

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

Programa de Estudios de Posgrado

Patrones de reclutamiento y deriva larvaria de la almeja catarina *Argopecten ventricosus*
en el complejo lagunar de Bahía Magdalena-Almejas, B.C.S. México.

Tesis

Que para obtener el Grado de

Doctor en Ciencias

en el Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales

(con Orientación en Pesquerías)

Presenta

María Verónica Morales Zárate

La Paz, B.C.S., México, septiembre de 2006

Comité tutorial y revisor de Tesis

Dr. Salvador Emilio LLuch Cota
Director de Tesis
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste
La Paz, B.C.S., México

Dr. Francisco E. Werner
Co-Tutor
University of North Carolina at Chapel Hill
Carolina del Norte, Estados Unidos

Dr. Oleg Zaytsev Viktorovich
Co-Tutor
Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas
IPN, La Paz, B.C.S., México

Dr. Alfonso N. Maeda Martínez
Co-Tutor
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste
La Paz, B.C.S., México

Dr. Alejandro Parés Sierra
Co-Tutor
Centro de Estudios Superiores de Ensenada
Ensenada, B.C., México

Comité Sinodal

Dr. Salvador Emilio LLuch Cota	Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste
Dr. Francisco E. Werner	University of North Carolina at Chapel Hill
Dr. Alfonso N. Maeda Martínez	Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste
Dr. Oleg Zaytsev Viktorovich	Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas
Dr. Alejandro Parés Sierra	Centro de Estudios Superiores de Ensenada
Dr. Daniel Bernardo Lluch Cota (Suplente)	Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste

Resumen

La serie histórica de capturas de almeja catarina *Argopecten ventricosuus* (Sowerby II, 1842) en el complejo lagunar Bahía Magdalena-Almejas (BMA), México, muestra fuertes pulsos de producción. Este comportamiento ha sido relacionado con las corrientes oceánicas, con las condiciones de temperatura y con factores ecológicos como la inmigración de juveniles provenientes de la plataforma continental y el desarrollo de substratos adecuados para el asentamiento y resguardo de los mismos. Sin embargo, la comprobación y cuantificación de estos mecanismos ha sido imposible debido a la falta de información oceanográfica y de distribución de la especie en la plataforma continental. En el presente trabajo se describe la circulación y el transporte pasivo de partículas en las inmediaciones del complejo lagunar BMA mediante simulaciones con un modelo lineal de circulación en el dominio de la frecuencia con el que se obtuvieron los campos armónicos básicos de flujo. El modelo está forzado por mareas, marea residual, viento medio, viento periódico para simular el efecto de la brisa marina y una simulación aproximada del efecto de la Corriente de California. Se realizaron dos experimentos principales, uno enfocado a detectar zonas de retención en el interior del sistema lagunar, y el segundo para observar el intercambio de partículas entre el sistema y el océano abierto adyacente. Así mismo se exploró el papel del viento y condiciones de temperatura en la producción de pulsos de abundancia de almeja catarina en BMA provenientes de la plataforma continental. Se encontró que las partículas sembradas en el sistema tienden a quedarse dentro y concentrarse en regiones particulares que correspondieron con la distribución real de bancos pesqueros tradicionalmente explotados en la zona, y que durante condiciones poco comunes de viento se pueden presentar intrusiones importantes de partículas desde la plataforma continental al interior del sistema lagunar BMA. Se observó que para un periodo de 12 años se presentaron dos pulsos de producción de almeja (1989-1990 y 1995-1996), que concuerdan con la ocurrencia de condiciones particulares de viento, sin embargo, para otros periodos de viento similar no se observó correspondencia en los pulsos de producción. Al considerar las anomalías térmicas, se observó que para el periodo 1989-1990 y 1995-1996 las temperaturas se ubicaron en el intervalo óptimo para el desarrollo de la almeja catarina, mientras que para los periodos 1992-1993 y 1997-1998, por influencia de eventos El Niño, se presentaron fuertes anomalías positivas con temperaturas por fuera del intervalo óptimo para la especie. Los resultados son de importancia para el estudio de la zona en general, y particularmente para la modelación y desarrollo de pronósticos de procesos de deriva larval de importantes recursos pesqueros en la región.

Palabras clave: almeja catarina, modelo numérico, ENSO

Abstract

Catch records of catarina scallop *Argopecten ventricosuus* (Sowerby II, 1842) from the Bahia Magdalena-Almejas lagoon system (BMA), Mexico, show strong production pulses. This behavior has been associated to ocean currents, temperature conditions, and ecological factors such as immigration of early stage animals from the continental shelf, and the development of proper substrate for the scallop settlement. However, testing and quantifying these mechanisms has been impossible because of the lack of information on the oceanography and distribution of populations outside the lagoon system. In this work, the circulation and passive transport of particles inside and nearby the BMA is described, based on simulations with a linear circulation model in the frequency domain. The model is forced with tides, residual tides, mean wind, periodic wind to emulate marine breeze, and an approximation of the California Current advection. Two main experiments were carried, the first aimed at detecting retention zones within the system, and the second to evaluate the potential exchange of particles between the system and the continental shelf. Further, the roles of wind and temperature conditions on the scallop production pulses were explored. I found that particles seeded in the lagoon system tend to remain inside and concentrate in particular areas that correspond with the real distribution of natural beds of important benthic fish resources, and that particular conditions of wind could produce large intrusion of particles from the continental shelf into the BMA system. During a 12-years period, only two production pulses were registered (1989-1990 y 1995-1996), both corresponding to occurrence of the particular wind conditions; however, another proper wind situation did not correspond to a production pulse. When including the temperature analysis, I noted that for the 1989-1990 and 1995-1996 periods, temperatures were within the optimum range for the species, while during other periods, under the influence of El Niño, temperature was outside the range. Results are relevant for the study of the region in general, and particularly for the development of models and forecasts of larval drift processes of regionally important fish resources.

Keywords: catarina scallop, numerical modeling, ENSO

Dedicatoria

A mi hermosa y numerosa familia que, por fortuna tiende a crecer aun más:

mis padres

mis hermanos

mis sobrinos

mis amigos

Con todo el amor que solo ustedes mismos me hacen sentir

Gracias por estar siempre

Agradecimientos

Al Dr. Salvador E. Lluch Cota por la dirección atinada de este trabajo y la asesoría a lo largo de todo mi desarrollo profesional.

A mi comité tutorial:

Dr. Oleg Zaytsev Viktorovich
Dr. Alfonso N. Maeda Martínez
Dr. Alejandro Parés Sierra
Dr. Francisco E. Werner

Por su asesoría, sugerencias, comentarios, paciencia, y la disponibilidad siempre de ayudar durante todo el desarrollo del presente trabajo.

Al Dr. Alfredo Aretxabaleta (Woods Hole Oceanographic Institution), por sus consejos y asesoría en el desarrollo inicial del modelo, pero sobre todo por su invaluable amistad.

Al personal del Marine Science Numerical Lab de la Universidad de Carolina del Norte, en Chapel Hill, por la asesoría y el apoyo brindado durante la estancia de investigación realizada en el otoño de 2004.

Al programa de Ecología Pesquera a cargo del Dr. Sergio Hernández Vázquez, por brindar siempre espacio a nuevos estudiantes.

Al Dr. Cesar Augusto Salinas Zavala por todo el apoyo, asesoría en repetidas ocasiones, consejos y amistad compartida.

Al Dr. Daniel B. Lluch Cota por sus comentarios y sugerencias al inicio de este trabajo y su asesoría siempre clara.

Al Dr. Domenico Voltolina del laboratorio UAS-CIBNOR por su asesoría y paciencia inagotable.

Al personal del laboratorio de modelación y pronóstico pesquero del CIBNOR, el M.C. Jesús Bautista y el Lic. Carlos Pacheco Ayub, por todo el apoyo y disposición siempre.

A la Tec. Eulalia Meza Chávez por todo el apoyo brindado durante su estancia en el laboratorio de pesquerías y por todo su cariño no importa donde este.

A la M.C. Ma. Teresa Sicard González, por su asesoría en la parte biológica de este trabajo, apoyo y amistad pero sobre todo por creer siempre en mí.

Al personal de laboratorio de cefalópodos del CIBNOR, por adoptarme, especialmente a la M.C. Arminda Mejía Rebollo y M.C. Dana I. Arizmendi Rodríguez por el apoyo incondicional.

Al personal de la Biblioteca del CIBNOR, Lic. Ana María Talamantes Cota, Tec. Antonio Díaz Serna, Lic. Ma. Esther Ojeda Castro y Lic. Edgar Yuen Sánchez.

Al personal de Posgrado del CIBNOR, Dra. Thelma Castellanos Cervantes, Lic. Osvelia Ibarra Morales, Lic. Leticia González Rubio, C. Guadalupe Sánchez Vázquez, C. Beatriz Gálvez González, C. Claudia Olachea León, Lic. Manuel Melero Astorga y Lic. Horacio Sandoval Gómez. Por todas las facilidades brindadas.

Al CIBNOR por la infraestructura y apoyo brindando a los estudiantes.

Al CONACyT por el apoyo económico brindado a través de la beca 144436

A la Comisión México-Estados Unidos para el Intercambio Educativo y Cultural por la beca otorgada para realizar una estancia de investigación en el otoño de 2004.

Para la realización de este trabajo se contó con el apoyo económico derivado de los proyectos CYTED II.6 a cargo del Dr. Alfonso Maeda Martínez y del proyecto 995-0: Linking human and biophysical processes in coastal marine ecosystems of Baja California a cargo del Dr. Salvador E. Lluch Cota.

A mis compañeros y amigos porque llenan de alegría mis días, y me enseñan que siempre hay más, por todas las experiencias compartidas, el apoyo, la confianza, los enojos, las risas, las lagrimas, las cantadas, las bailadas, los sueños, ideas, ilusiones y todo lo que no se puede escribir. Los quiero mucho, todos han entrado en mi vida en el momento preciso y desde entonces van conmigo en mi corazón, no importa lo que pase siempre quedaran allí: *Maureen, Cecy, Vic, Ingrid, Clau, Ale, Men, Mary, Laus, Hervey y los herveys, Mar, Mike, Gas, Min, Danita, Cesari, Susy, Ileana, Chava, Tere, Alf, Rigo, Tecua, Gigio, Lalita, Cristy.*

A mi hermano *Salvador* y mis hermanas *Lupita, Chayito, Mary, Pazy y Angie*, porque gracias a ustedes se que el amor fraternal es invaluable e infranqueable, no importa el tiempo ni la distancia.

Finalmente quiero agradecer a las personas que son el amor de mi vida porque simplemente sin ustedes no me imagino, gracias por todo su amor incondicional, sus tiernos cuidados no importa mi edad, sus enseñanzas, su fe ciega, su confianza, por dejarme elegir mi vida y aceptarme, por minimizar mis errores y destacar mis más mínimos logros, están siempre en mi mente y corazón, *los amo papás (Cecy y Lino).*

Contenido

1. Introducción y Antecedentes	1
1.1 Biología de la almeja catarina	3
1.1.1 Posición sistemática	3
1.1.2 Aspectos ecológicos	4
1.1.3 Ciclo de vida	5
1.2 Pesquería de la almeja catarina	8
1.2.1 Desarrollo histórico de la pesquería	10
1.2.2 Sistema de manejo	11
1.2.3 Variabilidad en las capturas e hipótesis para explicarla	13
1.3 Antecedentes de modelación	18
2. Hipótesis	22
3. Objetivos	22
3.1 Objetivo general	22
3.2 Objetivos específicos	22
4. Justificación	23
5. Área de estudio	24
6. Metodología	27
6.1 Detección de los pulsos de producción	27
6.2 Historia de la pesquería	27
6.3 Distribución espacio-temporal de la temperatura preferencial para la almeja catarina	28
6.4 Modelo numérico de circulación	30
6.4.1 Generación de la malla (dominio)	31
6.4.2 Forzamiento por Mareas	33
6.4.3 Forzamiento por viento y Aproximación Barotrópica de la Corriente de California (ABCC)	34
6.4.4 Validación del modelo Fundy	35
6.5 Modelo lagrangiano	36
6.5.1 Selección de forzamientos	37
6.5.2 Experimentos de deriva	38
6.5.2.1 Estimación de retención dentro del complejo lagunar	38
6.5.2.2 Intercambio de partículas entre la Zona de canales, Bahía Magdalena y Bahía Almejas	38
6.5.2.3 Estimación de la importación al complejo lagunar	39
7. Resultados	41
7.1 Detección de los pulsos de producción	41
7.2 Historia de la pesquería	42
7.3 Distribución espacio-temporal de la temperatura preferencial para la almeja catarina	44
7.4 Modelo numérico de circulación	50
7.4.1 Generación de la malla computacional (dominio)	50
7.4.2 Forzamiento por mareas	50
7.4.3 Forzamiento por viento y Aproximación Barotrópica de la Corriente de California (ABCC)	54

7.4.4 Validación del modelo Fundy	59
7.5 Modelo lagrangiano	61
7.5.1 Selección de forzamientos	61
7.5.2 Experimentos de deriva	64
7.5.2.1 Estimación de retención dentro del complejo lagunar	64
7.5.2.2 Intercambio de partículas entre la Zona de canales, Bahía Magdalena y Bahía Almejas	64
7.5.2.3 Estimación de importación al complejo lagunar	72
8. Discusión	82
9. Conclusiones	88
10. Recomendaciones	91
11. Bibliografía	93
12. Anexos	
Anexo 1 Método numérico de Fundy	
Anexo 2 Amplitud y Fase para las componentes de marea K_1 , O_1 , S_2 y N_2	
Anexo 3 Resultado de los 25 escenarios de simulación variando intensidad y dirección de viento	
Anexo 4 Artículo científico aceptado: Modelación de la circulación invernal y la retención de partículas en el sistema lagunar Bahía Magdalena-Almejas (Baja California Sur México)	
Anexo 5 Artículo científico sometido: Strong production pulses of the catarina scallop (<i>Argopecten ventricosus</i>) fishery in Bahia Magdalena, México: a model-based exploratory study.	

Lista de figuras

Figura 1.- Patrones de comportamiento encontrados por Spencer y Collie (1997). Las series simuladas de abundancia (línea continua) fueron generadas con el modelo poblacional de Steele y Henderson; La línea punteada indica la tendencia suavizada. Los números romanos indican el grupo de stock al cual cada simulación representa. I) Estado de equilibrio; II) Variabilidad de baja frecuencia; III) Cíclico; IV) Irregular; V) Variabilidad de alta frecuencia; VI) Espasmódicos. (Modificado de Spencer y Collie, 1997).

Figura 2.- Distribución geográfica y morfología de la almeja catarina: a) Vista interior de la valva izquierda; b) Vista exterior de la valva derecha y c) Vista lateral de la concha.

