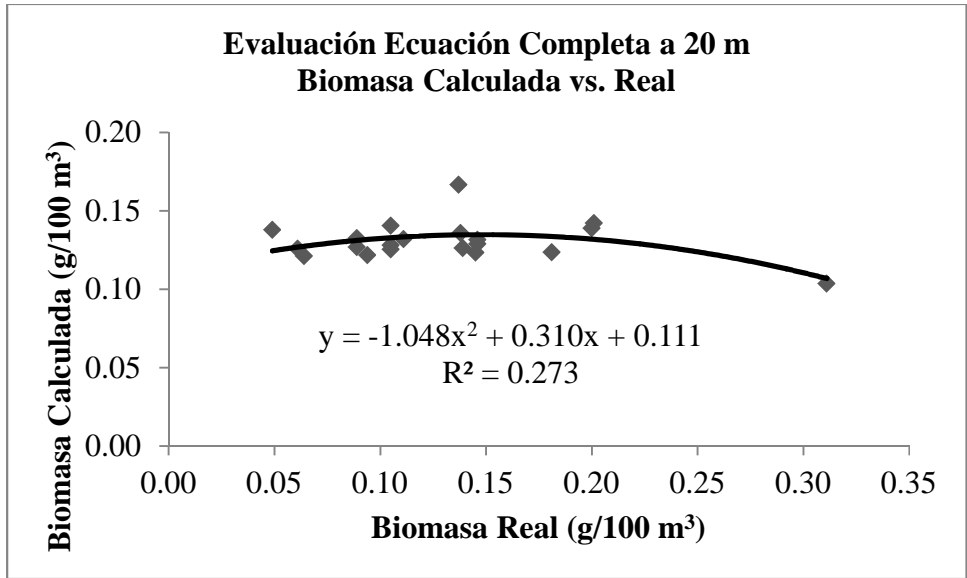


Fig. 28. Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada obtenida a partir de la ecuación completa aplicada a 20 m de profundidad.

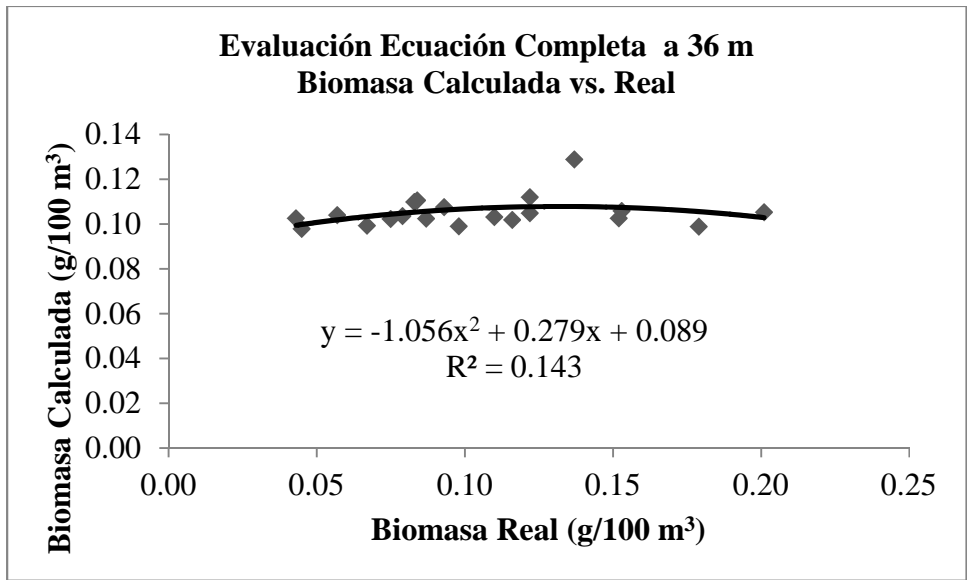


Fig. 29. Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada obtenida a partir de la ecuación completa aplicada a 36 m de profundidad.

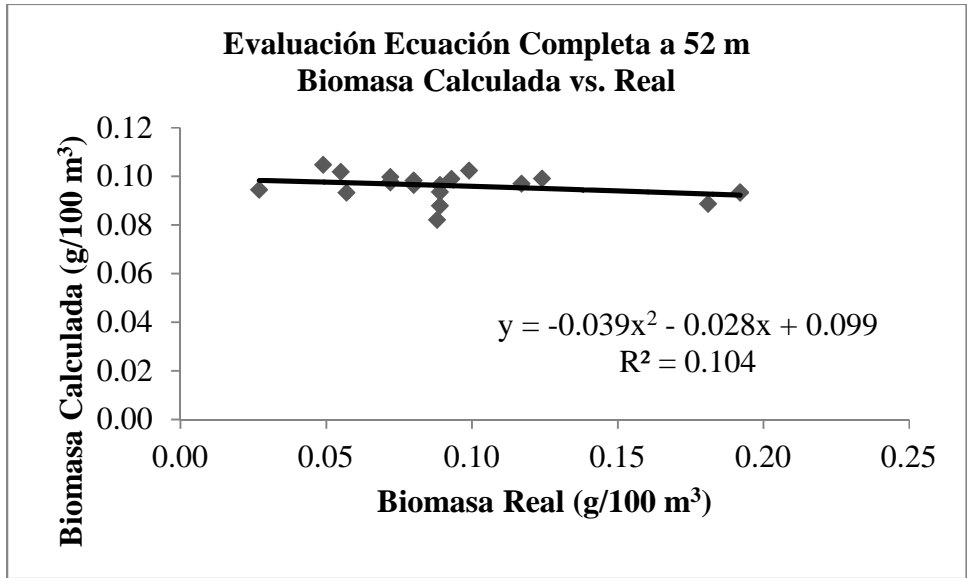


Fig. 30. Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada obtenida a partir de la ecuación completa aplicada a 52 m de profundidad.

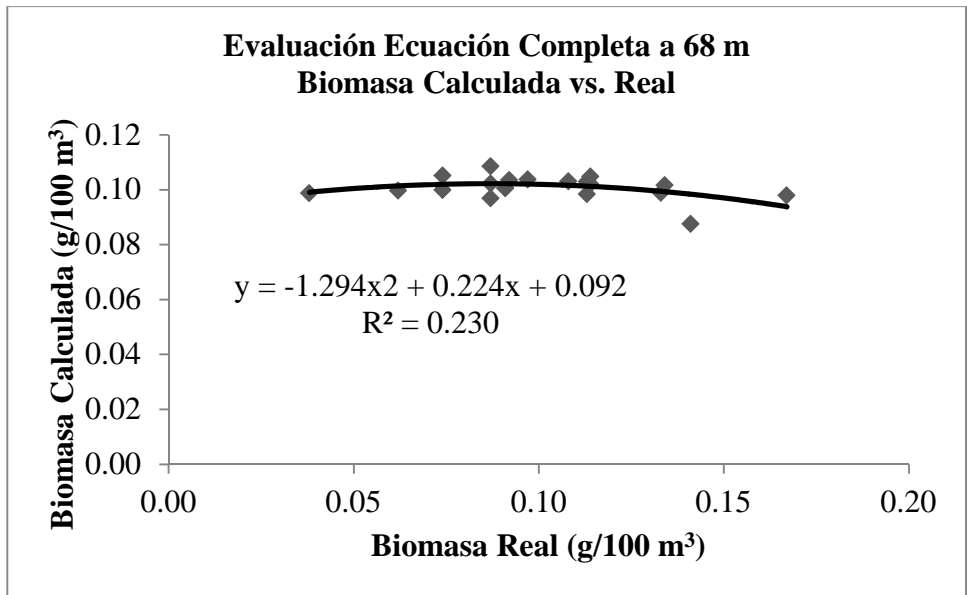


Fig. 31. Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada obtenida a partir de la ecuación completa aplicada a 68 m de profundidad.

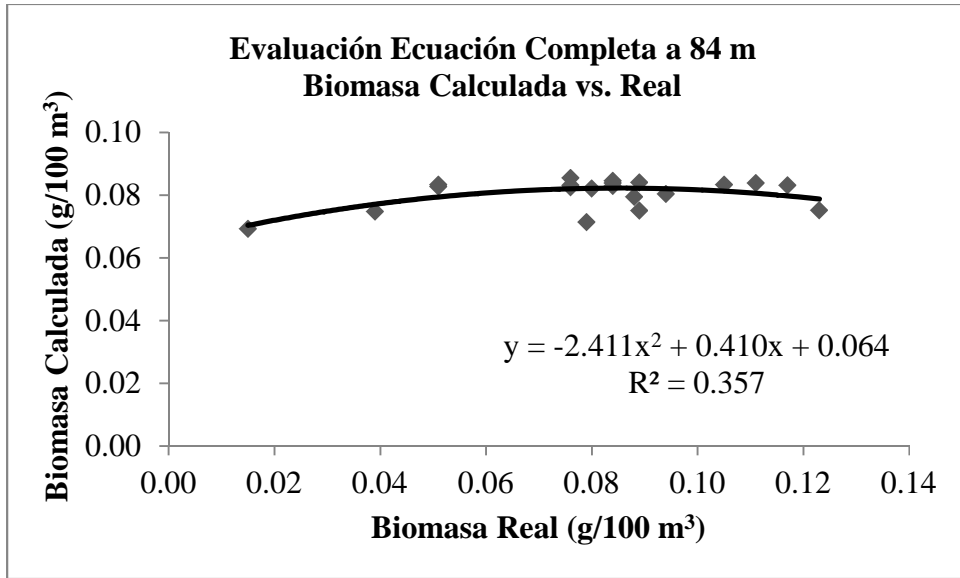


Fig. 32. Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada obtenida a partir de la ecuación completa aplicada a 84 m de profundidad.

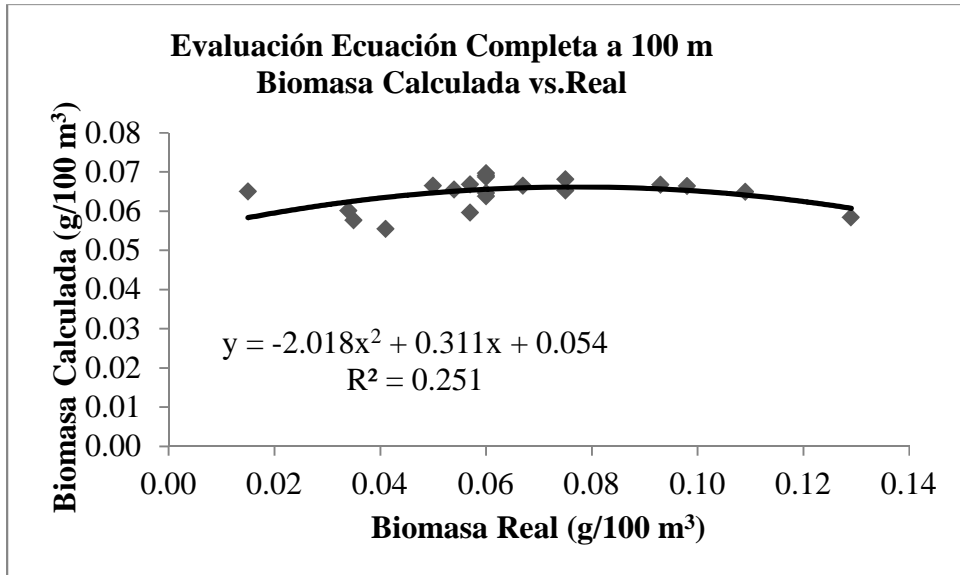


Fig. 33. Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada obtenida a partir de la ecuación completa aplicada a 100 m de profundidad.

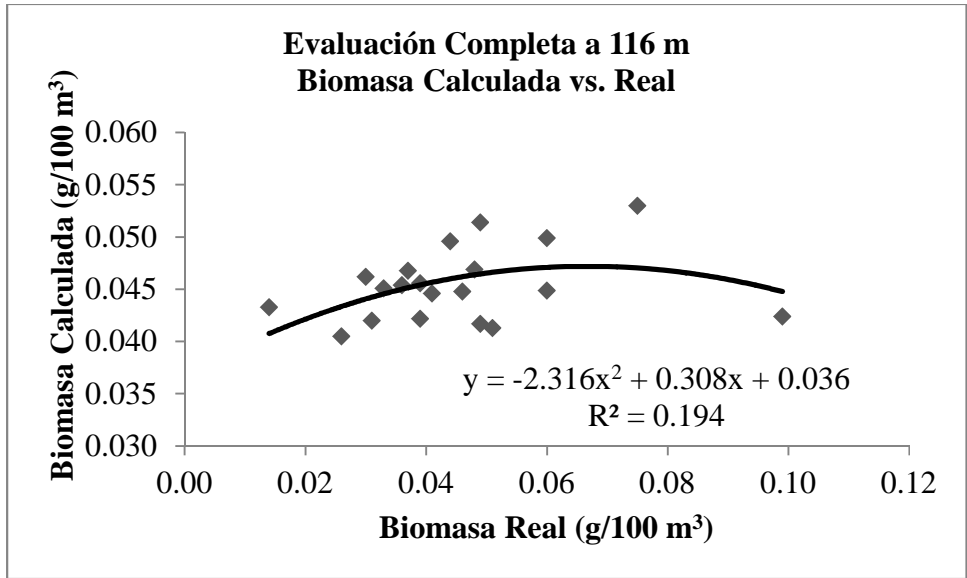


Fig. 34. Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada obtenida a partir de la ecuación completa aplicada a 116 m de profundidad.