Figura 3.- Zona de estudio, localización geográfica y toponimia del complejo lagunar Bahía Magdalena-Almejas (BMA). Se muestra parte de la zona oceánica adyacente y la batimetría. Los asteriscos muestran los puntos en los que fueron reportados presencia de almeja catarina sobre la plataforma continental (Maeda-Martínez *et al.*, 1993; Leija-Tristán *et al.*, 1996).

Figura 4.- Serie histórica de producción de almeja catarina (*Argopecten ventricosus*) en Bahía Magdalena, B.C.S., México.

Figura 5.- Series de captura de diversas especies de bivalvos en el mundo. Gráficas generadas con base en los datos reportados por FAO 2000.

Figura 6.- Análisis espectral para las componente de viento U y V, mostrando un espectro de alta frecuencia con periodicidad diaria.

Figura 7.- Zonas en las que se ha reportando presencia de substrato preferencial para el asentamiento de post-larvas de almeja catarina (contornos grises) y localización de algunos bancos almejeros dentro del complejo lagunar Bahía Magdalena-Almejas y puntos de referencia. A) La florida – Libertad (zona de canales); B) Estero San Buto y área adyacente; C) Estero Salinas y D) La zona Sureste de Bahía Almejas (Puerto Chale y Rancho Bueno). Los números corresponden a sitios de referencia: 1) Boca de Soledad, 2) Puerto López Mateos, 3) La Florida, 4) Vuelta del Diablo, 5) La libertad, 6) San Carlos viejo, 7) Puerto San Carlos, 8) Puerto Magdalena, 9) estero San Buto, 10) estero El Chisguete, 11) La Bocana, 12) El Médano Amarillo, 13) Cerro Blanco, 14) Las Torres, 15) Puerto Cortes, 16) Estero Salinas, 17) Laguna Palmer, 18) Almejas, 19) La Poza, 20) Puerto Chale, 21) Bajo Banderitas, 22) Rancho Bueno, 23) La Loma Amarilla, 24) El Blanquizcal, 25) La Herradura, 26) La Uña de Gato.

Figura 8.- Curva teórica de Gauss (línea continua) ajustada a los valores de marco de actividad (puntos) observados en laboratorio reportados por Sicard, 1999.

Figura 9.- Patrón estacional de la temperatura superficial del mar (SST) durante un año promedio, para el interior del complejo lagunar Bahía Magdalena-Almejas (línea discontinua) y en la zona oceánica adyacente (línea continua).

Figura 10.- Distribución espacial de la Temperatura Preferencial Estimada (TPE) en el complejo lagunar Bahía Magdalena-Almejas, en un año promedio.

Figura 11.- Distribución espacial de la Temperatura Preferencial Estimada (TPE) del promedio histórico (panel superior) y de las anomalías térmicas en un periodo de dos años: El Niño 82-83 (panel del centro) y La Niña 88-89 (panel inferior).

Figura 12.- Malla computacional de elementos finitos triangulares, elaborada para el complejo lagunar de Bahía Magdalena-Almejas. El dominio incluye la zona de canales y el cuadrante oceánico adyacente. Se muestra las zonas 1 y 2 delimitadas por la resolución de los elementos (zona 1: parte oceánica con menor resolución, zona 2: interior de la bahía con mayor resolución) y el transecto perpendicular a la costa del que se hará referencia mas adelante.

Figura 13.- a) Elipses de intensidad y orientación para la componente de marea M_2 , sobre el complejo lagunar Bahía Magdalena-Almejas (BMA). b) Elevación y fase de la componente de marea M_2 en el complejo Bahía Magdalena-Almejas (BMA).

Figura 14.- Circulación promedio vertical de la marea residual Z_0 de M_2 en el complejo lagunar Bahía Magdalena-Almejas (BMA).

Figura 15.- Patrones de circulación obtenidos con el modelo Fundy utilizando viento medio de febrero y la Aproximación Barotrópica de la Corriente de California (ABCC) como forzamientos. a) Velocidad en superficie; b) Velocidad integrada en la vertical y c) Elevación (m).

Figura 16.- Elipses de intensidad de las corrientes forzadas con el viento periódico, sobre el complejo lagunar Bahía Magdalena-Almejas (BMA) a) en superficie y b) velocidad integrada en la vertical.

Figura 17.- Transporte a través de la Bocana. Comparación entre los diferentes forzamientos no periódicos a lo largo del transecto perpendicular a la costa: a) Aproximación Barotrópica de la Corriente de California (ABCC); b) Viento medio de febrero; c) Marea residual de M_2 ; d) La combinación de todos. Los contornos grises representan el flujo hacia el sur a lo largo de la costa. Los contornos blancos corresponden a flujo 0 a lo largo de la costa. El flujo perpendicular a la costa está representado por los vectores de color: rojo indica flujo hacia la costa y azul indica flujo hacia mar abierto.

Figura 18.- Comparación entre el desplazamiento de las partículas aplicando los diferentes forzamientos, para un cuadrante en la plataforma continental del área de estudio. Los círculos marcan la posición inicial de las partículas y los puntos negros la posición final; a) Viento medio noroeste, b) Aproximación Barotrópica de la Corriente de California (ABCC), c) M_2 , d) Z_0 de M_2 , e) Viento periódico y f) Suma de todas las anteriores.

Figura 19.- Comparación entre el desplazamiento de las partículas aplicando los diferentes forzamientos, para un cuadrante en la Boca de B Magdalena. El cuadro gris marca la posición inicial de las partículas y los puntos negros la posición final; a) Viento medio noroeste, b) Aproximación Barotrópica de la Corriente de California (ABCC), c) M_2 , d) Z_0 de M_2 , e) Viento periódico y f) la suma de todas las anteriores.

Figura 20.- Áreas de retención. Concentración de partículas pasivas puestas a derivar en una distribución homogénea a 1 m de profundidad. Los mapas se presentan en intervalos de 4 días.

Figura 21.- Dispersión de partículas en la zona de canales del complejo lagunar Bahía Magdalena-Almejas, probando tres escenarios de viento Noroeste: a) viento débil (1.8 m s^{-1}); b) viento medio (3 m s^{-1}) y c) viento fuerte (5 m s^{-1}).

Figura 22.- Dispersión de partículas en la porción norte de Bahía Magdalena, probando tres escenarios de viento Noroeste: a) viento débil (1.8 m s^{-1}); b) viento medio (3 m s^{-1}); y c) viento fuerte (5 m s^{-1}).

Figura 23.- Dispersión de partículas en Bahía Almejas, probando tres escenarios de viento Noroeste: a) b) viento débil (1.8 m s^{-1}); b) viento medio (3 m s^{-1}) y c) viento fuerte (5 m s^{-1}).

Figura 24.- Selección de cuadrantes mostrando la posición final de partículas puestas a derivar en dos cuadrantes diferentes sobre la plataforma continental siguiendo la isolinia de los 200m. Se mantuvieron constantes los forzamientos de la Aproximación Barotrópica de la Corriente de California, M_2 , viento periódico y Z_0 de M_2 y se variaron tres intensidades de viento noroeste: débil (1.8 m s^{-1}); promedio (3 m s^{-1}) y fuerte (5 m s^{-1}). Los círculos blancos (cuadro) indica la posición inicial de las partículas, las figuras señalan la profundidad a la cual se sembraron inicialmente y la posición final: \square (40m); \diamond (20m); * (15m); ∇ (10m); + (5m); * (0.5m).

Figura 25.- Tamaño y ubicación de los cuadrantes sembrados, el cuadrante sombreado indica el cuadrante que mayor intrusión de partículas tuvo. Los asteriscos muestran los puntos en los que fueron reportados presencia de almeja catarina. Se excluyen los cuadrantes que quedaron completa o parcialmente dentro del complejo lagunar Bahía Magdalena-Almejas.

Figura 26.- Selección de escenarios para observar la importación de partículas desde un cuadrante situados en la plataforma continental. En la esquina superior derecha se muestra la intensidad y la dirección del viento utilizada en cada escenario. El resto de los forzamientos se mantuvieron constantes (Aproximación Barotrópica de la Corriente de California, viento periódico, M_2 y Z_0). Los símbolos muestran las profundidades iniciales en las que fueron liberadas las partículas: 40 m (*); 20 (◆); 15 (□); 10 m (●); 5 (△).

Figura 27.- Posición final de las partículas puestas a derivar con una intensidad de viento de 4 m s^{-1} y dirección oeste. Obsérvese que algunas partículas se ubicaron en las

zonas reconocidas como bancos almejeros naturales (áreas sombreadas) dentro del complejo lagunar Bahía Magdalena-Almejas.

Figura 28.- Valores de intensidad y dirección de viento óptimo para la intrusión de partículas al complejo lagunar Bahía Magdalena-Almejas. Los contornos marcan la proporción de partículas importadas al complejo desde la plataforma continental según la Tabla 5. Los círculos muestran los valores de viento observados durante invierno y las cruces los escenarios simulados.

Figura 29.- Dirección e intensidad del viento (panel superior) y anomalías térmicas registradas en el complejo lagunar Bahía Magdalena-Almejas.

Figura 30.- Serie de tiempo generada con las distancias entre puntos de viento observados respecto al óptimo calculado (solamente invierno; línea continua con puntos blancos) comparada con la serie de anomalías térmicas en la zona (línea discontinua con puntos negros). Se señalan los casos en los que la distancia al punto óptimo es mínima. Los triángulos negros indican eventos cálidos (1992 y 1998), y el triángulo blanco indica un evento frío (1989).

Lista de tablas

Tabla 1.- Selección de especies que presentan el mayor número de pulsos/100 años. Se presentan separadas según el phylum al que pertenecen y el resumen correspondiente. Se resalta con fondo gris y en negritas el número de pulsos para la almeja catarina *Argopecten ventricosus*.

Tabla 2.- Captura, CPUE y número de embarcaciones participantes en la extracción comercial de la almeja catarina en BMA durante el periodo 1996-2005.

Tabla 3.- Valores observados (Mareógrafo de la estación San Carlos, B.C.S.) y estimados con el modelo lineal Fundy de las componente armónicas de marea para la zona de estudio.

Tabla 4.- Comparación de las velocidades máximas y medias de corriente observadas en campo y las simuladas con el modelo Fundy.

Tabla 5.- Resultados obtenidos para los escenarios de simulación variando dirección e intensidad de viento. Se muestran los valores de viento, el porcentaje de intrusión y si hubo o no distribución en bancos almejeros. Se resaltan en negritas los escenarios 21-24 porque la posición final de las partículas coincide con la distribución real de los bancos.

1. Introducción y Antecedentes

Los recursos marinos representan actualmente una importante fuente de proteína animal para la población humana, y la principal actividad económica de muchas comunidades costeras alrededor del mundo. El adecuado manejo de estos recursos, es decir, el aseguramiento de su rendimiento a través de las generaciones, es una prioridad para las naciones que dependemos de ellos. Desafortunadamente existen muchos casos donde las ciencias pesqueras tradicionales, creadas y construidas alrededor del objetivo de optimizar el manejo de los recursos acuáticos, han mostrado insuficiencia e incluso han fracasado (Botsford *et al.*, 1997). Parte de ese fracaso resulta al menos de haber ignorado por muchos años la influencia que tiene el ambiente en las poblaciones y comunidades marinas.

Actualmente en las ciencias pesqueras existe ya una conciencia muy clara de incorporar el clima y otras fuentes de variación de los recursos pesqueros, a las estrategias de manejo, sea por adaptación de los enfoques existentes o por la implementación de nuevos esquemas. Una primera tarea en esta empresa es la identificación de la variabilidad de los recursos y la búsqueda de los mecanismos que la provocan. Spencer y Collie (1997) revisaron y determinaron patrones de variabilidad con base en 30 grupos de peces e invertebrados marinos, definiendo seis tipos con base en la magnitud de sus variaciones y su frecuencia (Figura 1); sin embargo, a partir de la observación y experiencia con algunos recursos en particular, se sabe que existe al menos otro patrón distinto, que se presenta en recursos económicamente importantes y que debe ser entendido y caracterizado para el adecuado diseño de estrategias de manejo.

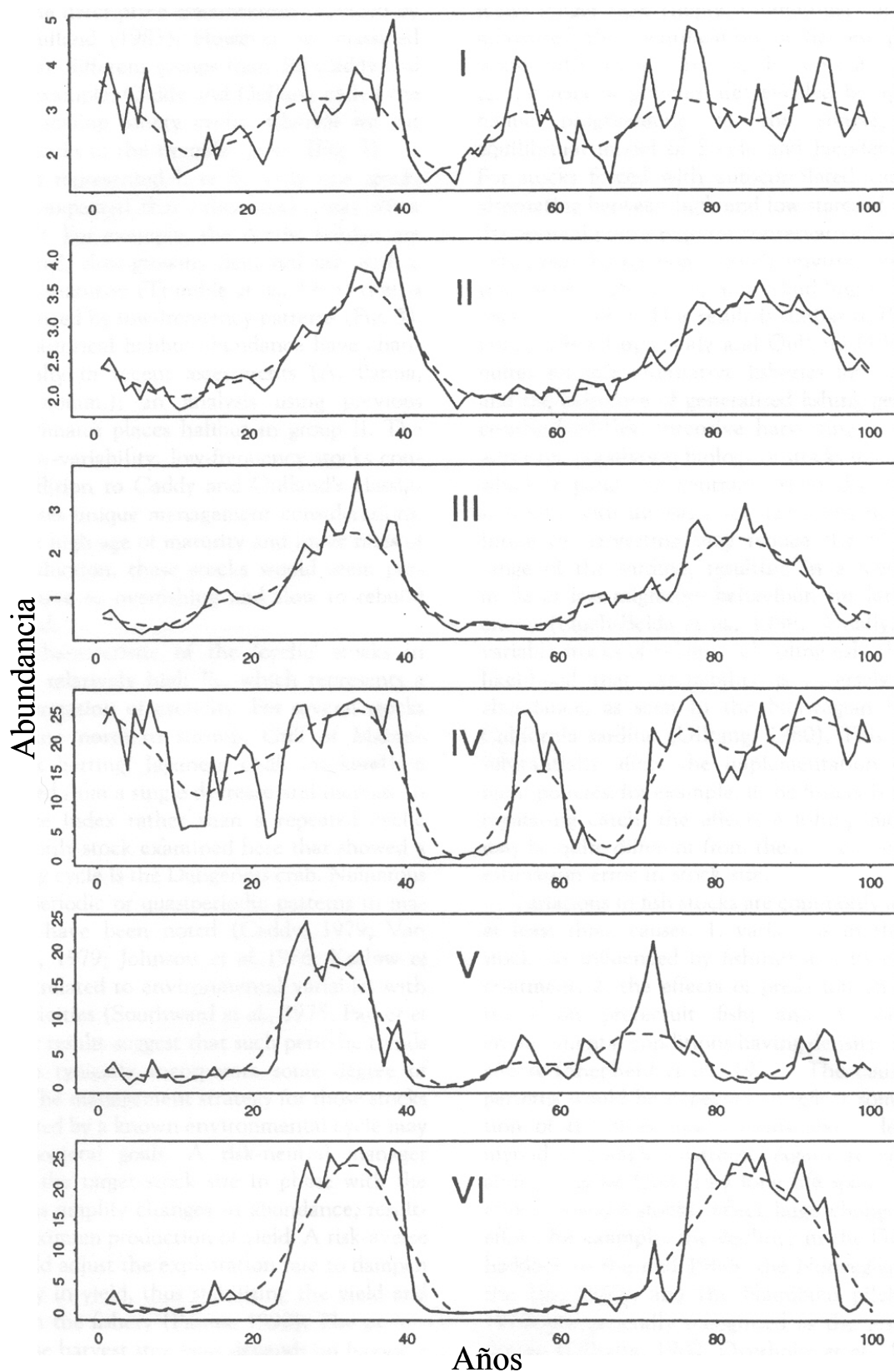


Figura 1.- Patrones de comportamiento encontrados por Spencer y Collie (1997). Las series simuladas de abundancia (línea continua) fueron generadas con el modelo poblacional de Steele y Henderson; La línea punteada indica la tendencia suavizada. Los números romanos indican el grupo de stock al cual cada simulación representa. I) Estado de equilibrio; II) Variabilidad de baja frecuencia; III) Cíclico; IV) Irregular; V) Variabilidad de alta frecuencia; VI) Espasmódicos. (Modificado de Spencer y Collie, 1997).

Este patrón consiste en la ocurrencia de condiciones de producción aproximadamente constantes interrumpidas por fuertes pulsos de incremento en la misma (de hasta varios órdenes de magnitud por encima de las condiciones promedio) de uno o dos años, después de los cuales la captura vuelve a sus niveles previos. Por su forma y magnitud, es de suponer que este patrón de pulsos esté controlado por factores o procesos diferentes a aquellos que generan las respuestas ilustradas en los grupos de Spencer y Collie (1997). El presente trabajo pretende identificar los pulsos detectados en la pesquería de almeja catarina (*Argopecten ventricosus*) y explorar los posibles mecanismos que los generan, para el diseño o modificación de las estrategias de manejo para este recurso.

1.1 Biología de la almeja catarina

1.1.1 Posición sistemática

La almeja catarina (Figura 2) es un molusco de concha mas o menos inequivalva (generalmente una valva es más convexa que la otra), subequilátera de contorno aproximadamente circular, con charnela recta y extensiones alares (orejuelas) de tamaño subigual. Cara ventral de la orejuela anterior derecha con una escotadura bisal bien definida y un ctenolio. La escultura externa esta formada por aproximadamente 21 costillas radiales (20 a 22 en cada valva) y numerosas líneas concéntricas en los espacios intercostales; la superficie interna es lustrosa con costillas radiales aplanadas correspondientes a las costillas externas. Los bordes del manto son libres, provistos de

ojos y pequeños tentáculos y el pie atrofiado (FAO, 1995). Su posición sistemática actual es:

Phylum	Mollusca
Clase	Bivalvia
Subclase	Pteriomorpha
Superorden	Eupteriomorpha
Orden	Ostreoidea
Suborden	Pectinina
Superfamilia	Pectinacea (Rafinesque, 1815)
Familia	Pectinidae (Rafinesque, 1815)
Género	<i>Argopecten</i> (Monterosato, 1889)
Especie	<i>Argopecten ventricosus</i> (Sowerby II, 1842)

1.1.2 Aspectos ecológicos

La almeja catarina es un pectínido bentónico de locomoción limitada, capaz de nadar impulsándose por movimientos de apertura y cierre de las valvas, y que como muchas otras especies de moluscos bentónicos tiene un periodo de vida pelágico durante sus estadios larvales.

Se distribuye desde la costa occidental de Baja California y el Golfo de California, México, hasta Paita en Perú (Figura 2; Álamo y Valdivieso, 1987). Aunque tiende a

concentrarse en profundidades someras (1 a 30 m; Álamo y Valdivieso, 1987; Leija-Tristán *et al.*, 1996), se han reportado hasta los 180 m de profundidad en la plataforma continental de la costa occidental de Baja California (Maeda-Martínez *et al.*, 1993). Suele formar extensos bancos en zonas someras protegidas como son lagunas, bahías y esteros (Massó-Rojas, 1999) sobre substratos que van desde arena fina y fango hasta conchuela con fondos pedregosos, fondos coralinos y semiduros cubiertos por vegetación, principalmente pastos marinos (Baqueiro-Cárdenas *et al.*, 1982; Álamo y Valdivieso, 1987; Massó-Rojas, 1999; Maeda-Martínez *et al.*, 1993; Leija-Tristán *et al.*, 1996).

1.1.3 Ciclo de vida

El ciclo reproductivo de esta especie suele ser activo y se pueden encontrar organismos sexualmente maduros a lo largo de todo el año (Mazón-Suastegui, 1999). Es de naturaleza hermafrodita, ambas porciones gonadales suelen madurar al mismo tiempo mostrando una coloración blanquecina en la porción anterior testicular y color rojo–naranja en la región ovárica, permitiendo su fácil diferenciación (Mazón-Suastegui, 1999). Existen antecedentes de que la temperatura y la disponibilidad de alimento son los dos factores externos que más influyen en el ciclo reproductivo (Luna-González, 1997). Temperaturas elevadas y la escasez de alimento detienen los procesos de maduración gonádica (Cruz *et al.*, 2000), mientras que los periodos de desove masivo coinciden con los cambios de salinidad y el descenso de temperatura durante los meses de febrero a marzo y de septiembre a octubre en las costas de Baja California

Sur, con aplazamientos o retrasos dependiendo de las condiciones ambientales (Trip-Quezada, 1985).

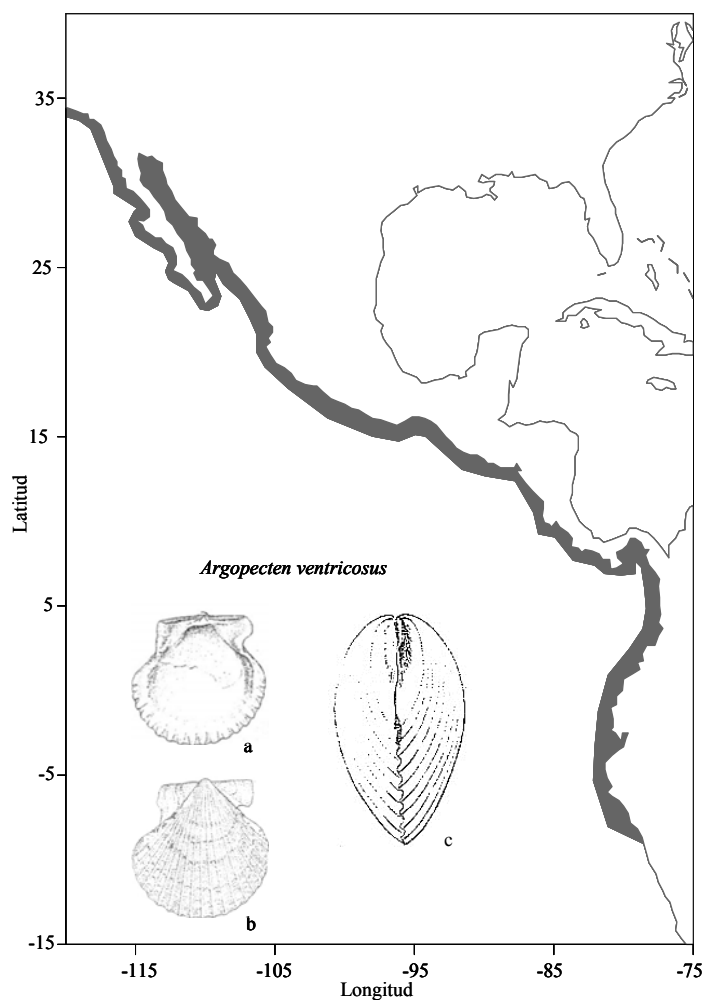


Figura 2.- Distribución geográfica y morfología de la almeja catarina: a) Vista interior de la valva izquierda; b) Vista exterior de la valva derecha y c) Vista lateral de la concha.

Una vez alcanzada la madurez sexual, las almejas liberan sus gametos al mar, en donde se lleva a cabo la fecundación y enseguida la segmentación para formar el cigoto. Después de aproximadamente nueve horas se forma la larva trocófora (Massó-Rojas, 1999), y durante las siguientes veinticuatro horas la larva aumenta de tamaño y empieza

a cubrirse por la concha. Una vez terminado este proceso, aproximadamente a las 36 horas de haberse fecundado el huevo, se convierte en larva véliger, con charnela recta, dos valvas y el velum (órgano de natación y alimentación) característico de la clase. Aproximadamente a los nueve días la larva está apta para experimentar la metamorfosis en donde ocurren los cambios morfológicos y de comportamiento asociados al paso de larvas de vida planctónica a juveniles bentónicos (Avilés-Quevedo, 1990).

La densidad larvaria depende de diversos factores, como la interconexión entre bancos, las condiciones endógenas de las mismas larvas, la disponibilidad de alimento y substrato (competencia), y condiciones hidrográficas del medio. Dentro de éstos, los patrones hidrográficos ejercen la mayor influencia en la dispersión de las larvas, ya que el periodo de vida pelágico es relativamente largo (hasta 25 días), por lo que la estabilidad espacial y temporal de una población de larvas pelágicas dependerá directamente de los patrones de corrientes marinas, resultando agregaciones locales de larvas y/o juveniles en zonas determinadas donde se podrían esperar asentamientos masivos de las mismas (Narvarte 1995; Chauvaud *et al.*, 1996). En los casos particulares de Bahía Magdalena y Bahía Concepción se ha observado una relación entre el tamaño de la población desovante y la captación de juveniles silvestres (Bojórquez-Verástica, 1997; Maeda-Martínez *et al.*, 2000), aunque se reconoce que el reclutamiento (incluyendo la fijación en colectores artificiales) es el resultado de diversos procesos que convergen espacial y temporalmente (Orensanz *et al.*, 1991).

Las larvas de diversas especies de pectínidos pueden alcanzar la capacidad para asentarse, cuando alcanzan el estadio de pediveliger (180 – 200µm, Uriarte *et al.*, 2002)

aunque a diferencia de otros bivalvos, los pectínidos no se fijan al substrato de manera permanente sino que tienen la capacidad de reptar hasta encontrar un sitio adecuado. Una vez que los organismos están fijos al substrato comienza la metamorfosis y simultáneamente se secreta el biso, se reabsorbe el velum (aparato filtrador) y se comienza a secretar la concha definitiva. Si por alguna causa el substrato elegido no resulta favorable, la post-larva tiene la capacidad de abandonar el substrato y reptar con el biso o con el pie hasta encontrar un sitio adecuado (Uriarte *et al.*, 2002).

Aproximadamente a los 34 días los juveniles que aún permanecen fijos al substrato tienen la apariencia de un adulto pero sin que aún se haya diferenciado la gónada. Después de tres meses (25 a 30 mm de longitud), los organismos se desprenden del substrato de fijación e inician su vida bentónica libre. La longevidad es de aproximadamente dos años ((Mazón-Suástegui, 1999).

1.2 Pesquería de la almeja catarina

Baja California Sur posee los litorales más amplios de la República Mexicana, con una línea de costa de 2,705 km (incluidas islas), lo que corresponde al 23% del total nacional. En sus costas se capturan tanto especies ribereñas de subsistencia, como recursos masivos (i.e. sardina y calamar) y costeros de alto valor económico, como el abulón, la langosta y algunos bivalvos, donde se incluyen los pectínidos.

Particularmente en el complejo lagunar Bahía Magdalena-Almejas (de aquí en adelante BMA; Figura 3), se explotan comercialmente tres especies de moluscos pectínidos: la

almeja mano de león (*Nodipecten subnodosus*), la almeja voladora (*Euvola vogdesi*) y la almeja catarina (*Argopecten ventricosus*). De éstas, la almeja catarina es la que más atención ha recibido tanto en términos de investigación como de explotación comercial (Keen, 1971; Maeda-Martínez *et al.*, 2000).

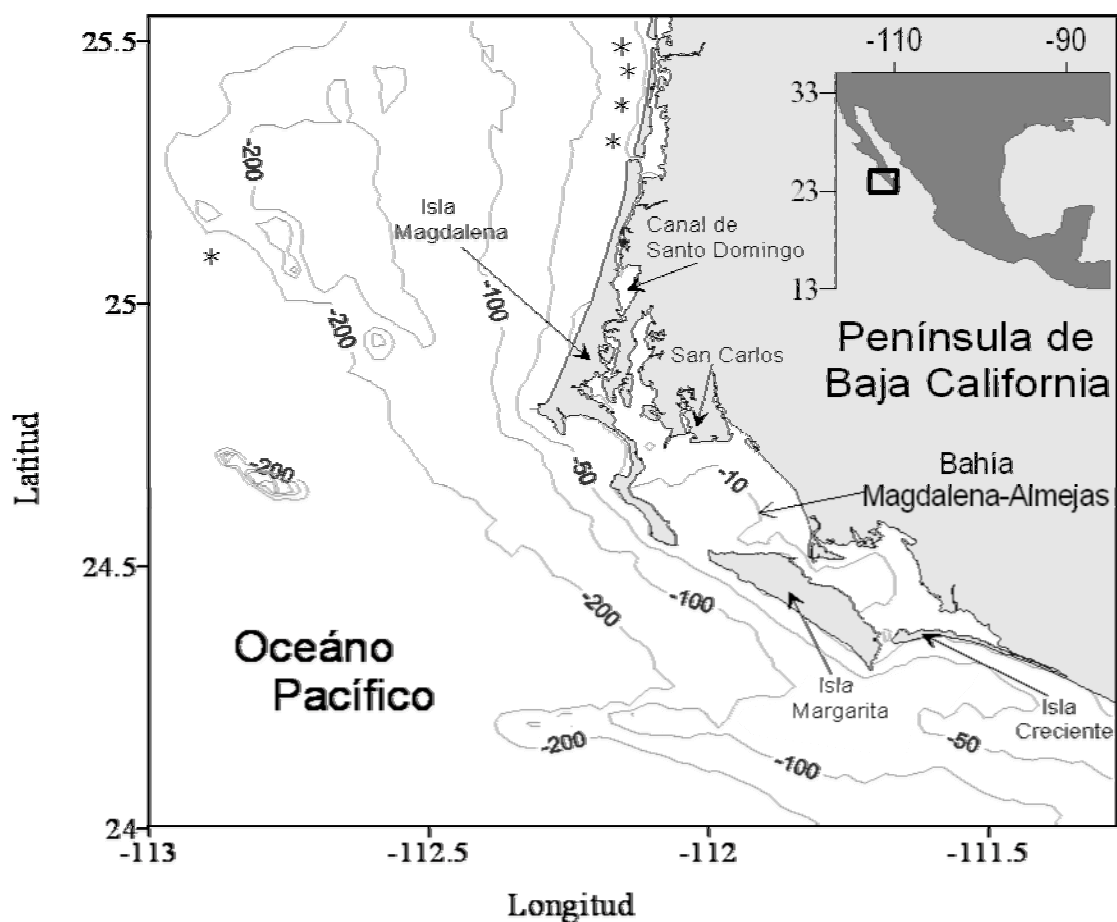


Figura 3.- Zona de estudio, localización geográfica y toponimia del complejo lagunar Bahía Magdalena-Almejas (BMA). Se muestra parte de la zona oceánica adyacente y la batimetría. Los asteriscos negros muestran los puntos en los que fueron reportados presencia de almeja catarina sobre la plataforma continental (Maeda-Martínez *et al.*, 1993; Leija-Tristán *et al.*, 1996).