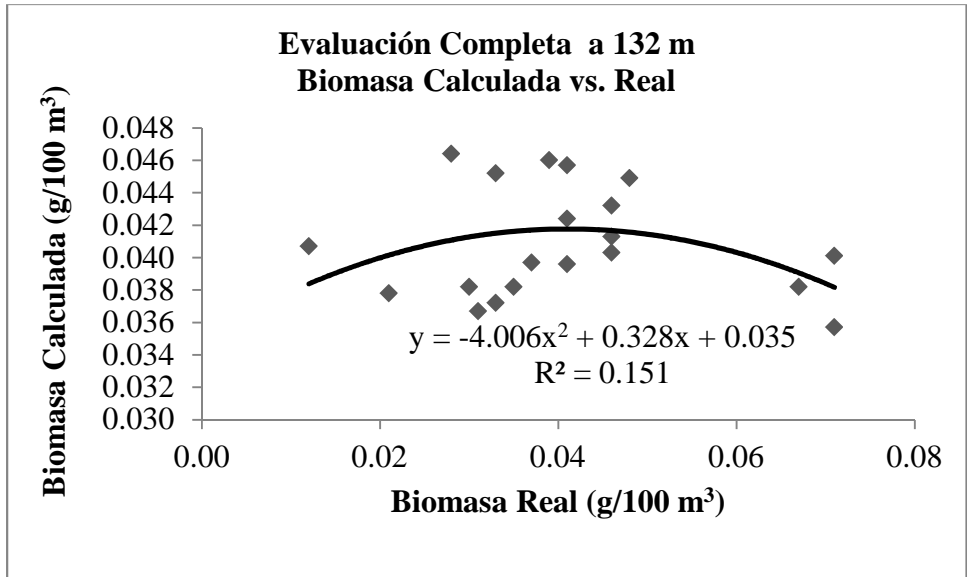


Figura 35 Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada obtenida a partir de la ecuación completa aplicada a 132 m de profundidad.

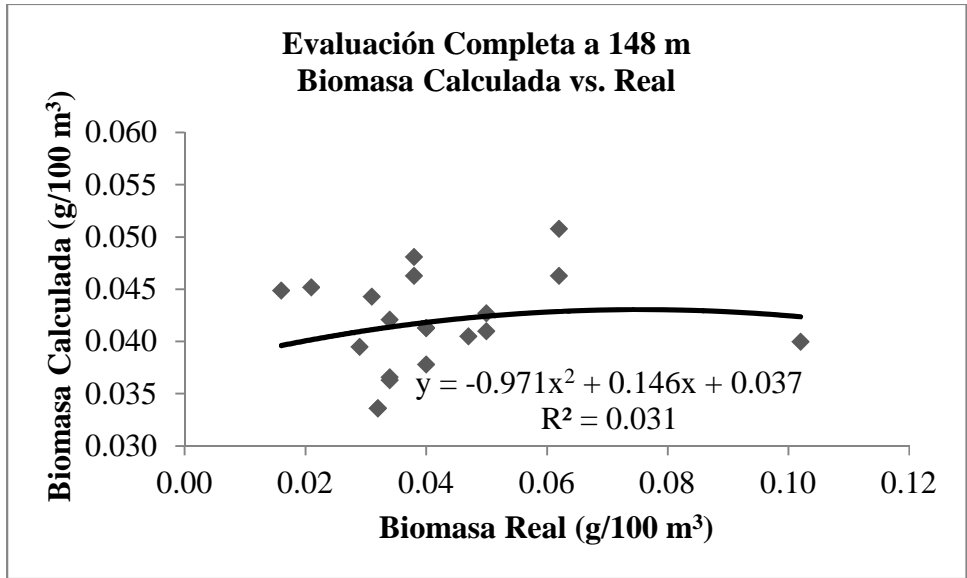


Fig. 36. Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada obtenida a partir de la ecuación completa aplicada a 148 m de profundidad.

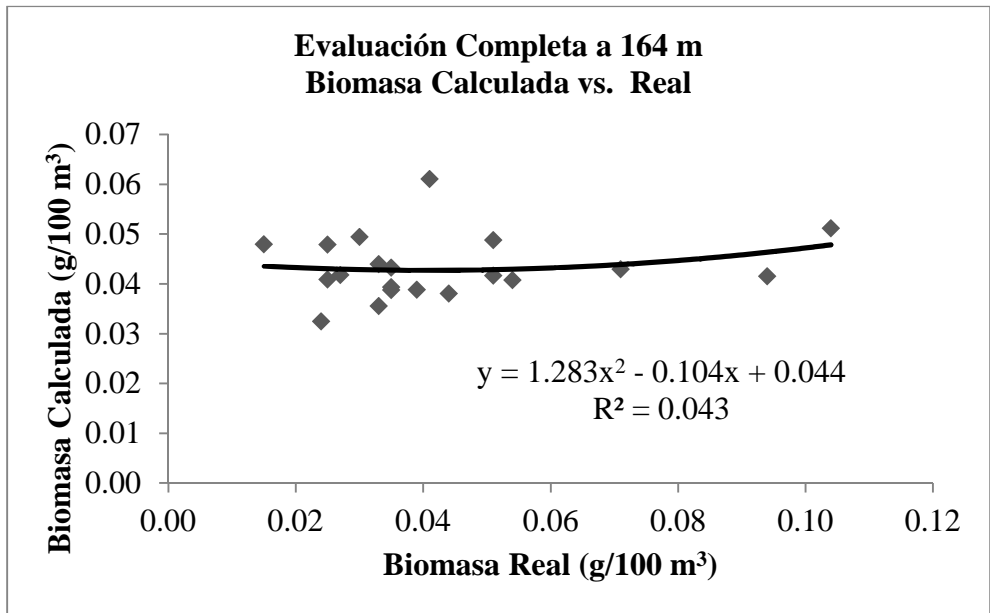


Fig. 37. Modelo de regresión entre la biomasa real y la biomasa calculada obtenida a partir de la ecuación completa aplicada a 164 m de profundidad.

5.2.2 Modelación de Segundo Grado

La ecuación propuesta en este caso es de la forma:

$$B = a_0 + a_1t + a_2s + a_3z + a_4t^2 + a_5s^2 + a_6z^2 \quad (9)$$

A pesar de haber encontrado las ecuaciones donde los valores reales y los calculados no presentan diferencia significativa, se continuó analizando el comportamiento de la distribución y abundancia de zooplancton usando una ecuación en segundo grado, con la finalidad de determinar si los valores eran igual de precisos que con la modelación de primer grado, para esto se calcularon las ecuaciones conforme a los grupos con 80% de similitud, que son los mismos que se ocuparon para modelar usando una ecuación de primer grado.

Para los seis grupos se trabajó con 10, 21, 2, 1, 3, 7 ecuaciones respectivamente, las cuales fueron aplicadas a los puntos de muestreo con las que fueron realizadas, para así obtener la biomasa calculada, que al compararse con los datos reales se comprueba que son en todos los casos estadísticamente diferentes (poseen 7 órdenes de diferencia con respecto a la biomasa real); por lo que se calculó el residual y se añadió a la ecuación, pero aun así, la diferencia respecto a la biomasa real sigue siendo significativa, incluso mayor que la que se tiene con los modelos de primer grado (Tabla 10).

Tabla 11. Valores de χ^2 para la modelación de segundo grado por grupos

GRUPO	χ^2_{Bc}	χ^2_{Br}	$\chi^{2\alpha=0.05}$
1	3.72E+14	3.76E+12	51.7393
2	3.49E+10	2.23E+07	82.3581
3	2.08E+12	5.19E+11	5.8919
4	3.80E+06	3.18E+06	1.6354
5	1.45E+06	4.98E+05	10.8508
6	3.74E+08	2.90E+08	34.7642

Se realizaron también análisis de regresión para cada uno de los grupos con el objetivo de estimar el nivel de relación que presentan la biomasa real y la calculada (Fig. 38-42). Los resultados fueron: 0.072, 0.0028, 0.2961, 0.0774 y 0.0153 para los grupos del 1 al 5 respectivamente; 5 de estos valores nos indican una baja correlación entre las biomazas reales y calculadas.

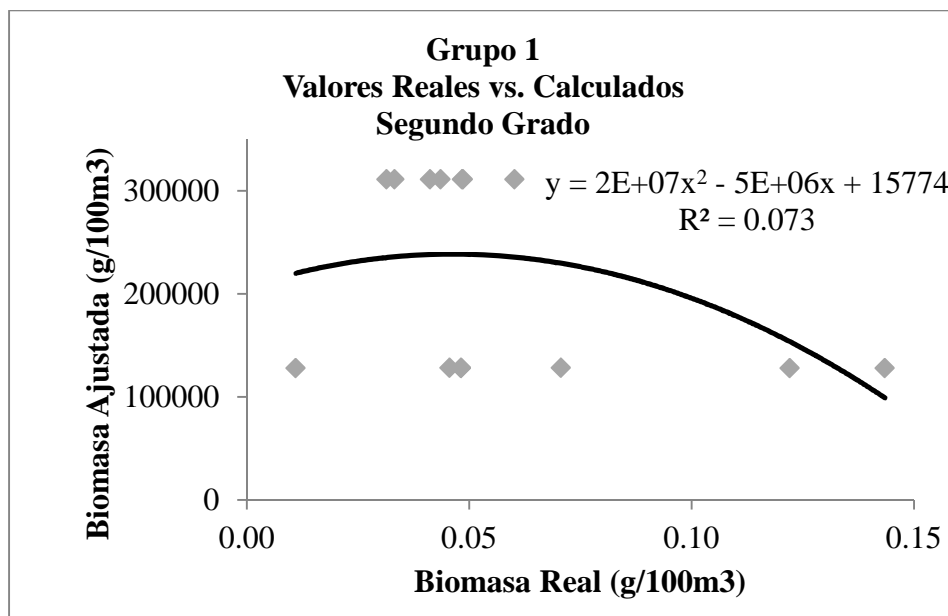


Fig. 38. Relación entre la biomasa real y los valores calculados, utilizando la ecuación de la modelación de segundo grado para el grupo 1.

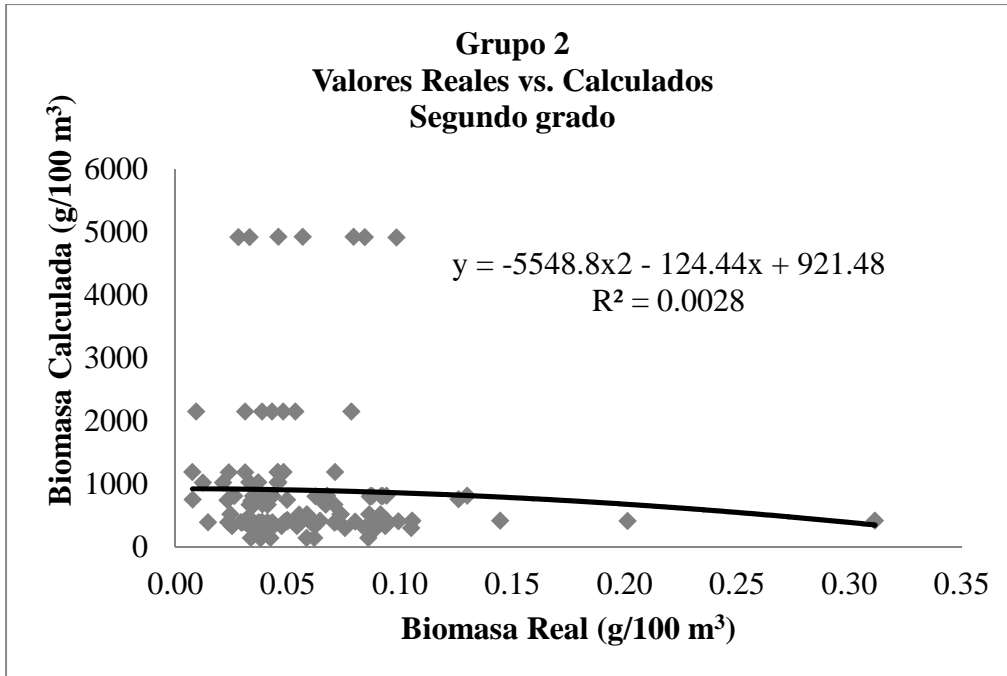


Fig. 39. Relación entre la biomasa real y los valores calculados, utilizando la ecuación de la modelación de segundo grado para el grupo 2.