1.2.1 Desarrollo histórico de la pesquería

A pesar de que la extracción comercial de esta especie se remota a la década de los 1950s, no fue sino hasta mediados de los 1970s que los bancos fueron explotados más intensamente debido a su introducción a los mercados nacional y extranjero, principalmente Estados Unidos de Norte América. Debido a la fuerte explotación, a finales de los 1970s se agotaron los bancos almejeros que se explotaban entonces en la Ensenada de la Paz, y los permisionarios se trasladaron a Bahía Magdalena y San Ignacio donde permanecieron hasta 1984 cuando por aparente sobreexplotación la zona fue cerrada a la captura comercial. En el mismo año se abrieron a la pesca los bancos ubicados en Guerrero Negro hasta septiembre de 1985 en que se declaró sobreexplotación y se suspendió la actividad extractiva, por lo que en 1986 se suspendió por completo cualquier actividad extractiva de la especie en la zona noroccidental del Estado (Massó-Rojas, 1999). Para la temporada 1988-89 en BMA se detectó la formación de grandes bancos de almeja catarina, coincidiendo con la presencia de las anomalías térmicas más bajas de la década.

La producción en esa temporada de pesca se incrementó de 550t de peso entero (55 t de músculo) reportadas en promedio desde 1973 a poco más de 5500 toneladas (550 t de músculo) en 1989, llegando a representar el 80% de producción total de almejas y caracoles a nivel estatal, el 70 % de la producción del litoral del Pacífico y el 30% a nivel nacional (Massó-Rojas, 1999). Después de los altos pulsos de producción registrados en el periodo 1989-90, la producción cayó hasta el rededor de 200 t durante

varios años, hasta 1996 en que se observó un nuevo repunte de la producción, y posteriormente en el 2002 se observó un pulso moderado (Figura 4).

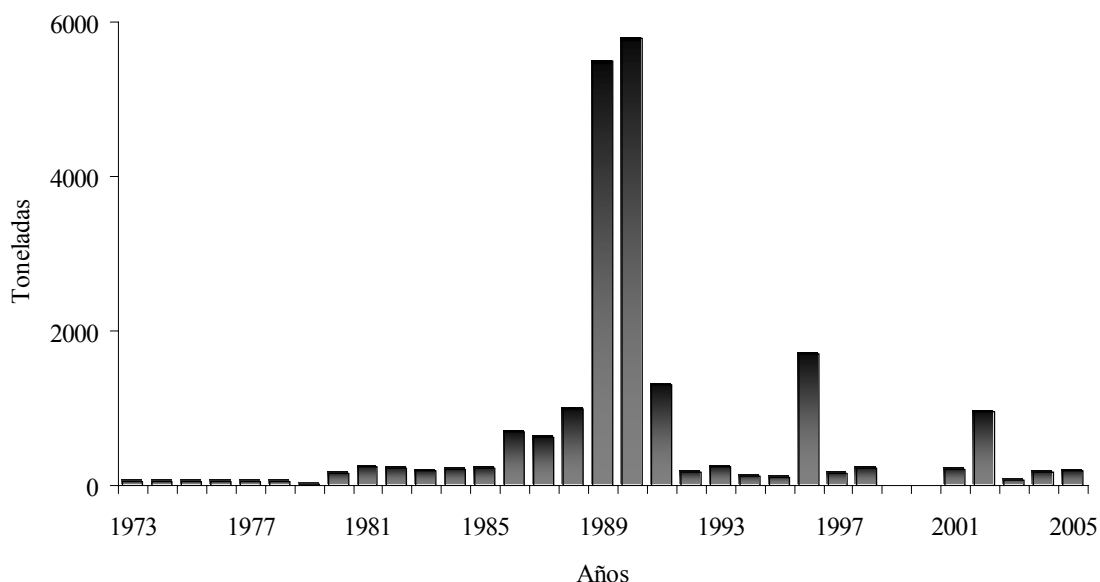


Figura 4.- Serie histórica de producción de almeja catarina (*Argopecten ventricosus*) en Bahía Magdalena, B.C.S., México.

1.2.2 Sistema de manejo

Hasta antes de 1986, los permisos para la extracción de almeja catarina estaban sujetos a la opinión técnica del Instituto Nacional de la Pesca a través del Centro Regional de Investigación Pesquera (CRIP-INP, La Paz). El primero de Julio de 1987 se publicó en el Diario Oficial de la Federación el acuerdo que regulaba la explotación de la almeja catarina en el litoral de Baja California Sur. En el acuerdo se establecieron condiciones para el otorgamiento de permisos, tanto al sector privado como a sociedades cooperativas (Mazón-Suategui, 1999), que incluían la talla mínima de captura de 60 mm de diámetro y la presentación de un programa de desarrollo acuícola

que garantizara la recuperación del recurso en los bancos naturales, además de limitar el esfuerzo pesquero. En 1989 se modificó el acuerdo establecido en 1987 y se estableció una talla mínima de captura de 56 mm para las localidades de Ensenada de La Paz, Laguna de San Ignacio, Laguna Ojo de Liebre, Laguna Guerrero Negro en Baja California Sur y Laguna Manuela en Baja California, y la talla de 60 mm se mantuvo para Bahía Concepción y Bahía Magdalena. En 1990 se estableció una veda temporal del 15 de diciembre al 31 de marzo de cada año en los litorales de Baja California y Baja California Sur. La norma que rige la explotación actualmente es la NOM-004-PESC-1993, donde además de incluirse las medidas antes descritas, se consigna que la captura permisible es establecida a partir de los volúmenes de captura estimados con base en las evaluaciones de las áreas con poblaciones susceptibles de sostener una captura comercial, que realiza el CRIP-INP.

Otro sistema de ordenamiento aplicado es el programa de regionalización de los recursos impulsado por la SAGARPA a través de la Subdelegación de Pesca, donde se establece que el recurso almeja catarina del área de B. Magdalena puede ser explotado únicamente por residentes del municipio de Comondú, mientras que los bancos almejeros asentados en Bahía Almejas están reservados para los residentes del municipio de la Paz (Hernández-Lizardi Subdelegación de Pesca, com. pers.).

Existe la posibilidad de cambiar de manos un permiso de pesca estando dentro del plan de reestructuración, que consiste en retirárselo a quien no cumpla con los requisitos establecidos por ley (propiedad de lanchas y equipo de pesca, matricula, motores, verificación de buen estado de los mismos, ser habitante del municipio correspondiente)

según una verificación anual, y otorgárselo a un permisionario nuevo que cumpla en tiempo y forma con tales requisitos.

1.2.3 Variabilidad en las capturas e hipótesis para explicarla

Los fuertes pulsos de abundancia que se presentan en la almeja catarina son comunes entre los pectínidos de diferentes partes del mundo: en América Latina, por ejemplo, la vieira tehuelcha en Argentina (*Aequipecten tehuelchus*), en Brasil la almeja concha de margarita (*Euvola ziczac*), en Chile el ostión del norte (*Argopecten purpuratus*) y del sur (*Chlamys vitrea*), en Perú también el ostión del norte (*A. purpuratus*); en Norteamérica con la escalopa cálico (*Argopecten gibbus*); en el continente europeo (España y Francia) con la vieira común (*Pecten maximus*) y la vieira zamburiña (*Chlamys varia*; Stotz y Mendo, 2002) en Irlanda con la almeja fina (*Ruditapes decussatus*) y en Corea con la escalopa Yesso (*Pecten yessoensis*; FAO, 2000; Figura 5).

Actualmente existe conciencia de que el esfuerzo de pesca no es suficiente para explicar los pulsos de abundancia, y que existe un componente ambiental. Se reconoce en organismos de locomoción limitada que existe una variabilidad en el reclutamiento debido a factores tales como la calidad de los desoves, modificación de los substratos de fijación (como es la ausencia o presencia de pastizales), variaciones en las poblaciones de depredadores, y cambios en el patrón de deriva de las fases planctónicas (Maeda-

Martínez *et al.*, 1993; Leija-Tristan *et al.*, 1996; Santamaría-Gallegos *et al.*, 1999; Stotz y Mendo, 2002).

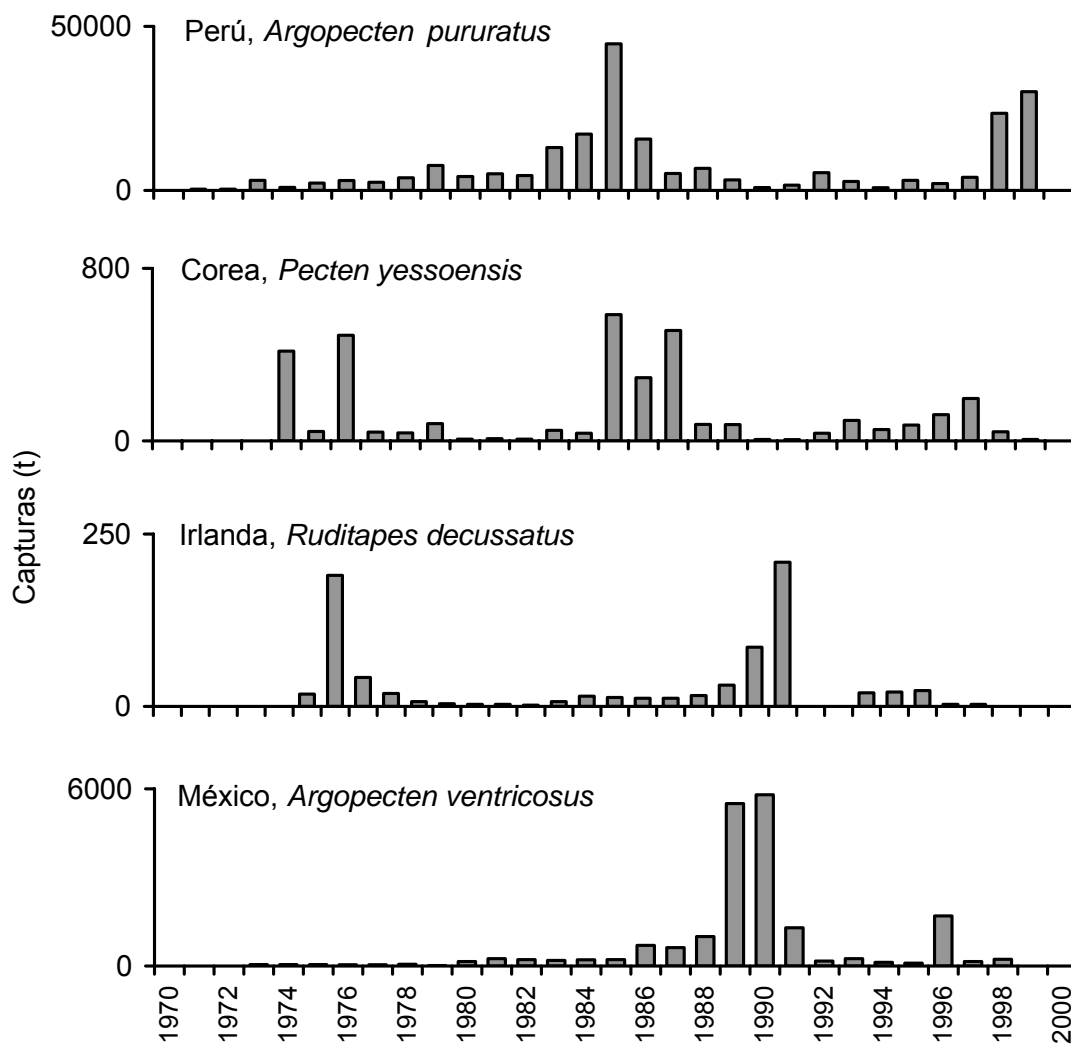


Figura 5.- Series de captura de diversas especies de bivalvos en el mundo. Gráficas generadas con base en los datos reportados por FAO 2000.

En el caso de poblaciones que forma bancos interconectados, el éxito de reclutamiento depende tanto de condiciones a gran escala (factores climáticos, tamaño del stock desovante), como de las condiciones locales (substrato, depredadores); es decir, el

reclutamiento en un banco es afectado por las condiciones del banco receptor como por las condiciones en bancos remotos y por los procesos que los conectan (Joll, 1989; Román, 1991; Naidu, 1991; Kenchington y Lundy, 1996; Ciocco y Monsalve, 1999). El éxito, sentido, y variaciones de dicha conexión depende de la dispersión y supervivencia larvaria y por lo tanto de factores físicos directos como la temperatura y la hidrodinámica (Thouzeau, 1991; Craig y MacLoughlin, 1994; Roberts, 1997) presentes en el área. En este sentido, es fácil relacionar la distribución y éxito de las poblaciones a la presencia de estructuras oceanográficas como frentes asociados a plataformas continentales, frentes de marea, presencia de giros o remolinos, topografía marina o línea de costa y demás mecanismos que impliquen retención de larvas (Orensanz *et al.*, 1985; Bakun, 1996).

En el caso de la almeja catarina de BMA, Maeda-Martínez *et al.* (1993) plantearon la hipótesis de que la formación de bancos con alta abundancia dentro del complejo lagunar era el resultado del efecto conjunto de transporte pasivo de larvas (deriva larvaria) provenientes de bancos encontrados en la plataforma continental, y de un transporte activo de juveniles adheridos a los apéndices natatorios y cefalotórax de la langostilla pelágica (*Pleuroncodes planipes*). Este crustáceo es muy abundante y ampliamente distribuido en la plataforma continental, y presenta intrusiones masivas a la laguna cuando la temperatura del agua declina (Maeda-Martínez *et al.*, 1993). La hipótesis se soportaba tanto en el hecho de haber encontrado juveniles de almeja adherida a los apéndices de langostilla, como de una serie de cruceros realizados en 1987, donde se encontraron evidencias de bancos silvestres de almeja catarina desde

Punta Abreojos hasta los alrededores de Bahía Magdalena entre los 13 y los 180 metros de profundidad, con densidades de 0 a 15 org/m² (Leija-Tristan *et al.*, 1996; Figura 3).

Posteriormente, Maeda-Martínez *et al.*, (2000) replantearon el modelo propuesto en 1993, actualizando la información y analizando nuevos eventos de anomalías térmicas registrados en la zona. Se incluyó en esa oportunidad, el argumento de que la temperatura en la zona varía dentro del intervalo tolerable para el desarrollo de la especie (Sicard-González *et al.*, 1999) y que dado que la zona costera adyacente es altamente rica en productividad primaria (Martínez-García y Lluch-Belda, 2000), la nutrición de los organismos estaría garantizada. Se propuso que una vez habiendo desovado la población de la parte oceánica (febrero-abril), las larvas resultantes pudieran generar tres poblaciones distintas dependiendo de la deriva larvaria que presente, inducida por patrones de circulación generados por viento. Así pues, si la deriva larvaria es baja como al parecer ocurre durante años con anomalías térmicas cálidas, las larvas contribuirán a la auto sustentación de la misma población de la plataforma continental fijándose a rocas, conchas o incluso apéndices natatorios de otros organismos como la langostilla pelágica. La probabilidad de supervivencia de estas larvas es alta debido a las características anteriormente mencionadas y a que presumiblemente hay un índice de depredación muy bajo. Por su parte en el caso de que algunas de las larvas derivaran hasta el interior del complejo lagunar en BMA, no encontrarían sustratos adecuados para su asentamiento y perecerían.

En cambio durante eventos fríos (años Niña) y vientos fuertes, la cantidad de larvas que deriven hasta el interior del complejo lagunar se incrementaría considerablemente.

Además la probabilidad de supervivencia sería mayor debido a la proliferación de pastos marinos (*Zostera marina*; con una termotolerancia superior de 25° C; (Zimmerman *et al.*, 1989). Finalmente los autores consideran que en años extremadamente fríos, la intrusión de langostilla pelágica al complejo lagunar contribuye también al transporte activo de larvas de almeja adheridas a los apéndices natatorios de las langostas, trayendo como consecuencia un incremento en el reclutamiento de almejas en el complejo lagunar (Maeda-Martínez *et al.*, 2000).

Existen inconsistencias en el modelo, principalmente derivadas de la falta de relación directa entre la temperatura y los pulsos de producción. Entre 1991 y 1999 se registró un solo evento de producción masiva que fue en 1996, sin embargo no se vio relacionado directamente con la temperatura en el sentido propuesto por Maeda-Martínez *et al.* (1993), ya que las temperaturas bajas no fueron tan intensas, sino que las condiciones eran más bien cálidas en el contexto de largo plazo, por lo que este pulso fue atribuido al desove masivo de 5 millones de almejas adultas cultivadas en una granja ubicada en Rancho Bueno en 1995 (Maeda-Martínez *et al.*, 2000). Por otra parte, el segundo evento frío más intenso de las últimas tres décadas en la zona (1998-99) no se vio reflejado con un pulso de producción, ni siquiera como aquel de 1996, sin embargo, es claro, tanto en los trabajos antes citados como en el presente, que más que un efecto directo de la temperatura, el modelo se basa en la posible relación que existe entre esta variable y los patrones de circulación atmosférica y oceanográfica, y se identifica la falta de información histórica adecuada para incluir estos procesos en el análisis de manera cuantitativa. El presente trabajo adopta, entre otras, la metodología de modelación oceanográfica para explorar esta problemática.

1.3 Antecedentes de modelación

Existen pocos antecedentes de modelos numéricos de circulación publicados para el área particular de BMA. Obeso-Nieblas *et al.* (1999) utilizaron un modelo barotrópico de diferencias finitas para simular exitosamente la circulación de la marea en el complejo. Sánchez-Montante (2004) por su parte desarrolló un modelo hidrodinámico del complejo lagunar sin incluir en el dominio la porción oceánica adyacente. Sus resultados mostraron que el complejo lagunar tiene propiedades típicas antiestuarinas, caracterizadas por gradientes horizontales orientados desde las bocas hacia las regiones someras. Así mismo, sus resultados indicaron que la circulación en el interior del sistema estuvo principalmente modulada por el forzamiento de la marea a través de la boca de Bahía Magdalena.

En Abril de 2002, en las Instalaciones del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), La Paz, B.C.S., México, se llevó a cabo el taller titulado: "Bases de modelación para el estudio de procesos de deriva larvaria en pectínidos y su influencia en la variabilidad de la captación de semilla para cultivo", impartido por el Dr. Francisco E. Werner (Marine Sciences Department, University of North Carolina–Chapel Hill), bajo el patrocinio del proyecto CYTED II.6 a cargo del Dr. Alfonso N. Maeda-Martínez. El propósito de este taller fue desarrollar el interés de la aplicación de modelos acoplados al estudio de los pectínidos (Werner y Lluch-Cota, 2002), reconociendo la necesidad de implementar modelos que combinen tanto variables físicas como biológicas que permitan desarrollar y obtener más y mejores herramientas

para la optimización del recurso. Bajo este contexto se comenzó el tema de investigación del presente trabajo.

Iniciativas similares han sido llevadas a cabo en Argentina para explorar la distribución de la almeja patagónica (*Zygochlamys patagonica*) a través de los mecanismos de transporte de partículas en la plataforma continental argentina inducidos por la corriente malvina, viento y mareas (Bogazzi, 2002); y en la costa oriental de Estados Unidos, particularmente para el estudio del reclutamiento irregular de escalopas en el Georges Bank, donde por periodos de tres a cuatro años (1961-1978), se obtuvieron capturas de hasta tres veces mayores que los años previos y no vueltas a registrar en las siguientes décadas (Mohn *et al.*, 1984), de diversas especies con larvas pelágicas en el Georges Bank, la Bahía de Fundy y otras zonas aledañas en el Golfo de Maine (Werner *et al.*, 1993; Tremblay *et al.*, 1994; Werner *et al.*, 2001).

En trabajos previos, los modelos numéricos como Fundy y Quoddy han dado resultados bastante acertados como es el caso de la simulación de los campos de corrientes en la costa este de Groenlandia (Hvid-Ribergaard, *et al.*, 2004), donde los autores utilizaron tanto el modelo diagnóstico Fundy forzado con campos de salinidad y temperatura medidos en campo, como el modelo prognóstico Quoddy forzado con mareas y viento. Los autores obtuvieron las simulaciones hidrodinámicas para el periodo de abril a noviembre de 1999 y 2000 con la finalidad de observar la influencia del viento en el transporte de partículas (en este caso simulando larvas de camarón). Los autores encontraron buena similitud entre los sus resultados y los obtenidos en un trabajo previos de climatología, encontrando que el flujo principal así como los principales

giros observados se presentan en las simulaciones realizadas con los modelos, al menos en superficie. Así mismo los autores, también encontraron concordancia entre las simulaciones de corrientes y las trayectorias de dos boyas tipo WOCE-SVP puestas a derivar durante Mayo del 2000. Los autores no reportan diferencias significativas en los campos de corriente generados entre los modelos, sin embargo utilizaron la combinación de ambos para las simulaciones finales. De igual manera sugieren que los giros encontrados a lo largo de la plataforma continental están principalmente influidos por las corrientes de marea, el flujo principal y la topografía, ya que no se encontraron diferencias utilizando el viento como forzamiento.

Por su parte (Brown *et al.*, 2000, 2004) realizaron experimentos similares de transporte de larvas utilizando los campos de corriente generados con Quoddy para la costa central de Texas. Ellos validaron el modelo comparando las velocidades de corriente simulada, con las registradas *in situ*. Los autores encontraron que el modelo explica cerca del 40% de la varianza observada ($r = 0.65$, $N = 688$) y consideran que las principales discrepancias entre los valores simulados con los observados son probablemente debidas a la imposición de las condiciones de frontera espacialmente uniforme.

Este tipo de modelos han sido utilizados también para simular los flujos de agua dulce en el archipiélago ártico canadiense (Kliem y Greenberg, 2003), en este trabajo los autores utilizaron Fundy para obtener los campos iniciales de elevación que posteriormente utilizaron para forzar el modelo pronóstico Quoddy. Sus resultados demostraron congruencia con los campos de densidad (Temperatura y salinidad) observados en campo.

Por su parte Stegmann *et al.*, 1999 y Werner *et al.*, 1999, utilizaron los campos de corriente generados con Quoddy para simular deriva de larvas de clupeidos e identificaron regiones potenciales de desove en la costa y sistemas estuarinos de Carolina del Norte. Sus resultados tuvieron gran concordancia con las observaciones en campo disponibles en las bases de datos MARMAP (Marine Resources Monitoring Assessment and Prediction) y SABRE (South Atlantic Bight Recruitment Experiment). Así mismo los campos de corrientes generados tanto con el modelo Fundy como con el modelo Quoddy han sido utilizados en repetidas ocasiones en diferentes estudios en el Georges Bank cuyos resultados han sido validados por observaciones en campo tanto de variables físicas como biológicas (Lynch y Werner., 1987; 1991; Lynch y Naimie, 1993; Werner *et al.*, 1993; Lough *et al.*, 1994; Tremblay *et al.*, 1994; Lough y Mountain., 1996; Werner *et al.*, 1996; Werner *et al.*, 2001).

2. Hipótesis

Los bancos de almeja catarina dentro de BMA mantienen un nivel aproximadamente constante de abundancia, el cual es interrumpido por pulsos que resultan:

- a) del ingreso atípico de individuos (larvas/juveniles) de la plataforma continental al interior del complejo lagunar.
- b) temperaturas que permiten su supervivencia y
- c) el asentamiento de las larvas/juveniles en localidades apropiadas.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Estudiar los mecanismos causantes de los pulsos de producción de *Argopecten ventricosus* en Bahía Magdalena.

3.2 Objetivos específicos

1. Documentar la historia de la pesquería, y explorar su papel en la generación de pulsos de producción.
2. Caracterizar el hábitat de la especie y evaluar el papel de la temperatura como causal de los pulsos de producción.
3. Investigar mediante un ejercicio de modelación hidrodinámica, los posibles mecanismos de formación de bancos de almeja en función de la circulación interna del complejo lagunar, la formación y persistencia de zonas de retención, y la interacción entre el complejo y la plataforma continental adyacente.
4. Proponer un modelo para explicar los pulsos de producción de la *Argopecten ventricosus* de Bahía Magdalena.

4. Justificación

Uno de los mayores retos de la modelación ecológica costera es la descripción de la relación que existe entre la circulación oceanográfica y la deriva larvaria de algunos organismos, especialmente de recursos con fuertes fluctuaciones de corta duración (pulsos). Ya que este comportamiento puede generar ganancias a los pescadores que los explotan, pero también fuertes problemas asociados a la equivocada inversión y generación de expectativas, derivados de la limitada capacidad de pronóstico. Una alternativa para ello es el uso de la modelación numérica que permita simular, la posible deriva larvaria bajo diferentes escenarios ambientales.

Este tipo de herramientas es especialmente útil en países que no cuentan con la infraestructura necesaria para llevar a cabo programas permanentes de monitoreo, ya que entre las bondades del modelo los resultados pueden servir para diseñar matrices de escenarios que combinen diferentes valores tanto de características ambientales (por ejemplo patrones de circulación en función de los valores de forzamiento utilizados para alimentar el modelo de circulación) como de características biológicas (localidad y temporalidad del desove).

Para el caso particular de la almeja catarina en Bahía Magdalena, el presente trabajo proporciona una herramienta nueva para explorar las hipótesis que existen respecto de los mecanismos de variabilidad, mismas que no pueden ser soportadas por el acervo de modelos y conocimiento actuales.

5. Área de estudio

El complejo lagunar Bahía Magdalena-Almejas (BMA; Figura 3) es una de las zonas costeras más importantes en el noroeste mexicano, tanto por su extensión como por su alta productividad. Se encuentra situado en la costa occidental de la península de Baja California, aproximadamente entre los 25°10' 48" a 24° 26' 24" de latitud norte, y los 112° 11' 24" a 111° 33' 00' de longitud oeste. Ocupa un área de 1,450 km² aproximadamente (CONABIO, 2004). El complejo consta de tres áreas: la parte norte conformada por una serie de canales, esteros y pequeñas lagunas que en su conjunto se conoce como la zona de canales, la parte central que es propiamente Bahía Magdalena y la parte más sureña que es Bahía Almejas. Las dos bahías se encuentran conectadas entre sí por el canal de la Gaviota, de aproximadamente 10 m de profundidad y cerca de 2.5 km de ancho. La batimetría de la zona refleja un sistema somero con las máximas profundidades cerca de la boca (La Bocana; ~40 m). Bahía Almejas tiene una profundidad promedio de 12 m y la zona de canales es en general somera (Álvarez-Borrogo *et al.*, 1975).

La parte de Bahía Magdalena presenta características más oceánicas que las otras dos, debido principalmente al intercambio de agua con el océano adyacente a través de La Bocana. La zona de canales presenta las mayores temperaturas y salinidades del complejo debido a su alta evaporación; el intercambio de agua oceánica es a través de La Boca de la Soledad en el norte y su conexión con Bahía Magdalena en el sur. Finalmente Bahía Almejas presenta un escaso intercambio con océano abierto a través del canal de Rehusa, y depende principalmente del intercambio de agua con Bahía

Magdalena a través del canal de la Gaviota. La entrada de agua oceánica a Bahía Magdalena aporta una alta cantidad de nutrientes al interior del sistema durante el flujo de marea, lo cual resulta en una elevada actividad fotosintética de carácter estacional que alcanza sus máximos valores en primavera (Sánchez-Montante, 2004), lo cual también es una característica aislada de la influencia térmica de la región oceánica adyacente a través de la boca BM según lo reportado por Álvarez-Borrego (1978) quien asoció esta característica a las condiciones típicas de surgencias. A su vez, la elevada productividad en el interior de la bahía exporta altas concentraciones de fitoplancton al océano adyacente durante el reflujó (Acosta-Ruiz y Lara-Lara, 1978). Se considera un sistema antiestuarino debido al alto índice de evaporación y al escaso aporte de aguas dulce (Álvarez-Borrego *et al.*, 1975; Sánchez-Montante, 2004).

Desde el punto de vista biológico, el complejo ha sido frecuentemente considerado como la frontera entre las condiciones templadas de la Corriente de California (CC) y el área subtropical (Parrish *et al.*, 1981). Así mismo ha sido reconocido como el límite de distribución geográfica de numerosas especies, incluyendo el límite sureño de muchas especies de invertebrados de aguas someras (Brusca y Wallerstein, 1979). Es una zona de alta productividad biológica primaria, presentando alta abundancia de microfitoplancton a lo largo del año (Nienhuis y Guerrero-Caballero, 1985; Gárate-Lizárraga *et al.*, 2000) permitiendo que altas densidades de especies tanto de importancia comercial como ecológica se concentren en la zona.

En la costa abierta de la parte occidental de la península Baja California, la plataforma continental varía considerablemente, con alrededor de 30 km de ancho en la parte norte

de Punta Abreojos, y estrechándose hacia el sur hasta la latitud del Golfo de Ulloa, donde se ensancha nuevamente hasta alrededor de los 80 km. En la parte más al sur de San Lázaro y hasta el Sur de Isla Margarita la plataforma continental nuevamente es más estrecha (~25 km) y la pendiente mucho más pronunciada (Maeda-Martínez *et al.*, 1993).