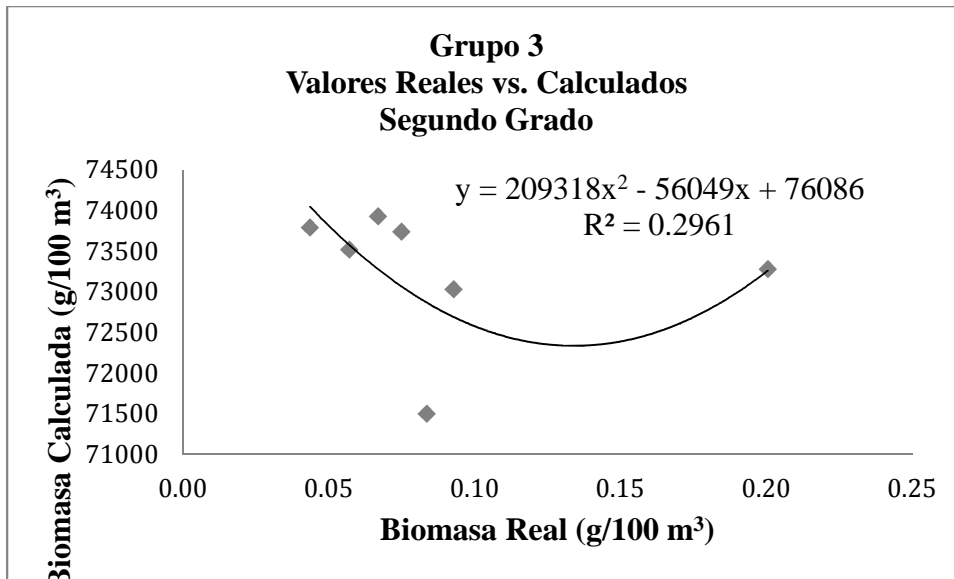


Fig. 40. Relación entre la biomasa real y los valores calculados, utilizando la ecuación de la modelación de segundo grado para el grupo 3.

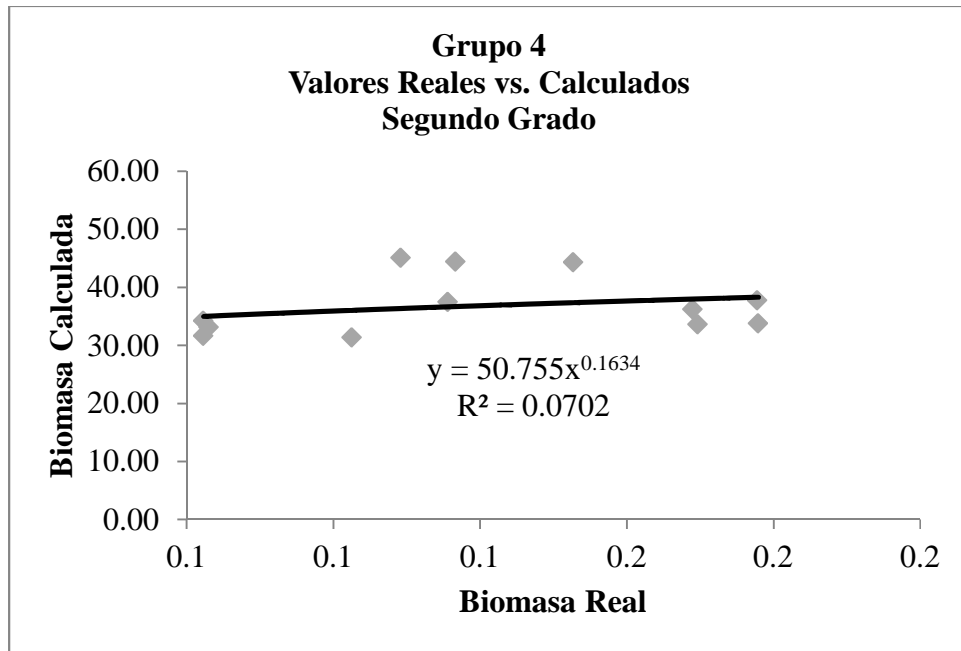


Fig. 41. Relación entre la biomasa real y los valores calculados, utilizando la ecuación de la modelación de segundo grado para el grupo 4.

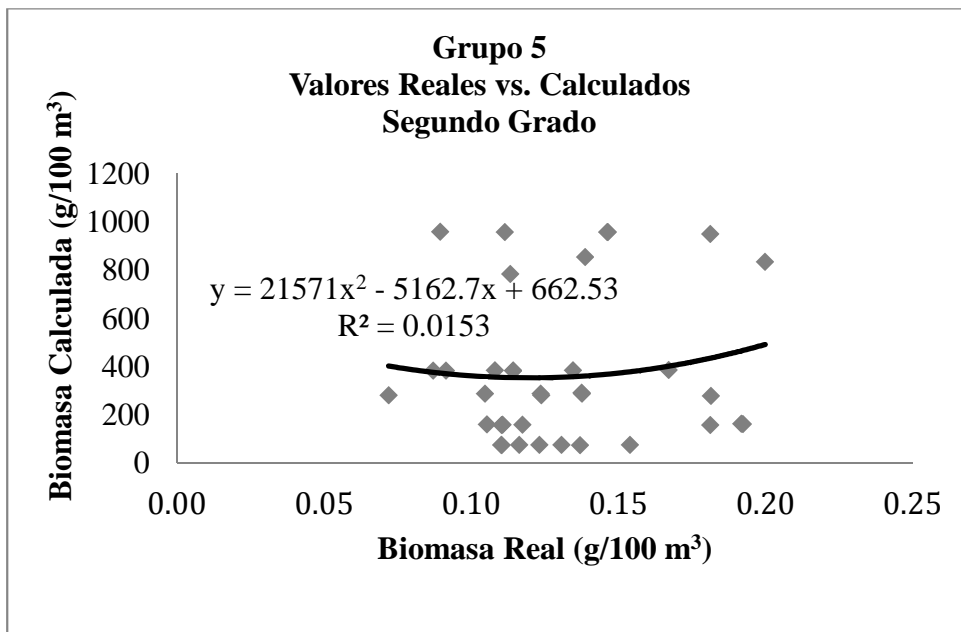


Fig. 42. Relación entre la biomasa real y los valores calculados, utilizando la ecuación de la modelación de segundo grado para el grupo 5.

5.2.3 Modelación de tercer grado

El modelo es tal que:

$$B = a_0 + a_1T + a_2S + a_3Z + a_4T^2 + a_5S^2 + a_6Z^2 + a_7T^3 + a_8S^3 + a_9Z^3 \quad (11)$$

Se modeló el grupo 3, debido a que es el más diverso en cuanto a profundidades y, posee el mayor número de puntos de muestreo (147) obteniendo la siguiente ecuación de tercer grado:

$$B = 1.0e+004 \times (-8.1616 + -0.0010T + 0.5871 - 0.0137S^2 + 0.0001S^3) \quad (12)$$

Con la cual se calcularon los valores de biomasa, que fueron comparados con los reales mediante una χ^2 , que resultó en: 319941×10^8 , siendo más alto que $3.32511^{0.05}$; por lo que los datos fueron ajustados mediante el residual obteniendo: 303311×10^4 que sigue siendo mayor al valor de la tabla, por lo que se concluye que los datos de biomasa calculados son estadísticamente diferentes de los valores reales, sobrepasando las diferencias que presentan los modelos de primer y segundo grado, por lo tanto es también rechazado.

Por otro lado se calculó el coeficiente de correlación entre la biomasa real y la calculada, obteniendo un índice de correlación de 0.4654 (Fig. 43).

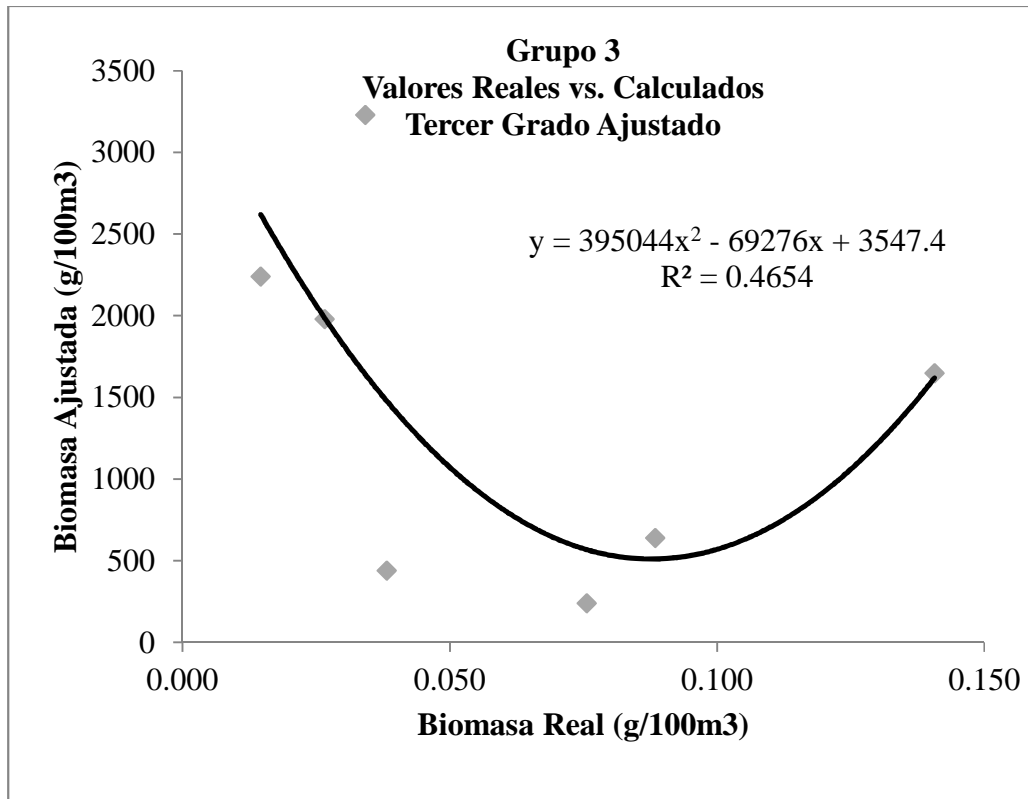


Fig. 43. Relación entre la biomasa real y los valores calculados, utilizando la ecuación de la modelación de tercer grado para el grupo 3

Por lo que el modelo de primer grado que considera todos los puntos de muestreo y que fue aplicado considerando la profundidad, es el que mejor se ajusta a la realidad, arrojando datos iguales estadísticamente, de biomasa calculada contra los valores de biomasa real, esto probablemente debido a que la profundidad es la variable que más afecta la biomasa zooplanctónica, lo cual se pudo apreciar también, en los análisis de regresión y correlación múltiple, además este modelo al abarcar todos los puntos de muestreo se vuelve más robusto. Como resultado tenemos ecuaciones que abarcan todos los puntos de muestreo pero modelados con la variable que explica mejor la biomasa, pudiendo así, reproducir los valores de zooplancton con éxito estadístico.

Finalmente al recrear la distribución y abundancia de la biomasa de zooplancton en la Bahía de Campeche, para el 100% de los datos de Santamaría, se puede observar que la

biomasa calculada se presenta de manera lineal a través de la biomasa real, esto debido al promedio que se realizó de los coeficientes de las ecuaciones dentro de las profundidades (Figuras 44-53).

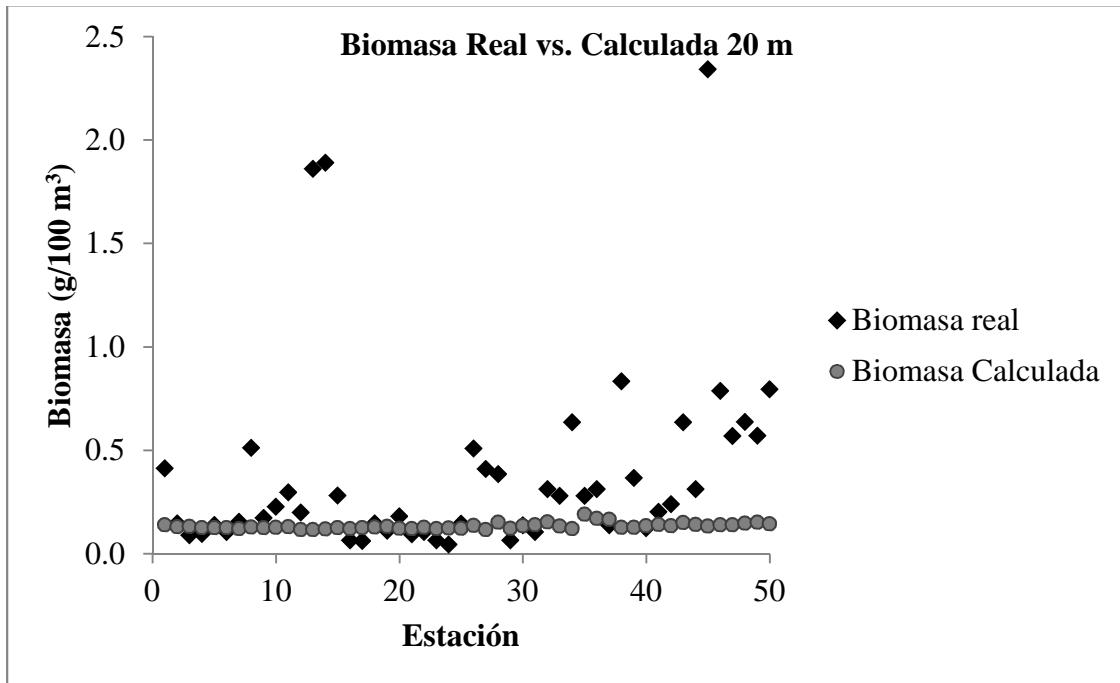


Fig. 44. Comparación de los valores de biomasa calculada y real a 20 m de profundidad.