Los vientos dominantes en la zona son noroeste (hacia el sureste), aunque durante enero y febrero son principalmente oeste (hacia el este). La velocidad promedio se encuentra en los 3 ms^{-1} .

6. Metodología

6.1 Detección de los pulsos de producción

Se buscó este particular patrón de variabilidad en las 440 series de captura de la base FishStat (disponible en la página de la FAO; <http://www.fao.org>) de especies bentónicas (crustáceos, moluscos no cefalópodos y peces demersales) por región, que cuentan con capturas máximas históricas de al menos media tonelada anual, y con registros de al menos 20 años en el periodo 1950 al 2004 (consideradas en ese trabajo como pesquerías establecidas).

Se decidió considerar como pulsos aquellos eventos en que la captura se incrementara en al menos 100% de un año al siguiente, y se redujera al nivel previo antes de dos años. Para cada serie se identificaron y se contaron los pulsos a una razón de 100 años.

6.2 Historia de la pesquería

Dado que el esfuerzo de pesca determina los niveles de captura, y que además tiene el potencial de modificar los niveles de abundancia de poblaciones marinas silvestres, es importante considerar su historia. En el presente trabajo se recopiló y analizaron los datos disponibles de captura y esfuerzo, se realizó una consulta bibliográfica para documentar la historia de la pesquería y su posible influencia en la señal de pulsos en la captura, y se recogió la experiencia y conocimiento de especialistas en el recurso, a través de entrevistas.

6.3 Distribución espacio-temporal de la temperatura preferencial para almeja catrina

Se caracterizó la respuesta biológica de la almeja catarina ante la temperatura utilizando los valores de marco de actividad obtenidos por Sicard-González *et al.*, (1999). El marco de actividad se define como la diferencia aritmética entre el metabolismo activo y el estándar (Fry, 1947) y representa la energía con la que cuenta el organismo para su crecimiento, reproducción y locomoción (Thompson y Bayne, 1972; Widdows, 1973; Bayne *et al.*, 1976). A los valores de marco de actividad se les ajustó una curva de Gauss (ecuación 1), a partir de la cual se estableció una ventana de valores óptimos en la parte central de la curva (valores del modelo cercanos a 1) y dejando los mínimos y máximos subóptimos hacia los extremos (valores del modelo cercanos a 0).

$$Y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}A^2} \quad (1)$$

Donde:

$$A = \frac{T_1 - \mu}{\sigma}$$

T = Temperatura

μ = Temperatura promedio

σ = Desviación estándar de la serie de Temperatura

Los parámetros de esta función se utilizaron para transformar las series históricas de temperatura registradas dentro del complejo, reportadas por Lluch-Belda *et al.* (2000), a series de Temperatura Preferencial Estimada (TPE; adimensional, entre 0 y 1; ecuación

2). Con las transformaciones se realizaron mapas de isolíneas para documentar la distribución geográfica de la TPE en el complejo, tanto durante el año promedio como durante años climáticamente anómalos.

$$TPE = a * \exp((-b-x)^2 / (2 * c^2)) \quad (2)$$

Donde:

TPE = Temperatura Preferencial Estimada

a, b y *c* son los parámetros de la ecuación de Gauss

$$a = 1.309$$

$$b = 19.717$$

$$c = 6.611$$

x = Temperatura registrada

Los campos de temperatura preferencial se compararon con la distribución de pastos marinos (substrato adecuado para la fijación de pediveliger) de acuerdo con la información reportada en la literatura (Félix-Pico, 1993; Ramírez-García *et al.*, 2002), y a la ubicación de los bancos tradicionales.

Posteriormente se generó una serie de temperatura como el promedio (Datos de temperatura superficial del mar ERSST; Smith y Reynolds 2004), y se transformó aplicando la función de la curva de TPE para generar una serie de tiempo de condiciones térmicas propicias. La serie resultante se comparó con la información de captura.

6.4 Modelo numérico de circulación

En el presente trabajo se aplicó el modelo Fundy 6.5.1 (Lynch y Werner, 1987) con coordenadas esféricas (Greenberg *et al.*, 1998) para obtener las soluciones de circulación forzadas por viento y marea. Fundy es un modelo diagnóstico de circulación de tres dimensiones, especialmente desarrollado para zonas costeras. Se resuelven ecuaciones armónicas linealizadas en el dominio de la frecuencia, con forzamiento de mareas, condiciones barotrópicas de frontera, y/o viento, utilizando elementos finitos linealizados (Para detalles del método numérico ver anexo 1).

La viscosidad vertical (mezcla) en Fundy se especifica de manera externa (Lynch y Werner, 1987; Blanton *et al.*, 2003). Se utilizó el valor de viscosidad derivado del modelo no lineal, tridimensional y dependiente del tiempo Quoddy (Lynch y Werner, 1991; Lynch *et al.*, 1996; Blanton *et al.*, 2003) forzado con la componente M_2 en los bordes correspondientes a la parte oceánica de la malla. Este modelo utiliza un esquema de Mellor-Yamada de la parametrización de turbulencia con el rango de 2.5 (Mellor y Yamada, 1982). Como datos iniciales se especificaron el coeficiente de mezcla vertical $Nz_{(x,y,z)}$ y el coeficiente de fricción de fondo proporcional de la velocidad de fondo (U_b , rms). El modelo se corrió 20 periodos de marea para la componente M_2 , de los cuales se obtuvo un valor promedio del coeficiente de mezcla $Nz_{(x,y,z)}$ y de (U_b , rms).

6.4.1 Generación de la malla (dominio)

Fundy automáticamente genera una malla de tres dimensiones proyectando la malla horizontal inicial hacia el fondo con líneas perfectamente verticales, que son discretizadas para obtener el mismo número de elementos verticales. Éstas son conectadas horizontalmente con una topología idéntica a la malla original de dos dimensiones, creando un sistema de coordenadas sigma del tipo (x, y, σ) ; Ver anexo 1).

El dominio numérico del modelo abarca la superficie total del complejo, incluyendo la zona de canales y un cuadrante de la zona oceánica adyacente. Para ello se generó una malla de elementos finitos lineares usando "BatTri" (Smith y Ata Bilgili, 2003), que es un generador de mallas de elementos triangulares lo cual permite un mejor ajuste a la línea de costa del área de estudio que se esté investigando. Este programa se encuentra en lenguaje C, y permite la incorporación e interpolación de la batimetría real, y la edición y refinamiento de la malla. Se puede utilizar con diferentes plataformas (SIGs, Linux, y Windows a través de Matlab).

Los archivos de entrada para BatTri son tres: archivo.poly, archivo.bat y archivo.nod. El archivo *.poly contiene información de la localización geográfica (coordenadas) de los vértices de las fronteras de la malla así como su secuencia, los vértices dentro de la malla (que no son frontera) y la localización de islas en caso de que existan. El archivo *.bat contiene únicamente los valores absolutos de batimetría requeridos para la generación de la malla, y el archivo *.nod contiene únicamente la información geográfica de todos los vértices de la malla. Para obtener una descripción detallada de

estos archivos se puede consultar el manual de Triangle en:
<http://www.cs.cmu.edu/~quake/triangle.poly.html>.

Los valores de batimetría de entrada (archivo *.bat) se digitalizaron de la carta batimétrica No. 21121 Bahía Magdalena incluida Bahía Santa María, Almejas y Santa Marina, de la DMAH/TC (Defense Mapping Agency Hydrographic/Topographic Center) escala: 72270, UTM70. Para la parte sur y la zona oceánica adyacente se complementó la información con la base de datos: ETOPO2 (http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/gdas/gd_designagrid.html).

Las fronteras sólidas (continente) de la malla se generaron incorporando la línea de costa con un valor de profundidad (Z) = 0 y se utilizó un filtro móvil de 250 m para suavizar la línea de costa. El resto de las fronteras se especificaron como fronteras líquidas abiertas. Se comprobó la conexión entre cada segmento de frontera y se señalaron las islas y el continente. Con el objeto de asegurar el flujo en cada uno de los canales de la zona norte, y debido a la falta de información detallada de batimetría para algunas zonas en los canales, se añadieron vértices como nuevos puntos de batimetría a los que se les dio un valor igual al valor mas cercano registrado o mínimo de 5 m de profundidad.

Una vez que se tuvieron todas las especificaciones del polígono, se procedió a generar la primer triangulación con un ángulo mínimo de 25° y añadiendo 10,000 nodos como número máximo para el refinamiento. Se asignaron dos zonas en la malla, la primera que incluye la parte oceánica del dominio y la segunda con mayor resolución que cubre

el interior de la laguna y la zona de canales (zonas uno y dos respectivamente Figura 12).

Para cada zona de la malla se especificó el área máxima de cada elemento y se procedió a realizar el refinamiento para obtener la malla final. El primer refinamiento se aplicó solamente a los elementos cuya profundidad fue mayor de 20 m. Para el segundo y tercer refinamiento, se utilizó un área constante para los elementos entre 20 y 10 metros de profundidad y en segundo caso para los elementos entre 10 y 0 m de profundidad. Para obtener una descripción detallada de los procesos de refinamiento se puede consultar el manual de Triangle en: <http://www.cs.cmu.edu/~quake/triangle.poly.html>

6.4.2 Forzamiento por mareas

Las únicas observaciones de mareas existentes para la zona son los constituyentes armónicos del mareógrafo que operó en Puerto San Carlos (24° 47' N, 112° 07' W) disponibles en el Centro de Investigación Científica y Estudios Superiores de Ensenada (CICESE; <http://www.cicese.mx>). Considerando la insuficiencia de información existente, se decidió utilizar el resultado de modelos globales de mareas como condiciones de frontera para forzar el modelo. La solución utilizada fue la del modelo TPXO.6 desarrollado por Egbert *et al.* (1994) y modificado por Egbert y Erofeeva (2002). TPXO.6 es un modelo inverso de mareas que asimila la información de nivel del mar derivada de las observaciones del sensor TOPEX/Poseidon. La elevación (amplitud y fase) fue especificada a lo largo de las fronteras abiertas de la malla. Se incluyeron las componentes armónicas M_2 , S_2 , N_2 , K_1 y O_1 . El análisis

armónico del nivel del mar se obtuvo utilizando la técnica desarrollada por Foreman (1977) implementada en el código de MatLab `t_tide` (Pawlowicz *et al.*, 2002). La marea residual (Z_0) se obtuvo por separado con una simulación no lineal forzada únicamente con la componente M_2 , como primera aproximación ya que $M_2 \approx 35\%$ del radio.

6.4.3 Forzamiento por viento y Aproximación Barotrópica de la Corriente de California (ABCC)

Se utilizaron los valores de viento del NCEP/NCAR Reanalysis Project, (<http://www.cdc.noaa.gov/>) que utiliza un avanzado sistema de análisis y pronóstico para la asimilación de datos sobre la base de observaciones desde 1948. Los datos tienen una resolución espacial de 1.9° de latitud y longitud (Betts *et al.*, 1996; Kalnay *et al.*, 1996). Se evaluó el valor promedio de los dos puntos más cercanos al dominio del modelo. El viento es predominantemente noroeste con una intensidad máxima de 5ms^{-1} .

El efecto del viento se separó en dos componentes: 1) El viento medio (dominante) mensual usado como forzamiento básico; y 2) Viento periódico simple estimado para incluir el efecto de la brisa marina, ya que según los resultados de un análisis espectral aplicado a ambas componentes del viento se encontró un espectro de frecuencia diaria (Figura 6) por lo que lo consideramos incluir como efecto de brisa marina o viento periódico, para ello se utilizó un método similar al empleado por Werner *et al.* (1993) en estudios previos en las islas Baleares.

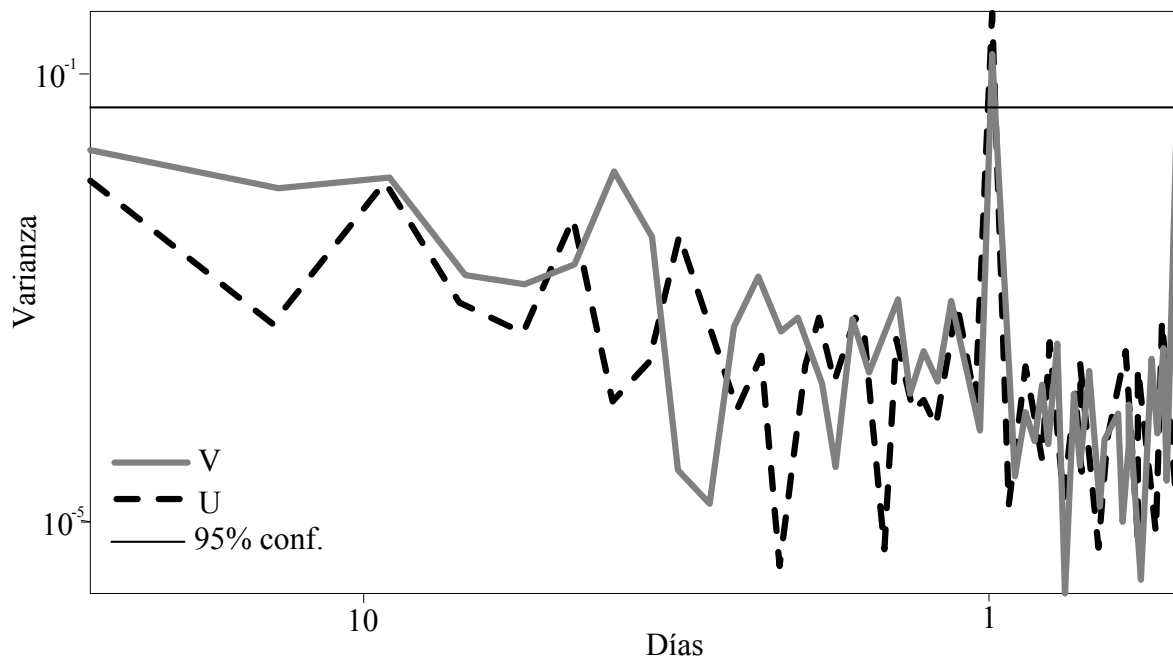


Figura 6.- Análisis espectral para las componente de viento U y V, mostrando un espectro de alta frecuencia con periodicidad diaria.

Se simuló el flujo principal de la Corriente de California especificando la elevación barotrópica media en los bordes de la malla, de manera similar a como lo hicieron Lynch *et al.*, (1992) al estudiar la circulación en el Golfo de Maine en respuesta al forzamiento de la corriente de Labrador y flujos asociados. Como primera aproximación se asumió que la corriente está en balance barotrópico y se especificó el gradiente de elevación correspondiente a un transporte de 0.1 Sv distribuido a través de 100 kms^{-1} sobre la plataforma continental. La escasez de observaciones hidrográficas en la región condiciona la validación de esta aproximación.