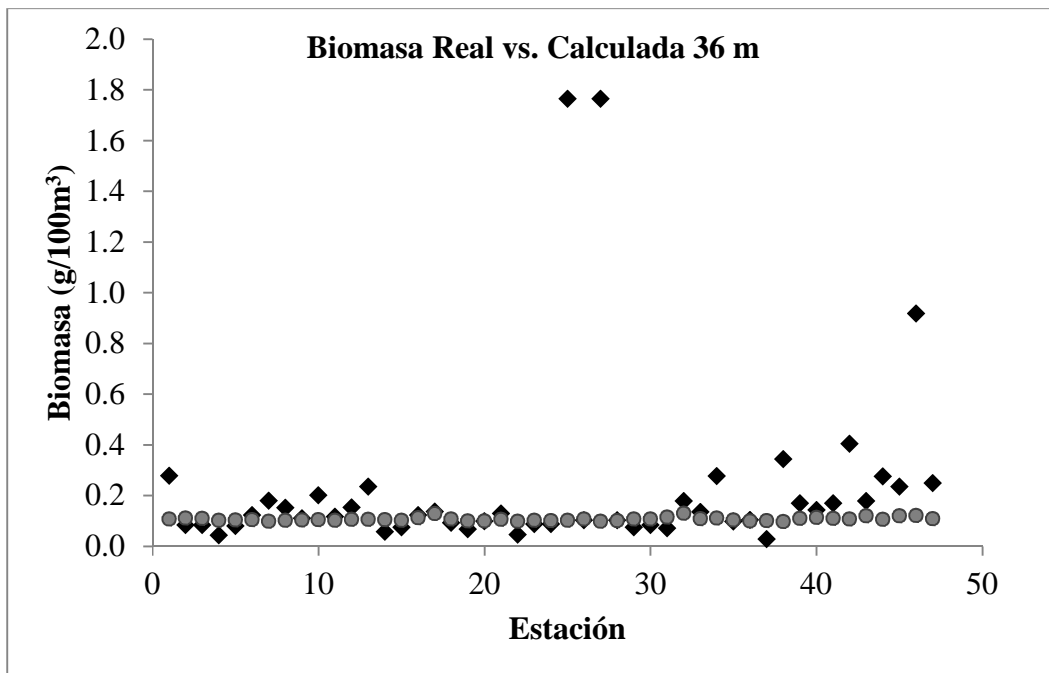


Fig. 45. Comparación de los valores de biomasa calculada y real a 36 m de profundidad.

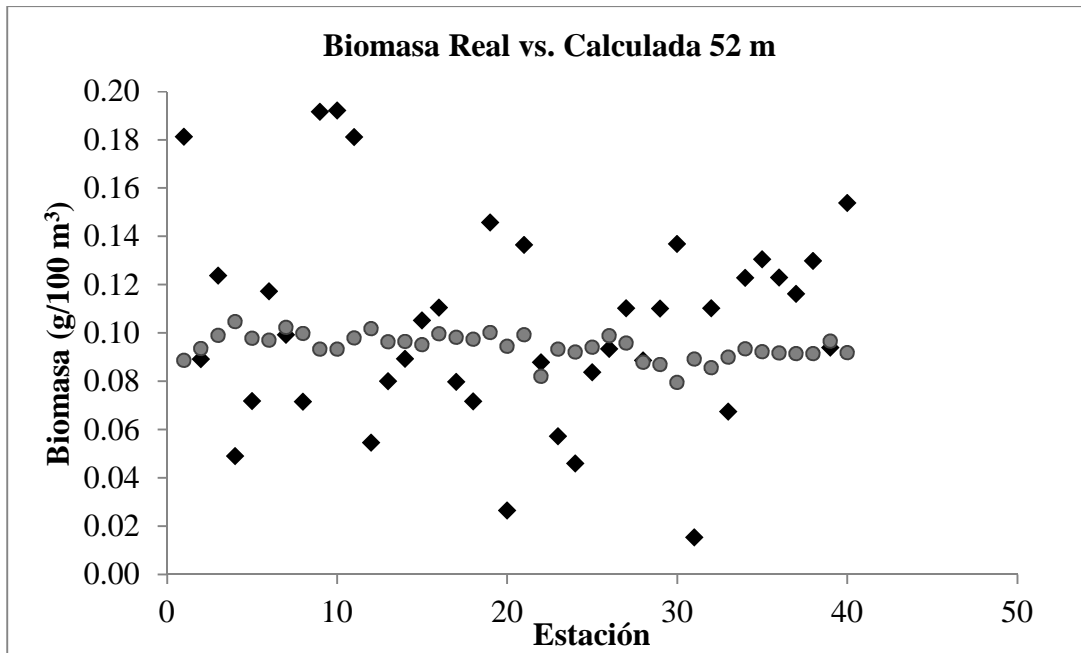


Fig. 46. Comparación de los valores de biomasa calculada y real a 52 m de profundidad.

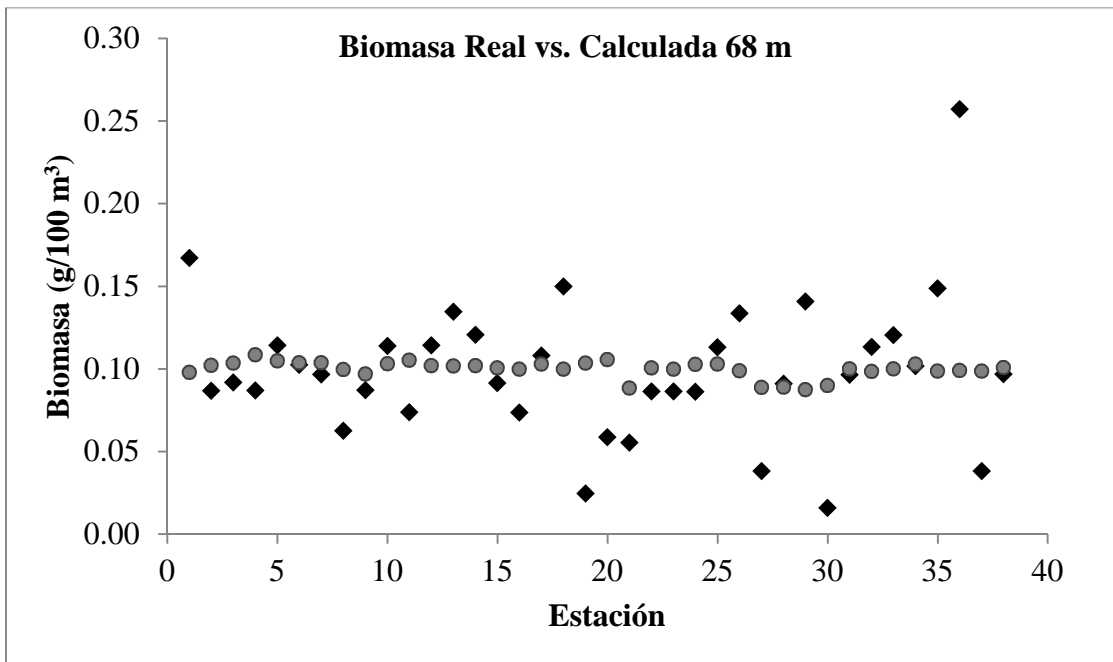


Fig. 47. Comparación de los valores de biomasa calculada y real a 68 m de profundidad.

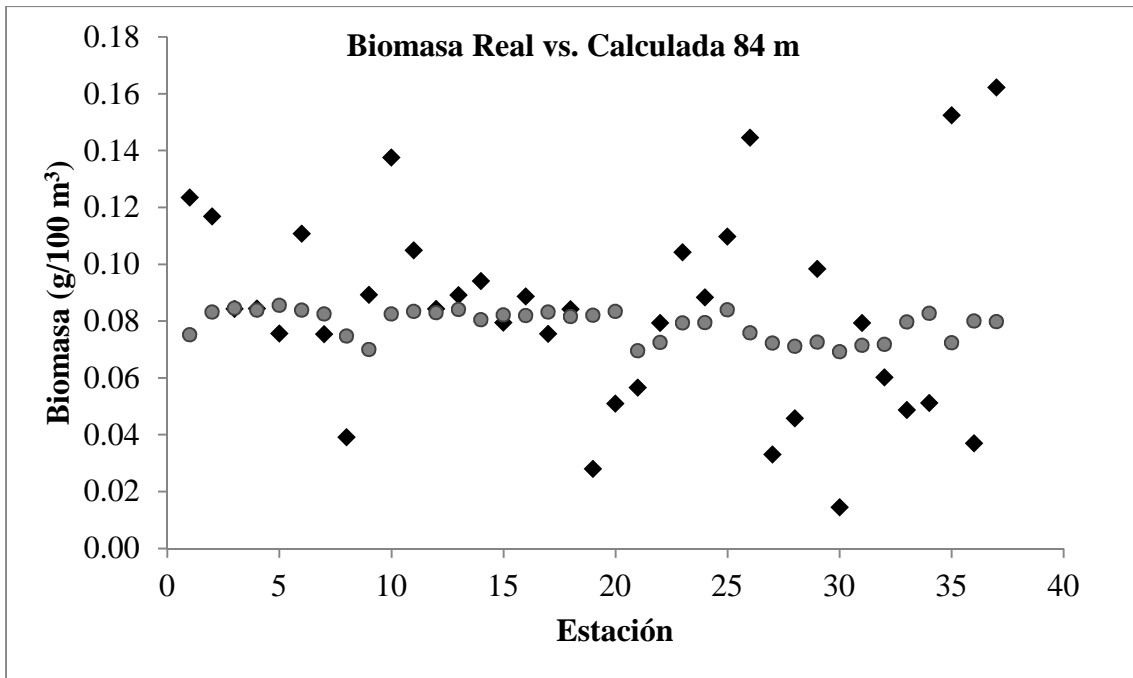


Fig. 48. Comparación de los valores de biomasa calculada y real a 84 m de profundidad.

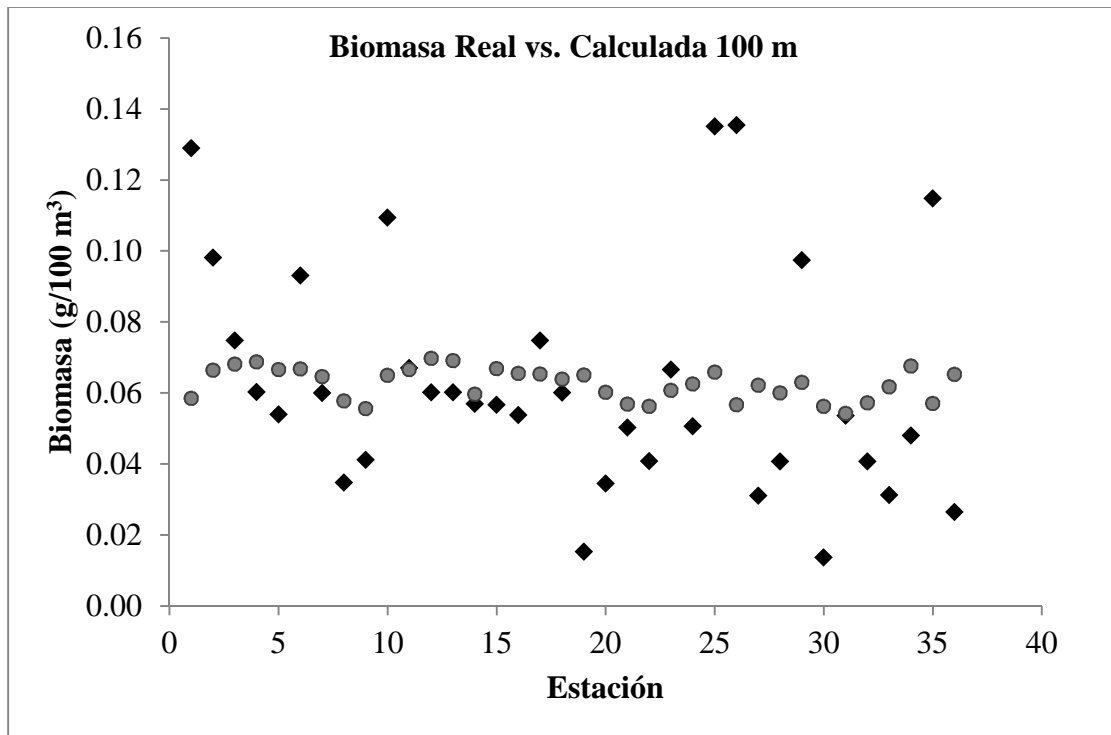


Fig. 49. Comparación de los valores de biomasa calculada y real a 100 m de profundidad.

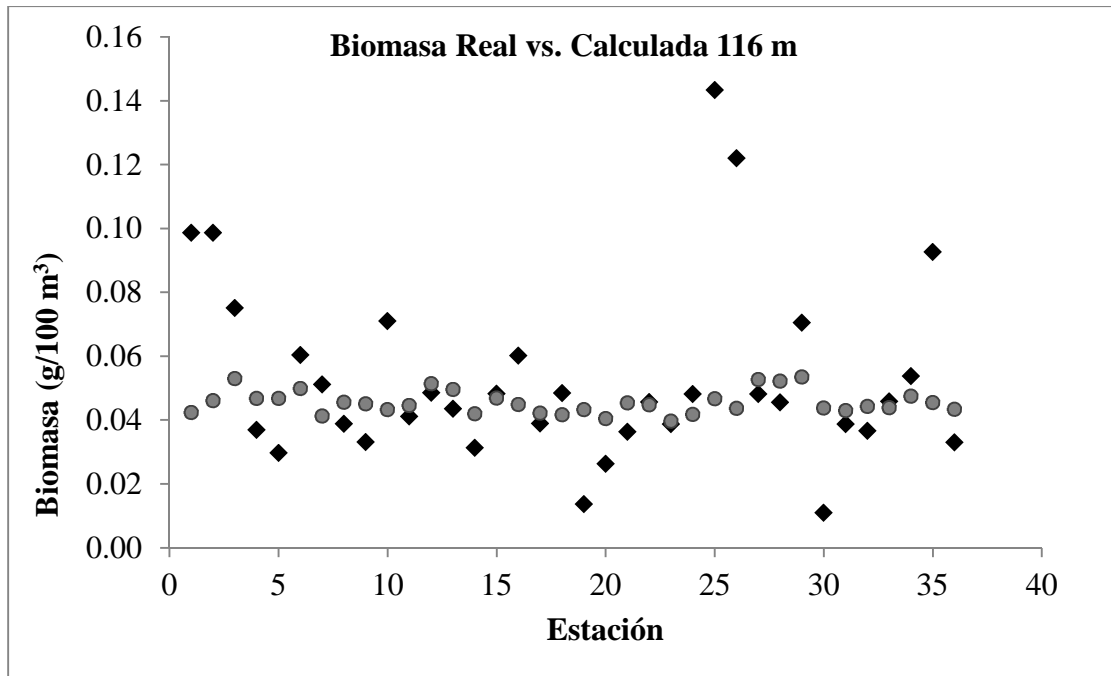


Fig. 50. Comparación de los valores de biomasa calculada y real a 116 m de profundidad.

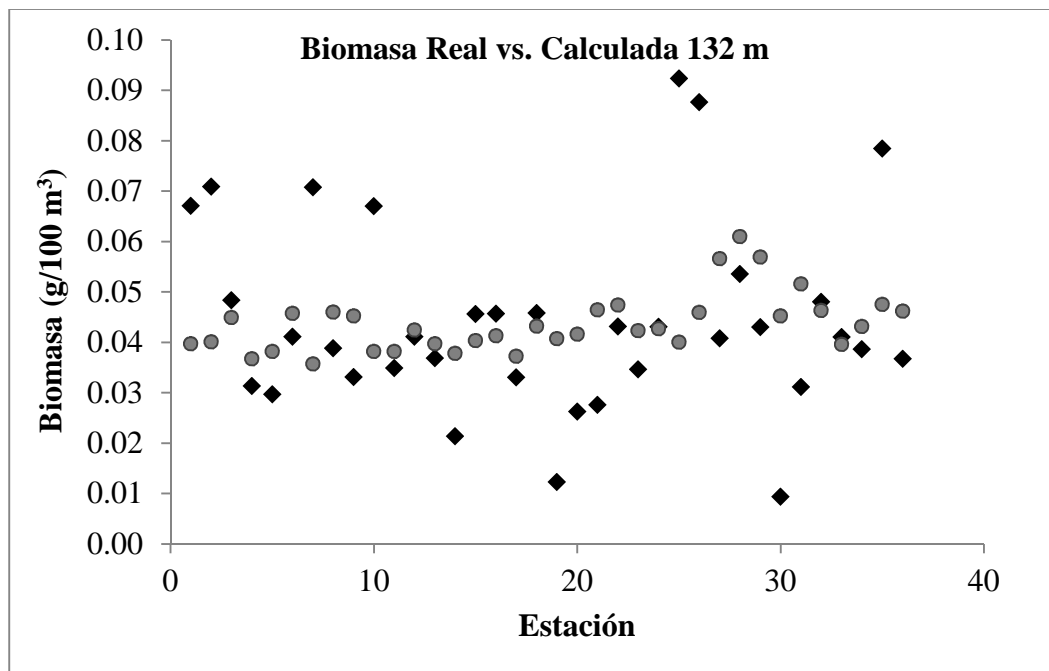


Fig. 51. Comparación de los valores de biomasa calculada y real a 132 m de profundidad.

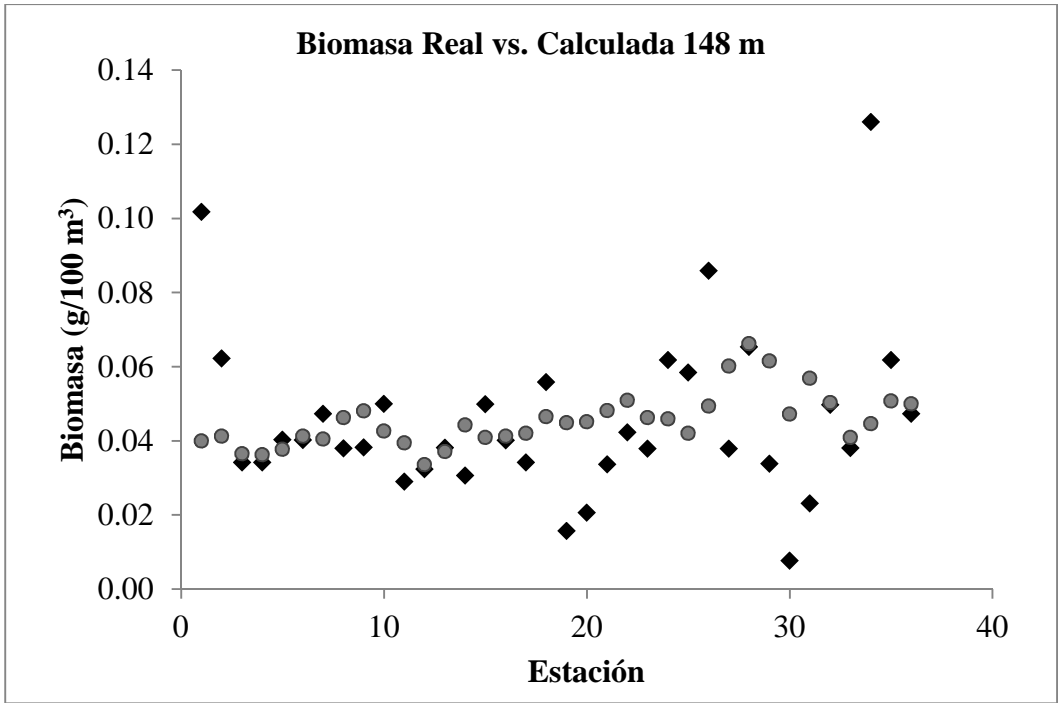


Fig. 52. Comparación de los valores de biomasa calculada y real a 148 m de profundidad.

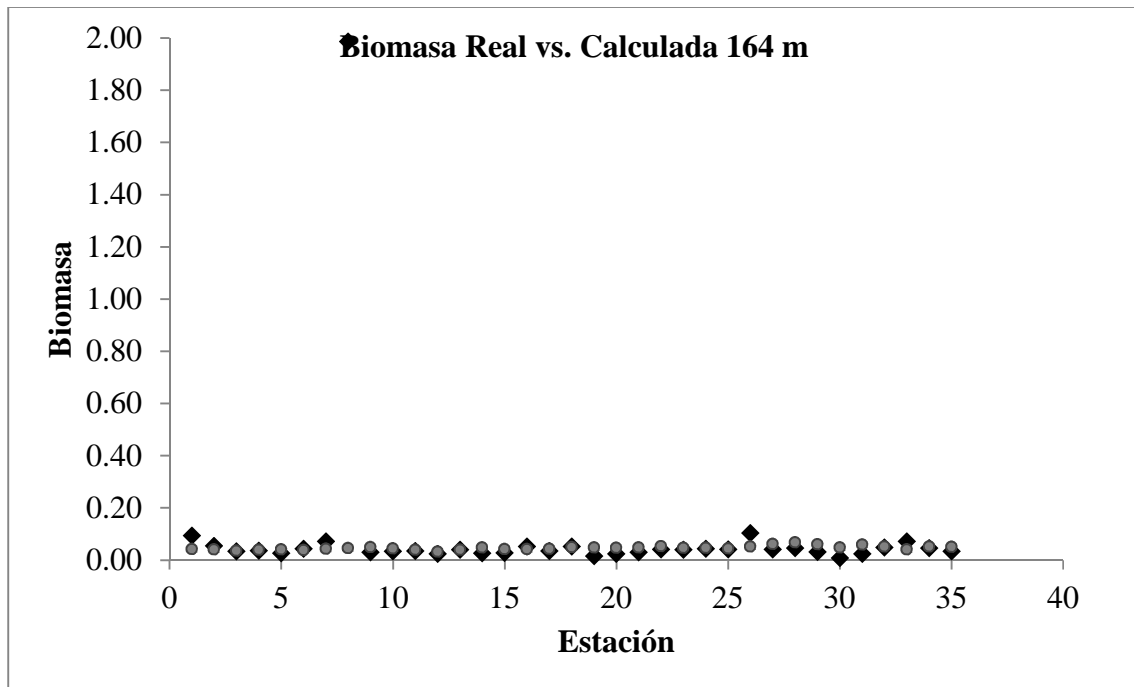


Fig. 53. Comparación de los valores de biomasa calculada y real a 164 m de profundidad.

6. DISCUSION

Los resultados obtenidos en el análisis de regresión simple explicaron los valores de biomasa en un 34.5% con la temperatura, 46.26% respecto a profundidad y solamente 0.047% con la salinidad, siendo la profundidad el parámetro que tiene más influencia en la biomasa. Evans y Pepin (1989) establecen que la cantidad de herbívoros zooplanctónicos puede ser anticipada a través de la profundidad de las capas de mezcla.

Los organismos zooplanctónicos hacen migraciones en la vertical; la profundidad está directamente relacionada con la intensidad lumínica, que es considerada como el principal factor que dispara este proceso, se ha observado que organismos zooplanctónicos grandes responden a cambios en intensidad lumínica migrando a aguas superficiales al atardecer y desplazándose en dirección contraria al amanecer; los cambios en intensidad lumínica afectan la disponibilidad de alimento y la vulnerabilidad a la depredación de muchos animales marinos incluyendo al zooplancton, la distribución de fotótrofos y la evasión de depredadores dirigen la migración vertical de muchas especies (Horne y Goldman, 1994). Organismos grandes se alimentan de zooplancton más pequeño (mesozooplancton) durante su migración vertical. El mesozooplancton, integrado mayormente por herbívoros (ej. copépodos y cladóceros), migra a capas superficiales para pastorear durante las horas de mayor oscuridad, durante el día, estos migran a zonas más profundas. En el microzooplancton, integrado básicamente por rotíferos, protozoarios y etapas larvales pequeñas, la migración vertical es mínima, aunque en este estudio no podemos hablar de especies ya que no fueron consideradas.