6.4.4 Validación del modelo Fundy

Además de los armónicos obtenidos para las componentes de marea, se realizó una comparación de las velocidades de flujo y reflujos registradas en campo y reportados

por Sánchez-Montante (2004) con las velocidades simuladas por el modelo para los mismos puntos. Se empleó un solo valor de simulación para la comparación (valor promedio de flujo y reflujo para cada punto), dado que Fundy trabaja en el dominio de frecuencias y no distingue entre flujo y reflujo, a que la variación en las elipses no se recupera dada la limitación lineal del modelo, y porque las observaciones en campo cubrieron un periodo muy corto (4 días).

Los resultados se obtuvieron utilizando Fundy mediante el paquete *t_tide* (Pawlowicz *et al.*, 2002) en Matlab. Para un ciclo completo de marea por 30 días, empleando para ello los valores de Amplitud (A) y Fase (Φ) para los componentes de velocidad U y V para M_2 donde la velocidad en tiempo queda expresada de la siguiente manera:

$$U(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi) \quad (3)$$

Donde ω es la frecuencia de M_2 (1/12.42 horas). Lo mismo para la componente V .

6.5 Modelo lagrangiano

La trayectoria de las partículas se obtuvo utilizando el modelo DROG3D, que permitió la simulación de deriva de partículas a partir de campos armónicos de velocidad impuestos en una malla tridimensional de elementos finitos (Blanton, 1995). Esta herramienta tiene la ventaja de permitir la simulación de múltiples pasos cada uno con múltiples frecuencias en una sola corrida. Así por ejemplo, si los campos de flujo derivados del viento están dados como variaciones mensuales, Drog3D, leerá esos

archivos y simulará las trayectorias de las partículas usando la secuencia de los campos de flujo especificados por el usuario en un solo archivo tipo *.din, y cada grupo de componentes de velocidad y parámetros de tiempo llamados "pasos" se correrá de manera secuencial. El archivo *.din contiene la información de todos los componentes de velocidad y parámetros de trayectoria, factores escalares, nodos, criterio de error, y las coordenadas iniciales de las partículas.

Este modelo se corrió utilizando los campos armónicos generados con el modelo Fundy descrito en la sección anterior.

6.5.1 Selección de forzamientos

Con la finalidad de explorar los mecanismos de mayor influencia en la dispersión de las partículas y generar los campos armónicos correspondientes para posteriormente ser utilizados en los experimentos de deriva, se probó el efecto individual de cada uno de los forzamientos utilizados en el modelo hidrodinámico (viento medio noroeste, viento periódico, ABCC, marea (M_2) y marea residual (Z_0) y la suma de todos los anteriores. Para ello se eligieron dos cuadrantes: uno en la boca de Bahía Magdalena (-112.057° W, 24.505° N; -112.008° W, 24.545° N) y otro más situado sobre la plataforma continental (-112.3° W, 25.13° N; -112.5° W, 24.92° N). En estos cuadrantes se sembraron 100 partículas a una profundidad de 5 m y se corrieron las simulaciones por 25 días, con pasos de tiempo de 24 horas.

6.5.2 Experimentos de deriva

6.5.2.1 Estimación de retención dentro del complejo lagunar

Para evaluar las zonas de retención dentro del complejo lagunar se sembraron diez mil partículas a una sola profundidad (1 m) en un cuadrante que cubrió la totalidad del complejo BMA. Se registró la ubicación diaria de las partículas (graficadas en pasos de tiempo de cuatro días). Posteriormente el interior del complejo lagunar se dividió en una cuadrícula de 0.01° por lado y se integró el número de partículas que permaneció dentro de cada cuadrante en cada paso de tiempo. Con la información obtenida se generaron los mapas de retención en la zona.

6.5.2.2 Intercambio de partículas entre la Zona de canales, Bahía Magdalena y Bahía Almejas

Para evaluar el intercambio de partículas entre ambos cuerpos del complejo, se decidió dividir al complejo BMA en tres zonas principales: 1) Zona de canales, 2) Bahía Magdalena y 3) Bahía Almejas. Para la zona 1 que es la más somera, se sembró un cuadrante con 3200 partículas en dos profundidades (0.5 y 5 m). Para la zona 2 y 3 se sembró un cuadrante con 8000 partículas en cada zona con cinco diferentes profundidades. Para cada zona se hicieron simulaciones con tres escenarios diferentes variando la intensidad del viento noroeste: viento débil (1.8 ms^{-1}), promedio (3 ms^{-1}) y viento fuerte (5 ms^{-1}) mientras que el resto de los forzamientos se mantuvieron constantes (M_2 , Z_0 , ABCC y viento periódico).

6.5.2.3 Estimación de la importación al complejo lagunar

Para evaluar la posibilidad de que partículas sembradas en la parte oceánica llegaran a entrar y permanecer en el complejo lagunar, se corrieron experimentos de deriva de partículas por periodos de 25 días. Las simulaciones se forzaron de manera independiente con viento medio, viento periódico, ABCC, M_2 , Z_0 de M_2 y la suma de todos los forzamientos mencionados. Igual que en los experimentos anteriores se hicieron simulaciones con tres escenarios diferentes de viento: viento débil (1.8 ms^{-1}), promedio (3 ms^{-1}) y viento fuerte (5 ms^{-1}) mientras que el resto de los forzamientos se mantuvieron constantes. Se corrieron un total de 54 casos en diferentes cuadrantes de 0.125° de lado que en su conjunto cubrieron el total de la zona oceánica adyacente siguiendo la isolínea de los 200 m, así como parcialmente el interior del complejo lagunar. En cada cuadrante se sembraron 600 partículas en 6 diferentes profundidades (0.5, 5, 10, 15, 20 y 40 m) y se registró la posición final de cada una de ellas al concluir el periodo de simulación.

Una vez que se evaluó la intrusión de partículas dentro del complejo lagunar BMA, se seleccionó uno de los cuadrante que presentó intrusión de partículas sin estar contiguo a la línea de costa, y se realizaron 25 simulaciones más manteniendo constantes los forzamientos utilizados y variando el viento medio tanto en dirección como en intensidad, abarcando una matriz de combinaciones desde viento norte hasta completamente este y con intensidad desde 0.5 a 4 ms^{-1} . Cuando se tuvieron los resultados se contabilizó la cantidad de partículas que entraron al complejo para cada escenario.

Con los resultados de escenarios de viento y su valor asociado de entrada de partículas de la plataforma al interior del complejo, se identificaron las combinaciones de velocidad y dirección que más favorecen la entrada de partículas, y se reconstruyó una serie de tiempo que reflejó estas condiciones, como la “distancia” (D) entre cada valor mensual de viento (U_i, V_i) y el punto donde se encontró la máxima entrada de partículas (U_{max}, V_{max} ; ecuación 4). Los valores de distancia de los meses invernales (noviembre a mayo; cuando se presentan las condiciones térmicas adecuadas) se compararon con las series de producción y temperatura.

$$D = \sqrt{(U_{max}-U_i)^2 + (V_{max}-V_i)^2} \quad (4)$$

Posteriormente se extrajeron los vientos invernales de la serie de “distancias” y se comparó con la serie de anomalías térmicas reportada por Sicard-González *et al.*, 2006 para Bahía Magdalena, con los años ENSO reportados y con la serie de capturas de almeja catarina en la zona.

7. Resultados

7.1 Detección de los pulsos de producción

La tabla 1 muestra que el patrón de pulsos (de la manera en que se definió en este trabajo), se encuentra en una alta proporción de las poblaciones analizadas. Para las especies de crustáceos se encontró que el 23% de los casos presentaron una razón de más de 5 pulsos/100 años. Para el grupo de peces se observó el 34% de los casos con altos pulsos y para el grupo de moluscos no cefalópodos el porcentaje de especies con pulsos de producción fue mayor con un 42%, representando por 33 especies de 78 analizadas dentro de las cuales, se encuentra la almeja catarina *Argopecten ventricosus*, con una razón de más de 9 pulsos/100 años.

Tabla 1.- Selección de especies que presentan el mayor número de pulsos/100 años. Se presentan separadas según el phylum al que pertenecen y el resumen correspondiente. Se resalta con fondo gris y en negritas el número de pulsos para la almeja catarina *Argopecten ventricosus*.

Grupo	Especie	Pulsos/ 100 años	Resumen
Crustáceos	<i>Scylla serrata</i>	8.6	Total de especies 103
	<i>Penaeus latisulcatus</i>	7.4	Total de casos 24
	<i>Panulirus gracilis</i>	6.3	
	<i>Sicyonia brevirostris</i>	5.9	Proporción (%) 23
	<i>Penaeus kerathurus</i>	5.4	
Peces demersales	<i>Notothenia squamifrons</i>	16	Total de especies 234
	<i>Pseudolithus brachygnathus</i>	12	Total de casos 79
	<i>Saurida undosquamis</i>	10.8	
	<i>Spondylisoma cantharus</i>	9.4	Proporción (%) 34
	<i>Lithognathus mormyrus</i>	8.8	
Moluscos no cefalópodos	<i>Anadara granosa (Océano Indico)</i>	13.6	Total de especies 78
	<i>Crassostrea gigas</i>	10.8	Total de casos 33
	<i>Argopecten ventricosus</i>	9.5	
	<i>Anadara granosa (Pacífico Noroeste)</i>	7.3	Proporción (%) 42
	<i>Crassostrea iredalei</i>	7.1	

7.2 Historia de la pesquería

En la Tabla 2 se presenta la información disponible compilada de esfuerzo pesquero para la zona de BMA. Comprende el periodo de 1996 a 2006 e incluye exclusivamente el número de embarcaciones participantes, sin especificar viajes de pesca e inmersiones de los buzos que participan, por lo que resulta imposible estandarizar el esfuerzo. Sin embargo, cabe mencionar que desde hace diez años el número de embarcaciones se ha mantenido aproximadamente constante (290), debido a que se ha limitado, desde entonces, el otorgamiento de permisos nuevos (Hernández-Lizardi Subdelegación de Pesca, com. pers.).

Tabla 2.- Captura, CPUE y número de embarcaciones participantes en la extracción comercial de la almeja catarina en BMA durante el periodo 1996-2005.

Año	Captura (t callo)	Embarcaciones	CPUE (t/emb.)
1996	1700	296	5.7432
1997	154	282	0.5461
1998	231	334	0.6916
1999			
2000			
2001	202	289	0.6990
2002	0.16	250	0.0006
2003	61.82	265	0.2333
2004	167.90	293	0.5730
2005	187.67	250	0.7507

De acuerdo a las entrevistas realizadas en el presente trabajo, en el complejo BMA se presentan de manera semi-permanente los bancos de la zona de canales, los de La Herradura y la Uña de Gato, mientras que los bancos en otras áreas son ocasionales o raros, incluyendo los de Bahía Almejas. Estos bancos ocasionales pueden llegar a presentar mayor densidad y ser más importantes para la pesquería, que los bancos semi-

permanentes, tal como sucedió en la temporada 1989-1990 en que además de los bancos semi-permanentes se explotaron grandes bancos que se formaron a lo largo de Loma Amarilla y el Blanquizcal, en la parte norte de Isla Margarita (Figura 7). Existen elementos para suponer que estos bancos se desarrollaron a partir de un desove de primavera-verano posiblemente de bancos situados en la plataforma continental adyacente a BMA y que los juveniles entraron al complejo con ayuda de los patrones de corrientes, asentándose allí hasta alcanzar la talla comercial (Massó-Rojas CRIP-La Paz, com. pers.).

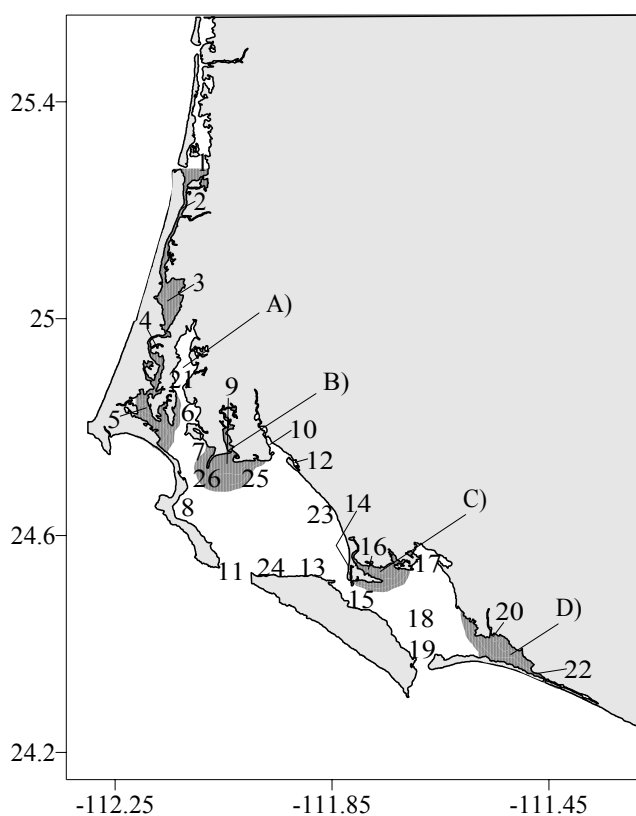


Figura 7.- Zonas en las que se ha reportado presencia de sustrato preferencial para el asentamiento de post-larvas de almeja catarina (contornos grises) y localización de algunos bancos almejeros dentro del complejo lagunar Bahía Magdalena-Almejas y puntos de referencia. A) La Florida – Libertad (zona de canales); B) Estero San Buto y área adyacente; C) Estero Salinas y D) La zona Sureste de Bahía Almejas (Puerto Chale y Rancho Bueno). Los números corresponden a sitios de referencia: 1) Boca de Soledad, 2) Puerto López Mateos, 3) La Florida, 4) Vuelta del Diablo, 5) La libertad, 6) San Carlos viejo, 7) Puerto San Carlos, 8) Puerto Magdalena, 9) estero San Buto, 10) estero El Chisguete, 11) La Bocana, 12) El Médano Amarillo, 13) Cerro Blanco, 14) Las Torres, 15) Puerto Cortes, 16) Estero Salinas, 17) Laguna Palmer, 18) Almejas, 19) La Poza, 20) Puerto Chale, 21) Bajo Banderitas, 22) Rancho Bueno, 23) La Loma Amarilla, 24) El Blanquizcal, 25) La Herradura, 26) La Uña de Gato.

Dada la intensa actividad pesquera que se desarrolla en la zona, existe un monitoreo permanente de las poblaciones naturales desde hace al menos 10 años, por parte del Centro Regional de Investigaciones Pesqueras (CRIP), y pescadores (Massó-Rojas CRIP-La Paz, com. pers.). Sin embargo, el monitoreo de los bancos tanto tradicionales como de los no tradicionales se realiza desde dentro del complejo, por lo que el descubrimiento de grandes bancos se relaciona más con la formación repentina de dichos bancos que con la exploración de nuevas áreas de pesca.