Respecto a la temperatura son muchos los autores que asocian la presencia de larvas de peces con este parámetro (Alba- Hurtado, 2001; Denman, 1976; Platt, 1972; Mojica, 2003). Por otro lado, Marín et al (2004), atribuyen el 21% de la variabilidad de la abundancia de zooplancton a la temperatura esto para el golfo de Cariaco en Venezuela. La temperatura es un factor abiótico que regula procesos vitales para los organismos vivos; así como, también afecta las propiedades químicas y físicas de otros factores abióticos en un ecosistema desempeñando un papel fundamental en el funcionamiento de ecosistemas al regular o

afectar otros factores abióticos del ecosistema como son: la solubilidad de nutrientes, solubilidad de gases, el estado físico de nutrientes y propiedades fisico-químicas del medio acuoso como: pH, potencial redox, solubilidad de gases, densidad, el estado físico del sustrato. Todas estas interacciones generan a su vez cambios en el metabolismo, nutrición, razón de crecimiento y, en el tamaño y forma de los organismos que habitan en ambientes acuáticos, afectando a su vez la distribución y diversidad.

Para evaluar la influencia de las variables en conjunto hacia la biomasa, se realizó también un análisis de regresión múltiple que arrojó coeficientes de correlación parcial bajos: 0.11 para la profundidad, 0.19 respecto a la temperatura y 0.06 para la salinidad; explicando en conjunto solamente el 0.08% de los valores de biomasa zooplanctónica. Esto es importante ya que uno de los primeros supuestos del modelo es que debe existir una independencia entre la dependencia de la biomasa con cada una de las variables ambientales, por lo cual el efecto de cada una de las variables sobre la biomasa es independiente de los efectos de otra. Acerca del análisis de correlación múltiple, al evaluar la correspondencia entre cada una de las variables, se observa un alto grado de relación entre la temperatura, la salinidad y la profundidad, inclusive mayor que la que tienen con la biomasa. Esto no significa que exista una dependencia entre las variables ya que, la temperatura se incrementa por la absorción de la radiación solar y disminuye por la conducción de la atmósfera; mientras que la salinidad es incrementada por la evaporación y enfriamiento y reducida por el aporte de agua dulce (Riley y Chester, 1989). La misma relación se encontró en el estudio de redes neurales, con el que se predijo la biomasa en un transecto que atravesaba el Océano Atlántico (Woodd-Walker et al., 2001). Considerando esto, el método inverso era completamente aplicable a los datos de Santamaría, por lo que se procedió con la modelación.

A propósito de la modelación de primer grado que consideró todos los puntos de muestreo, ésta logró describir solamente el 36% de la varianza, además de arrojar valores diferentes a los datos reales con una χ^2 muy por encima de los valores de tabla ($\alpha=0.05$), lo que nos indica que la ecuación resultante del modelo no es capaz de reproducir los valores de biomasa para nuestra área de estudio.

Para la modelación por grupos de similitud se realizó un análisis de conglomerados; el agrupamiento de puntos de muestreo se realizó con base en el índice de disimilitud de Bray y Curtis, el cual es usado ampliamente en el análisis multivariado, ya que refleja las diferencias de las muestras debido a la composición, agrupando los datos de manera efectiva (Miche, 1982), estableciendo 7 grupos principales, siendo la profundidad y no la cercanía a la costa el factor de concentración en los grupos, a pesar de la descarga que se presenta en verano por parte del sistema Grijalva- Usumacinta, esto debido probablemente al rango que presenta la profundidad, que va de los 20 a los 164 m, mientras que la temperatura y la salinidad sólo presentan rangos que van de los 13.15 a 29.70 °C y 35.55 a 36.66 respectivamente.

Ya con los grupos de puntos de muestreo, se aplicó la modelación inversa, la cual describió en general menos del 15% de la varianza, excepto en el grupo 5 donde la varianza explicada de los datos fue de 68%, esto debido a que solamente se trabajó con 17 puntos de muestreo por lo que fue más fácil recrear los valores de biomasa; por lo que en general tampoco se podía reproducir la distribución y abundancia de zooplancton.

En la modelación por profundidad, los datos calculados de biomasa contra los datos reales no presentan diferencia estadística significativa ($\alpha=0.05$), pero sólo logra describir la varianza con un máximo del 25%.

Mientras que en la modelación de primer grado que consideró todos los puntos de muestreo y fue aplicada por profundidad, no se encontró diferencia significativa ni siquiera con un $\alpha=0.01$, esto debido a la relación que existe entre la biomasa y la profundidad; además de que al abarcar todos los puntos de muestreo la ecuación se tornó más robusta, por lo que el error en la predicción fue forzado a permanecer bajo; resultando así, en 10 ecuaciones, una para: 20, 36, 52, 68, 84, 100, 116, 132, 148 y 164 m de profundidad, las cuales al ser aplicadas a los datos de temperatura, salinidad y profundidad, tomados durante la campaña FIBAC I, resultan en valores de biomasa zooplanctónica que no son diferentes estadísticamente a los valores reales, por lo que este modelo puede ser utilizado para reproducir la distribución y abundancia de la biomasa zooplanctónica en la Bahía de

Campeche, para la temporada de la campaña; aunque solo de manera estadística, ya que sólo logra describir como máximo un 35% de los datos reales.

Se realizó también una modelación de segundo grado, trabajando con los grupos del análisis de conglomerados, donde las ecuaciones del modelo arrojaron valores muy superiores (hasta de 10 órdenes de magnitud) a los datos de biomasa reales, por lo que se rechazó la reproducción de datos mediante este modelo.

Finalmente se procedió a la modelación inversa en tercer grado, la cual se trabajó con un grupo más diverso en cuanto a puntos de muestreo y profundidades, debido a que solamente era exploratoria, pues arrojó valores superiores a los reales por hasta 11 órdenes de magnitud y explicó la varianza en un 46%.

Al valorar el modelo, reconstruyendo el 100% de los datos de Santamaría (2007), se puede observar una tendencia lineal de la biomasa calculada a través de la biomasa real, esto porque los coeficientes de cada una de las ecuaciones obtenidos a través de la modelación inversa, fueron promediados lo que lleva los valores al centro.

Para todos los cálculos se trabajó considerando residuales como cero, esto con el fin de forzar al polinomio del modelo a una solución exacta, pero esto equivalía a suponer que la naturaleza no posee incertidumbre, lo que es completamente falso, por lo que finalmente se calcula el residual y se agrega en las ecuaciones del modelo para obtener una biomasa calculada ajustada. Todo esto debido a que los datos que se están manejando no dejan de ser elementos vivos, que no obedecen solamente a factores físicos, sino también a factores biológicos. En la naturaleza se ha observado que la dirección en el movimiento de los parches de plancton, no siempre coincide con la dirección de los flujos en las masas de agua (Wyatt, 1971; 1973) lo que demuestra una actitud dinámica ante la distribución por turbulencia (Nakata e Ishikawa, 1975; Powell et al., 1975; Powell y Okubo, 1994). Lo que indica que los factores biológicos como: la clorofila, la hora del día, nutrientes, radiación solar, latitud y depredación han sido considerados de forma importante para la predicción de biomasa zooplanctónica (Scardi, 1996; Maravelias y Reid, 1997; Koppelman y Weikert,

1992; Calbert y Agustí, 1999; Zhang et al., 1995) y juegan un papel esencial en la presencia de biomasa zooplanctónica (Steele y Henderson, 1981), estos factores no fueron abarcados en este estudio por la falta de datos.

Existen otros dos estudios, en los que se trabajó en la predicción de la distribución y biomasa de zooplancton. El primero fue realizado en el Océano Atlántico, en el que se basaron en un análisis de regresión múltiple usando redes neuronales, las cuales mediante diferencia de cuadrados calcularon los datos faltantes de una red de valores en el transecto que iba de Argentina a Inglaterra, pero solamente logran reproducir con éxito el 50% de los datos (Woodd-Walker et al., 2001). El otro, fue una estimación de la biomasa zooplanctónica global a través de imágenes satelitales del océano, donde a partir de la productividad primaria y de la transferencia de energía, los valores son calculados, sin presentar diferencias estadísticas importantes, pero solamente para capas superficiales (Patrik et al., 2009), mientras que nuestro modelo no tuvo limitaciones en cuanto a la profundidad por el método de obtención de los datos.

7. CONCLUSIONES

Al analizar la relación de las variables la temperatura, seguida por la profundidad y la salinidad, se comprueban los supuestos necesarios para aplicar el modelo inverso.

Se desarrollaron 4 modelos de primer grado: el primero considerando todos los puntos de muestreo, el segundo utilizando los grupos obtenidos mediante el análisis de conglomerados, el tercero aplicando el modelo por profundidad de los puntos de muestreo y finalmente uno utilizando la ecuación resultante de la modelación completa (primer modelo) pero aplicándola en la profundidad de los puntos de muestreo. También, se desarrolló un modelo de segundo grado y uno de tercero, los cuales arrojaron valores de biomasa calculados muy diferentes a los reales.

El modelo de primer grado, que consideró todos los puntos de muestreo y se trabajó por profundidad, dio como resultado 10 ecuaciones, una para cada una de las profundidades que al ser aplicadas, arrojaron valores sin diferencias significativas estadísticamente entre los valores reales y los calculados, esto por la influencia que tiene la profundidad en la biomasa y a lo robusto de la ecuación, por lo que es con este modelo que se puede reproducir la distribución y abundancia de biomasa zooplanctónica de la Bahía de Campeche, durante la campaña FIBAC I.

Al comparar el modelo con otros que también calcularon los valores de biomasa zooplanctónica, en otros lugares, mediante otros métodos, este resulta ser más efectivo, al menos localmente; por la igualdad estadística que se obtuvo al comparar los valores calculados contra los datos reales.

Los modelos matemáticos pueden ser una buena herramienta, para el entendimiento de procesos biológicos. Este estudio es una primera aproximación a la modelación de biomasa zooplanctónica a través de factores físicos mediante la modelación inversa.

Muchas de las metas en la investigación biológica pueden ser complementadas por modelos físicos y matemáticos; ya que estos presentan numerosas ventajas, construyendo un modelo físico que pueda describir rápidamente el desarrollo complejo de un sistema, dándole un manejo que pueda mejorar nuestro entendimiento intuitivo de procesos biológicos y proveer de mecanismos de comprensión. Así, se puede tener un aproximación a procesos que de otra manera no se tendría, con solamente los organismos vivos. Por esta razón, los modelos físico-matemáticos pueden ser herramientas efectivas para los biólogos, que pueden usarlos a través del entrenamiento computacional necesario para desarrollar los modelos matemáticos.

9. REFERENCIAS

- Abraham, E.R. 1998. The generation of plankton patchiness by turbulent stirring. *Nature*. 391, 577-580.
- Aguilar-Ramírez, D. 1998. *Eficiencia en captura de camarón con Dispositivos Excluidores de Tortugas Marinas operados en redes de arrastre de la Flota Comercial Camaronera del Golfo de México durante febrero de 1992 a julio de 1993*. Tesis de Maestría en Ciencias, Facultad de Ciencias, UNAM, 59 p., México D.F.
- Alatorre-Mendieta, M.A., F., Ruiz, D.A., Salas de León. 1988. *Efectos del paso de frentes fríos atmosféricos sobre la Bahía de Campeche*. Memorias de la Reunión Anual, 1987. Unión Geofísica Mexicana A. C., 1986 – 1993 pp.
- Alba-Hurtado, C.A. 2001. *Composición, Abundancia y Distribución de Sifonóforos (Cnidaria, Hydrozoa), en la Bahía de Campeche, México*. Tesis de Licenciatura en Biología, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM, 51 p, México D.F.
- Aldeco, M. y J., Hernández. 1988. *Características térmicas superficiales en el Golfo de México durante 1988*. Est. de Invest. Oceanogr. Veracruz, Secretaría de Marina. México.
- Aoki, I. y T., Komatsu. 1997. Analysis and prediction of the fluctuation of sardine abundance using a neural network. *Oceanologica Acta*, 20, 81-88.
- Aoki, I.; T., Komatsu; K., Hwang.1999. Prediction of response of zooplankton biomass to climatic and oceanic changes. *Ecological Modelling.*, 120, 261- 270.

- Arroyo-Reyes, R.I. 2001. *Distribución y abundancia de las principales especies de camarones peneidos en la sonda de Campeche*. Tesis de licenciatura en Biología, Escuela Nacional de Estudios Profesionales de Iztacala, UNAM, 63 p, México D.F.
- Ashjian, C., R., Arnone, C., Davis, B., Jones, M. Kahru, C. Lee, and B. G. Mitchell. 2006. Biological structure and seasonality in the Japan/East Sea. *The Oceanography Journal*, Vol. 19, N3, 126-137.
- Backus, G. 1970. Inference from inadequate and inaccurate data I, II, III. Proc. Of the National Academy of Sciences. U.S.A. (65):1-7; (67):283-287.
- Bagenal, T. 1978. *Methods for assessments of fish production in fresh waters*. 3rd. Edition. IBP Handbook No.3. Blackwell Scientific Publications Ltd. Oxford.
- Bratkovich, A., 1988. *The use of planktonic organism distribution as an indicator of physical variability in marine environments*. pp. 13–34 in Soule, D. F. and G. S. Kleppel (eds), *Marine Organisms as Indicators*. Springer-Verlag, New York, N.Y. 342 pp.
- Burd, B.J., y R.E., Thomson. 1993. Flow volume calculations based on three-dimensional current and net orientation data. *Deep-Sea Res.*40, 1141-1153.
- Cachero Mendoza J., 1990. *Variación estacional de los nutrientes limitantes en el sureste del Golfo de México (1985-86)*. Sría. de Marina, Dirección General de Oceanografía Naval. Est. Camp., 69 p.
- Calbert, A. y S., Agusti. 1999. Latitudinal changes of copepod egg production rates in Atlantic waters: temperatura and food availability as the main driving factors. *Marine Ecology Progress Series* 181, 155-162.

- Conde-Porcuna, J.M., E., Ramos-Rodríguez, R., Morales-Baquero. 2004. El zooplancton como integrante de la estructura trófica de los ecosistemas lénticos. *Ecosistemas*. 13(2), 23-29.
- Cushing, D.H. 1972. The production cycle and the numbers of marine fish. *Symposia of the Zoological Society of London* 29, 213-232.
- Cushing, D.H. 1975. *Marine Ecology and Fisheries*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Cushing, D.H. 1996. *Towards a science of recruitment in fish populations*. Ecology Institute, Oldendorf/Luhe.
- Czitrom-Gauss, S.; F., Ruíz; M.A., Alatorre y A.R., Padilla. 1986. Preliminary study of a front in the bay of Campeche, Mexico. En: J.C.J. Nihoul (ed.), *Marine interfaces ecohydrodynamics*. pp 301-311. *Elsevier Oceanographic Series*. Liege.
- DeAngelis, D.L: 1992. *Dynamic of Nutrient Cycling and Food Webs*. Champman and Hall, London.
- De la Lanza-Espino, G. 2001. Características físicas y químicas de los mares de México. Instituto de Geografía. *Universidad Nacional Autonoma de México y Plaza-Valdez*. Mexico, D.F. 149 pp.
- Denman, K.L. 1976. Covariability of chlorophyll and temperature in the sea. *Deep Sea Research*. 23, 539-550.
- Díaz Flores, M.A. 2004. *Estudio de las corrientes en la Bahía de Campeche utilizando un perfilador Acústico Doppler (ADCP)*. Tesis de Maestría en Ciencias, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, 67 p, México D.F.

- Dubois, D. 1975. A model of patchiness for prey-predator plankton populations. *Ecological Modelling*. 1, 67-80.
- Edmondson, E. y G.G., Winberg. 1971. *A manual of methods for the assessment of secondary productivity in fresh waters*. Blackwell Scientific Publications Ltd. Oxford.
- Emery, W.J. y R.E., Thomson. 1997. *Data Analysis Methods in Physical Oceanography: 2nd Edition Revised*. Elsevier Science. Amsterdam, 638p.
- Espinosa-Fuentes, M. L. 2004. *Dinámica Espacio-Temporal de las comunidades ictioplanctónicas durante diferentes épocas climáticas en el sur del Golfo de México*. Tesis de Doctorado en Ciencias del Mar, Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, 112 p, México D. F.
- Evans, G.T. y S., Parslow. 1985. A model of annual plankton cycles. *Biological Oceanography*. 3, 327-347.
- Evans, G. T. y Peppin, P. 1989. Potential for predicting plankton populations (and fish recruitment) from environmental data. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 46 (5), 898-903.
- Fasham, M.J.R. 1984. *Flows of energy and materials in marine ecosystems*. Plenum publishing Corporation, New York.
- Flagg, C., C., Wirick, S., Smith. 1994. The interaction of phytoplankton, zooplankton and currents from 15 months of continuous data in the Mid- Atlantic Bight. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 41 (213), 411-435.

- Fleming, R.H. 1939. *The control of diatom populations by grazing*. J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer. 14, 210-227.
- Flores-Coto, C. 1988. *Composición, distribución y abundancia ictioplanctónica del Sur del Golfo de México*. Universidad y Ciencia. 5(9), 65-84.
- Flores-Coto y Gracia-Gasca, A. 1993. *Monitoreo de las fases de pre-reclutamiento de especies estuarino-dependientes de importancia comercial frente a la laguna de Términos*. Informe del proyecto IN-202092 para la DGAPA, ICMYL, UNAM. México. 114 pp.
- Flores-Coto, C; M.L., Espinoza- Fuentes; F., Zavala-Gasca y L., Sanvicente-Añorve. 2009. Ictioplancton del Sur de México. Un compendio. *Hidrobiologica*. 19(1):49-76.
- Fofonov, N.P. y R.C., Millard. 1983. *Algorithms for computation of fundamental properties of seawater*. UNESCO Technical papers in Marine Science, 44, 55 pp.
- Forward, R.B. 1988. Diel and vertical migration: zooplankton photobiology and behavior. *Oceanography and Marine Biology*. 26:361-393.
- Franks, P.J.S. 1997. Spatial patterns in dense algae blooms. *Limnology and Oceanography*. 42: 1297-1305.
- Frost, B.W. 1993. A modeling study of process regulating plankton standing stock and production in the open subarctic Pacific Ocean. *Progress in. Oceanography*. 32: 17-56.
- Frost, B.W. y Frazen, N.C. 1992. Grazin and iron limitation in the control of phytoplankton stock and nutrient concentration: a chemostat analogue of the

Pacific equatorial upwelling zone. *Marine Ecology Progress Series*. 83: 291-303.

Gallager, S.M., C. S., Davis, A. W., Epstein, A., Solow, R. C., Beardsley. 1996. High resolution observations of plankton spatial distributions correlated with hydrography in the Great South Chanel, George Bank. *Deep Sea Research*. II 43 (7): 1627- 1663.

García Salgado, M.A. 2001. *Relación entre la producción de camarón, la descarga de los ríos y la precipitación pluvial, en el Golfo de México*. Tesis de Maestría en Ciencias, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM. 77pp. México, D.F.

Gazca y Suarez, R.E. 1991. *Sifonóforos de México. Biología y Ecología*. Ferrandiz, México. 170 pp.

Gío-Argáez F. R., M.L., Machain C. y A., Gaytán C. 2002. Los ostrácodos de la Zona económica exclusiva de México. Parte I. La Bahía de Campeche. JAINA en línea. Ene-Jun. Vol.13 (1)

Gómez-Ponce, M.A. y A., Gracia. 2003. Distribution and abundance of larvae and adults of *Solenocera* (Decapoda, Solenoceridae) in the Southwestern Gulf of Mexico. *Crustaceana* 76(6): 681-698.

Gulland, J.A. 1977. *Fish populations dynamics*. Wiley, London.

Haken, H. 1977. *Synergetics. An introduction*. Springer Series in Synergetics. Vol. 1. Springer- Verlag, Berlin.

Haney, J.F. 1993. *Environmental control of diel vertical migrarion behavior*. *Ergebnisse der Limnologie*. 39, 1-7.

- Hardy, A.C. 1936. Observation in the uneven distribution of oceanic plankton. *Discovery Rep.* 11,511-538. En Laurent, S.; Y., Lagadeuc. Multiscale patchiness of the calanoid copepod *Temora longicornis* in a turbulent coastal sea. *Journal of Plankton Research.* 23 (10), 1137-1145.
- Harris, R.P., P.H, Wiebe, J., Lens, H.R., Skojdal, M., Huntley. 2000. *Zooplankton methodology manual*. Elsevier Academic Press. San Diego, California, USA. 684 pp.
- Holme, N.A y A.D., McIntyre. 1971. *Methods for the study of the marine benthos*. Blackwell Scientific Publications. Oxford.
- Horne, A.J. y C.R., Goldman. *Limnology Second Edition*. McGraw Hill, Inc.. New York, 1994.
- Horwood, J. W. 2000. Population biology and ecology of the sole. *Natural Resource Modeling.* 14 (2), 233-256.
- Huntley, M. y E. R. Brooks. 1982. Effects of age and food availability on diel vertical migrations of *Calanus pacificus*. *Marine Biology.* 71, 23-31.
- Hutchinson, B.P. 1967. *A Treatise on Limnology. Vol. II. Introduction to Lake Biology and the Limnoplankton*. John Wiley y Sons, New York, Estados Unidos.
- Jorgensen, S.E. 1994. *Fundamentals of Ecological Modelling*. Elsevier, Amsterdam.
- Koehl, M.A.R. 2009. Physical modeling in biomechanics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences.* 2003(358), 1589-1596.

- Koppelman, R. y H., Weikert. 1992. Full- depth zooplankton profiles over the deep bathyal of the NE Atlantic. *Marine Ecology Progress Series*, 86, 263-272.
- Lalli, C. y T. Parsons. 1993. *Biological oceanography an introduction*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 314 pp.
- Laurent, S. y Y., Lagadeuc. Multiscale patchiness of the calanoid copepod *Temora longicornis* in a turbulent coastal sea. *Journal of Plankton Research*. 23 (10), 1137-1145.
- Lenz, J. 2000. *Introduction*. En: Harris, R.P.; Wiebe, P.H; Lens, J.; Skjoldal, H.R.; Huntley, M. 2000. *Zooplankton methodology manual*. Elsevier Academic Press. San Diego, California, USA. 684 pp.
- Levin, S.A y L.A., Segel. 1975. Hypothesis of origin of planktonic patchiness. *Nature*. 259- 659.
- Longhurst, A.R. y W.G., Harrison. 1988. Vertical nitrogen flux from the oceanic euphotic zone by diel migrant zooplankton and nekton. *Deep-Sea Research*, 35, 881-889.
- Longhurst, A.R.; A.W , Bedo; W.G., Harrison; E.J, Head; D.D., Sameoto. 1990. Vertical flux of respiratory carbon by oceanic diel migration biota. *Deep-Sea Research*, 37, 685-694.
- López-Padierna, M. 2007. *Distribución de tursiones *Tursiops truncatus* en la Laguna de Terminos, Campeche, México*. Tesis de Licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias. UNAM. 106 pp.

- Machín- Jimenéz, F.J. 2003. *Variabilidad espacio temporal de la corriente de canaria, del afloramiento costero al noroeste de África y de los intercambios atmósfera océano de calor y agua dulce*. Tesis doctoral. Universidad de la Palma Gran Canaria. Departamento de Física. Las palmas de Gran Canaria.
- Maestre, F y Fernández-Cora, E. 2009. Identificación de tumores y problemas inversos. *XI congreso de Matematica Aplicada*. 1-7
- Malchow, H., Petrovskii, S., Medvinsky, A. 2001. Pattern formation in models of plankton dynamics. A synthesis. *Oceanological Acta*. 24 (5), 479- 487.
- Marevelias, C.D; D.G., Reid. 1997. Identifying the effects of oceanographic features and zooplankton on prespawning herring abundance using generalized additive models. *Marine Ecology Progress Series*. 147, 1-9.
- Marín, B., C., Lodeiros, D., Figueroa, B., Márquez. 2004. Distribución vertical y abundancia estacional del microzooplankton y su relación con los factores ambientales en turpalito, golfo de Cariaco, Venezuela. *Revista Científica*. (14) 2.
- Martinez- Gutiérrez, M. R. 2001. *Variación de la Distribución y Abundancia de las Larvas de las Familias Serranidae, Lutjanidae y Scombridae (Pisces), con Aspectos Ecológicos de Algunas Especies. Sur del Golfo de México*. Tesis de Maestría en Ciencias. Facultad de Ciencias. UNAM. 138 p. México, D.F.
- Mc Gowan, J.W. 1967. Lowest 1S and 3P Scattering Resonances in the e-H System. *Physical Review*. 156, 165- 172
- Menke, W. 1989. *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*, Academic Press, San Diego.

- Merino Ibarra, M. 1992. *Afloramiento en la Plataforma de Yucatán: estructura y fertilización*. Tesis de doctorado. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, México
- Merrell, W.J. Jr. y J.M. Morrison. 1981. On the circulation of the Gulf of Mexico with observations from april 1978. *Journal of Geophysical Research*, 86(C5), 4181-4185.
- Miche, M.G. 1992. Use of Bray- Curtis similarity measure in cluster analysis of Foramineferal data. *Mathematical Geology*. 14 (6)
- Mimura, M y J.D., Murray. 1978. On a diffusive prey-predator model wich exhibits patchiness. *Journal of Theoretical Biology* 75, 249-262.
- Mojica-Ramírez E. 2003. *Variabilidad de la biomasa zooplanctónica en la región del Cañón de Campeche durante la campaña PROMEBIO-I (5 al 21 de agosto 1999)*. Tesis de Licenciatura Biología, Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias, 50 pp.
- Molinari, R. L., J. F., Festa y D. W., Behringer. 1978. The circulation of the Gulf o Mexico derived from estimated Dynamic *High Fields*. *Journal of Physical Oceanography*.. 8: 987-996.
- Monreal Gómez, M. A. y Salas de León, D. A. 1990. Simulación de la circulación de la Bahía de Campeche. *Geofísica Internacional*. 29(2): 101-111
- Monreal-Gómez, M.A., D.A., Salas-de León, A.R., Padilla-Pilotze, M.A. Alatorre-Mendieta. 1992. Hydrography and estimation of density currents in the southern part of the Bay of Campeche, Mexico. *Ciencias Marinas*. 18(4): 115–133

- Monreal Gómez, M.A. y D.A., Salas de León. 1997. Circulación y estructura termohalina del Golfo de México. Contribuciones a la oceanografía física en México. *Unión Geofísica Mexicana* (3) 183-199 pp.
- Monreal-Gómez, M.A., D.A., Salas de León, H., Velasco-Mendoza. 2004. *La hidrodinámica del Golfo de México*. En: Caso et al. (Eds). *Diagnóstico ambiental del Golfo de México*. Instituto Nacional de Ecología. pp. 47-68.
- Montaño Juárez, K. 2005. *Distribución y abundancia de larvas de camarón Sicyonia spp., en el Sur de la Bahía de Campeche*. Tesis de Maestría en Ciencias. Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología. 66p. México, D.F.
- Morales, C.E. 1999. Carbon and nitrogen fluxes in the oceans: the contribution by zooplankton migrants to active transport in the North Atlantic during the joint global ocean flux study. *Journal of Plankton Research*. 21, 1799-1808.
- Nakata, K. y R., Ishikawa. 1975. Fluctuation of focal phytoplankton abundance in costal waters. *Japanese Journal of Ecology*. 25, 201-205.
- Nowlin, W.D. Jr., 1972. *Winter circulation patterns and property distributions*. In: *Contributions on the Physical Oceanography of the Gulf of Mexico*. L. R. A. Capurro y J. L. Reid, Eds. Gulf Pub. Co., Houston, 3-15 pp.
- Ohman, M.D. y P.E., Smith. 1995. *A comparison of zooplankton sampling methods in the CalCOFI time series*. Rep. 36, 153-158.
- Omori, M. y T. Ikeda. 1992. *Methods in Marine Zooplankton Ecology*. Krieger Publ. Florida. 332 pp.
- Padilla Pilotze, A.R.; M.A. Alatorre; F. Ruíz y S.P.R. Czitrom. 1986. *Observaciones recientes de la estructura termohalina en el sur del Golfo de México*. 434-440.

In. J. Urrutia-Fucugauchi (Ed.) Memoria de la Reunión anual 1986. Unión Geofísica Mexicana. 499pp.

Parker, R.L. 1977. Understanding inverse theory. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 35-64.

Patrick, K.H.; T.J., Smyth; J.I. Allen; S., Pitois; T.D., O'Brien. 2009. *Estimation of global zooplankton biomass from satellite ocean color*. *J. Mar. Syst.* 78, 18-27.

Pascual, M. 1993. Diffusion-induced chaos in a spatial predator-prey system. *Proceedings of Royal Society. London*. B251,1-7.

Peschiera, M. 2002. *Determinación del estado tensional de macizos rocosos a partir de medidas de presión del agua durante la excavación de tuneles*. Tesina final de carrera. ETSECCPB-UPC y Politecnico de Milano.

Petrovskii, S.V; Malchow, H. 1999. A minimal model of pattern formation in a prey-predator system. *Mathematical and Computer Modelling*. 29, 49-63.

Petrovskii, S.V; Malchow, H. 2001. Wave of chaos; new mechanism of pattern formation in spatiotemporal population dynamics. *Theoretical Population Biology*. 59, 157-174.

Platt, T. 1972. Local phytoplankton abundance and turbulence. *Deep Sea Research*. 19, 183-187.

Prestige, M.C.: R.P., Harris; A.H., Tailor. 1995. A modelling investigation of copepod egg production in the Irish Sea. *ICES Journal of Marine Science*. 52: 693-703.

- Popova, E.E., M.J.R., Fasham, A.V., Osipov, V.A., Ryabehenko. 1997. Chaotic behavior of an ocean ecosystem model under seasonal forcing. *Journal of Plankton Research*. 19,1495-1515.
- Powell, E. N. 1989. Oxygen, sulfide and diffusion: why thiobiotic meiofauna must be sulfide-insensitive first-order respirers. *Journal of Marine Research*. 47, 887–932.
- Powell, T.M.; A., Okubo. 1994. Turbulence, diffusion and patchiness in the sea. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* B343, 11-18.
- Powell, T.M.; P.J., Richerson; T.M., Dillon; B.A.; Agee; B.J., Dozier; D.A., Godden; L.O., Myrup. 1975. Spatial scales of current speed and phytoplankton biomass fluctuations in Lake Tahoe. *Science*. 189, 1088-1090.
- Raymont, J.E.G. 1980. *Plankton and productivity in the oceans*. Pergamon Press, Oxford.
- Raymont, J. E. G., 1983. *Plankton and productivity in the oceans*. Vol. I. Phytoplankton. Pergamon Press, Oxford, 800 p.
- RD Instruments. 1992. *Calculating Absolute Backscatter. Self Contained Acoustic Doppler Current Profiler*. Technical Manual. USA.
- Richards,S.A; H.P., Possingham; J., Noye. 1996. Diel vertical migration: modeling light mediated mechanisms. *Journal of Plankton Research*. 18, 2199-2222.
- Riley, J.P. y R. Chester. 1989. *Introducción a la química marina*. AGT Editor, S.A., de México.

- Ringelber, J. 1964. The positively phototactic reaction on *Daphnia magna* Straus, a contribution to the understanding of diurnal vertical migration. *Netherlands Journal of Sea Research*. 2, 319- 406.
- Ringelber, J. 1993. Phototaxis as a behavioural component of diel vertical migration in a pelagic *Daphnia*. *Ergebnisse der Limnologie*. 39, 45-55.
- Rosales Navarro, I.S. 2003. *Circulación geostrófica en el sur del Golfo de México*. Tesis de Licenciatura en Ing. Geofísico, Fac. Ingeniería, UNAM, 87 p, Mexico D.F.
- Ryabhenko, V.A.; M.J.R., Fasham; B.A., Kagan; E.E., Popova. 1997. What causes short term oscillations in ecosystem models of the ocean mixed layer? *Journal of Marine Systems*. 13, 33-50.
- Ruiz Renteria, F. y M., Merino-Ibarra. 1989. *Upwelling of the north coast of the Yucatán Peninsula*. En: Chavez, E.A. (Ed.) *Proceedings of the workshop Mexico-Australia on Marine Science*. CINVESTAV_IPN. México, pp. 149-160.
- Russell, F.S. 1927. The vertical distribution of plankton in the sea. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*. 2, 213-262.
- Salas de León, D.A.; M.A., Monreal-Gómez, C., Flores-Coto; L.E., Sanvicente-Añorve. 1998. Influence de la circulation à long terme sur a repartition des organismes zooplanctoniques dans la Baie de Campeche, Mexique. *Oceanologica Acta*. 21 (1), 87-93.
- Salas de León, D.A., M.A., Monreal-Gómez, J. Galarza-Macías. 2005. Estimación de la biomasa zooplanctónica en zonas costeras usando un perfilador acústico de alta frecuencia. *Ciencia y Mar*. IX (26), 9 - 18.

- Sánchez-Velasco, L; S.P.A., Jiménez- Rosenberg; B., Shirasago; M., Obeso-Nieblas. 2004. Distribution and abundance of fish larvae in Bahía de la Paz (Gulf of California) and their relation to hydrographic variability during summer (1997-1998). *Deep-Sea Research Part II: Tropical Studies in Oceanography. Oceanography of the Eastern Pacific: Volumen III.* 51(6-9),723-737.
- Sanvicente-Añorve, L. E., 1990. *Comunidades ictioplanctónicas en el sureste del Golfo de México.* Tesis de Maestría en Ciencias. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, 58 p.
- Sanvicente Añorve, L. (1998) Spatial and seasonal patterns of larval fish assemblages in the southern Gulf of Mexico. *Bulletin Marine Sciences* 62 (1), 17-30.
- Santamaría, F.J. 2007. *Determinación de la biomasa zooplanctónica mediante ADCP en la Bahía de Campeche, México, en verano de 1996.* Tesis de Maestría en Ciencias. Posgrado en Ciencias del Mar. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. UNAM. 146 pp.
- Sauvy, A. 1969. *General theory of populations.* Basic Books, Inc. Publishers, New York, N.Y.
- Scardi, M. 1996. Artificial neural networks as empirical models of estimating phytoplankton production. *Marine Ecology Progress Series.* 139, 289-299.
- Scheffer, M., S., Rinaldi; Y.A., Kuznetsov, E.H., van Nes. 1997. *Seasonal dynamics of Daphnia and algae explained as a periodically forced predator. Prey system.* *Oikos* 80: 519-532.
- Segel, L.A. y J.L., Jackson. 1972. Dissipative structure: an explanation and an ecological example. *Journal of Theoretical Biology.* 37:545-559.

- Seuront, L. y Lagadeuc, Y. 2001. Multiscale patchiness of the calanoid copepod *Temora longicornis* in a turbulent coastal sea. *Journal of Plankton Research*, 23, 1137-1145.
- Sommer, U. 1994. *Planktologie*. Springer- Verlag, Berlin.
- Steele, J.H. 1977. *Fisheries mathematics*. Academic Press, London.
- Steele, J.H.; E.W., Henderson. 1981. A simple plankton model. *The American Naturalist*. 117, 676-691.
- Steffen, E; H., Malchow; A.B., Medvinsky. 1997. Effects of seasonal perturbations on a model plankton community. *Environmental Modeling & Assessment*. 2, 43-48.
- Sverdrup, H.U., M.W., Johnson, R.H., Fleming. 1970. *The Oceans*. Prentice-Hall, Inc. United States of America. 1087 p.
- UNESCO. 1979. *Zooplankton Sampling*. Monographs on Oceanographic Methodology 2. UNESCO. France, 174 pp.
- UNESCO. 1981. *Tenth report of the joint panel on oceanographic tables and standards*. UNESCO Technical Papers in Marine Science 36 pp.
- Tarantola, A. 2005. *Inverse Problem Theory and Model Parameter Estimation*. SIAM. 392pp.
- Thomson, R.E., y S.E., Allen. 2000. Time series acoustic observations of macrozooplankton diel migration and associated pelagic fish abundance. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 57, 1919–1931.

- Truscott, J.E. 1995. Environmental forcing of simple plankton models. *Journal of Plankton Research*. 17, 2207-2232.
- Verita, P.G. y Smetaeck. 1996. *Bay of Campeche Cyclone*. Tesis de Doctorado. Texas A&M University. 91p.
- Villalobos, A. y M.E. Zamora, 1975. *Importancia biológica de la Bahía de Campeche*. Mem. I Simp. Lat. Ocean. Biol. (México) ,375-382.
- Villanueva Estrada, R.E. 2000. *Evaluación de Metales Pesados en el area de las Plataformas Petroleras de la Bahía de Campeche*. Tesis de Maestría en Ciencias del Mar. Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología. UNAM. 134 pp. México, D.F.
- Vinogradov, M.E., V.V., Menshutkin. 1977. *The modeling of open-sea ecosystem*. En: Goldberg, E.D. 1978. *The sea: Ideas and observations on progress in the study of the seas*. 6, 891-921. Wiley, Berlin.
- Yoder, J.A., S.G., Ackleson, R.T., Barber, P., Flament, W.M., Balch. 1994. A line in the sea. *Nature*. 371, 689-692.
- Yodzis, P. 1994. *The trophodynamics of whole ecological communities*. En: Levin, S. 1996. *Frontiers in Mathematical Biology. Lecture Notes in biomathematics*. 100: 443-453. Springer-Verlag, Berlin.
- Wicstead, J.H. 1979. *Zooplankton marino*. Omega. Madrid, España. 70 pp.
- Wiebe, P.H., K.H., Burt, S.H., Boyd, A.W., Morton. 1976. A multiple opening/closing net and environmental sensing system for sampling zooplankton. *Journal of Marine Research*, 34, 313-326.

- Wood-Walker, R.S.; K.S.,Kingston; C.P., Gallienne. 2001. Using neural networks to predict surface zooplankton biomass along a 50° N to 50° S transect of the Atlantic. *Journal of Plankton Research*.(23) 8, 875-888.
- Wyatt, T.1971. *Production dynamics of Oikopleura dioica in the Southern North Sea, and the role of fish larvae wick prey on them*. *Thalassia Jugosl*. 7, 435-444-
- Wyatt, T. 1973. The biology of Oikopleura dioica and Fritillaria borealis in the Southern Bigth. *Marine Biology*. 22, 137-158.
- Zhang, X., H.G., Dam, J.R., White, M.R., Roman. 1995. Latitudinal variations in mesozooplankton grazing and metabolism in the central tropic Pacific during the U.S. JGOFS EqPac study. *Deep Sea Research*. 2(42), 695-714.