7.3 Distribución espacio-temporal de la temperatura preferencial para almeja catrina

La figura 8 muestra el ajuste del modelo de Gauss ($r = 0.97$) a los valores de marco de actividad observados en el laboratorio por Sicard-González *et al.*, (1999). De acuerdo con la curva, la temperatura de óptimo desarrollo para la especie se encuentra alrededor de los 20° C.

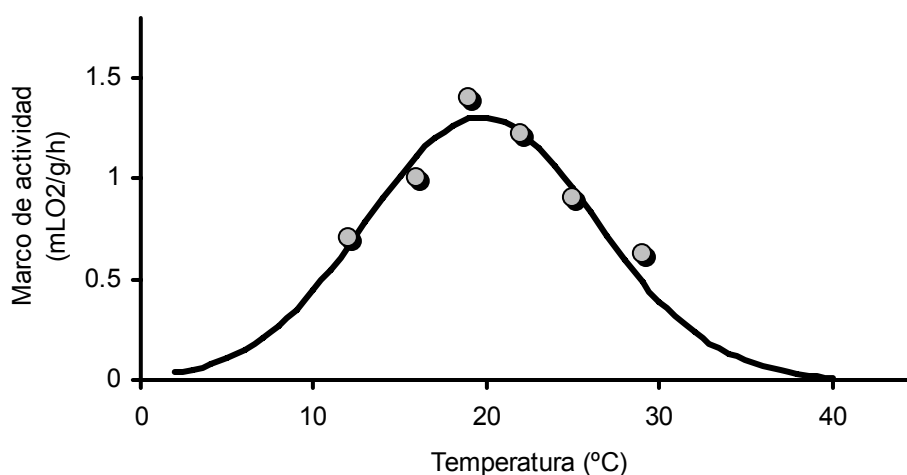


Figura 8.- Curva teórica de Gauss (línea continua) ajustada a los valores de marco de actividad (puntos) observados en laboratorio reportados por Sicard-González, 1999.

En la figura 9 se muestra el patrón estacional de temperatura dentro del complejo según los datos de Lluch-Belda *et al.*, (2000). Existe una diferencia de $\sim 9^{\circ}\text{C}$ entre los valores mínimos (invierno-primavera) y máximos (verano-otoño), con una diferencia de hasta 3.7°C durante julio con los datos del exterior del complejo.

Al comparar la temperatura preferencial estimada (TPE; a partir de la curva de la Figura 7) con los patrones de temperatura, se observa que al interior del complejo lagunar la temperatura de la primera mitad del año permanece muy cercana al óptimo de la especie (20°C), y cambia abruptamente a partir de junio (Figura 9).

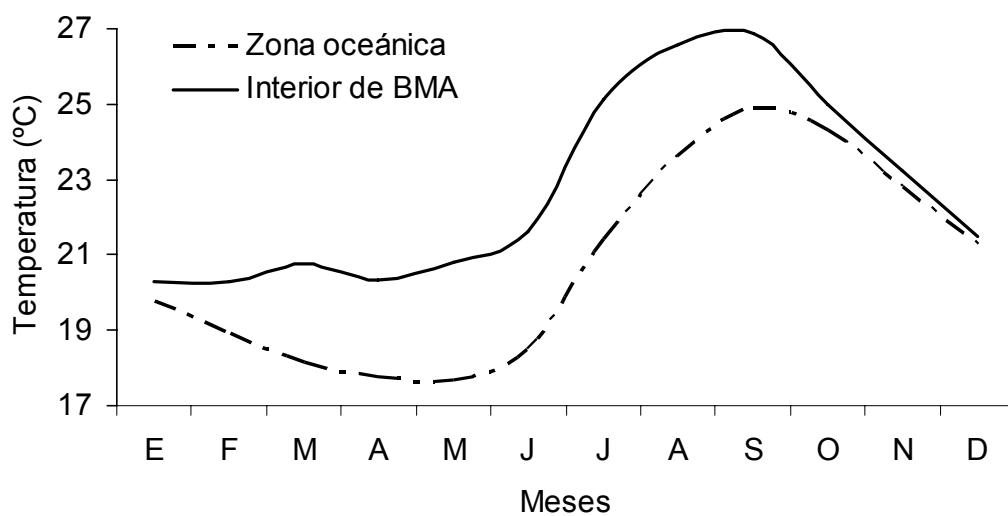


Figura 9.- Patrón estacional de la temperatura superficial del mar (SST) durante un año promedio, para el interior del complejo lagunar Bahía Magdalena-Almejas (línea continua) y en la zona oceánica adyacente (línea punteada).

La transformación de los registros históricos de temperatura del interior de BMA con la función de TPE, muestra que espacialmente (Figura 10) se presentan condiciones adecuadas (valores de TPE superiores a 0.7) durante los meses de diciembre a mayo en

casi en toda la zona. La parte central de Bahía Magdalena presenta siempre valores de la TPE mayores a 0.6, mientras que para la parte central de Bahía Almejas los valores en septiembre llegan a ser incluso menores a 0.4, y en la zona de canales disminuye significativamente, también en verano-otoño.

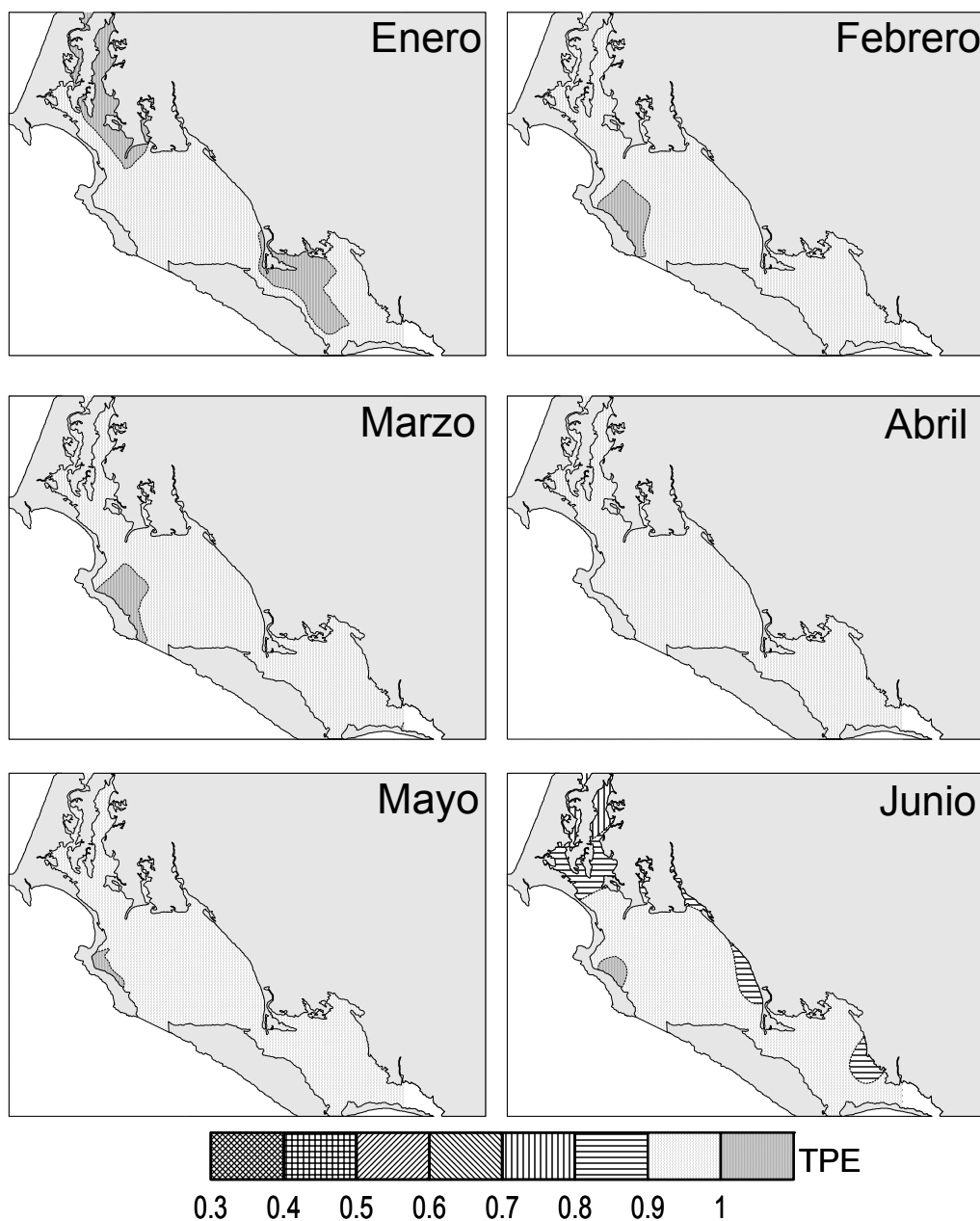


Figura 10.- Distribución espacial de la Temperatura Preferencial Estimada (TPE) en el complejo lagunar Bahía Magdalena-Almejas, en un año promedio (Continua...)

A partir de noviembre la zona se homogeniza, con valores por arriba de 0.6 en todo el complejo.

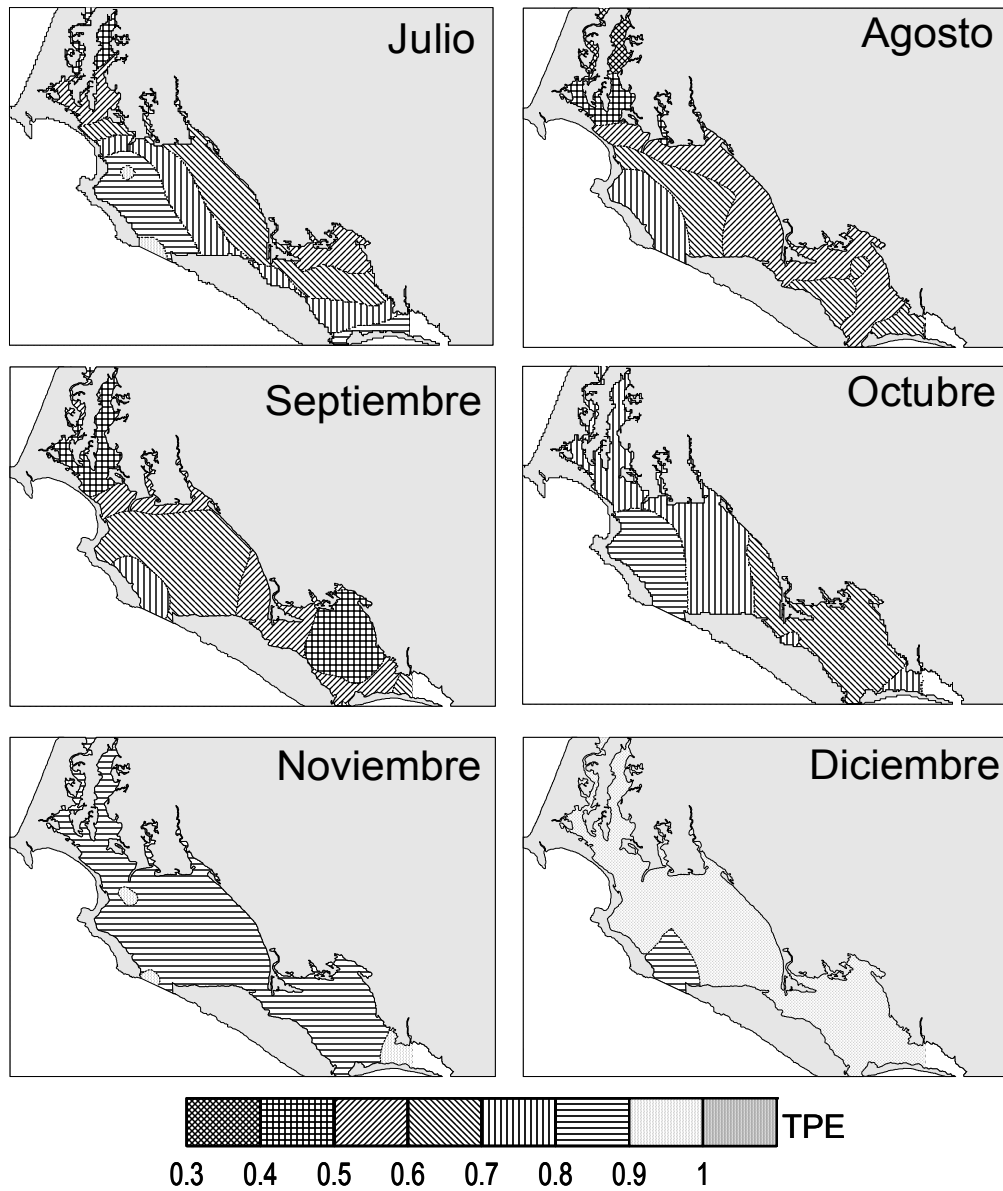


Figura 10.- (Continuación) Distribución espacial de la Temperatura Preferencial Estimada (TPE) en el complejo lagunar Bahía Magdalena-Almejas, en un año promedio.

La distribución de la temperatura preferencial coincide tanto con la distribución de bancos almejeros tradicionalmente explotados, como con zonas con sustrato adecuado

para fijación de postlarvas (pastos marinos) durante los mismos periodos (de diciembre a mayo), como se muestra en la figura 7, donde se observa la ubicación de los pastizales de acuerdo a observaciones puntuales de otros autores (Felix-Pico, 1993): A) La Florida – Libertad (zona de canales); B) Estero San Buto y área adyacente; C) Estero Salinas y D) La zona sureste de Bahía Almejas (Pto. Chale y Rancho Bueno).

Este comportamiento cambia interanualmente. En la figura 11 se muestran los mapas de isolíneas de TPE para los años 1982-83 y 1988-89 en comparación con los valores del promedio histórico (1950-2002). Se eligieron estos años por considerarse entre los más extremos del periodo. Se observa que durante el evento El Niño los valores de TPE fueron más bajos que el promedio histórico, destacando una separación muy clara entre el área de B. Magdalena y B. Almejas, en donde debido a su poca interacción con el área oceánica adyacente, los valores de TPE permanecieron ~ 0.8 mientras que en B. Magdalena la clara influencia oceánica influyó para aumentar la temperatura hasta TPE ~ 0.7 . En el año Niña en cambio los valores de TPE fueron óptimos en toda el área.

Se aprecia que históricamente los alrededores de la laguna Palmer, en la porción noreste de Bahía Almejas presentan valores óptimos de TPE, llegando a aumentar el área durante años fríos; así mismo se observa un núcleo cerca de la Bocana constantemente influenciado por el agua oceánica adyacente, que afecta la porción central de Bahía Magdalena. En eventos cálidos en cambio, el núcleo noreste de Bahía Almejas llega a desaparecer por completo homogenizándose con el resto de la bahía y con la parte sureste de Bahía Magdalena.

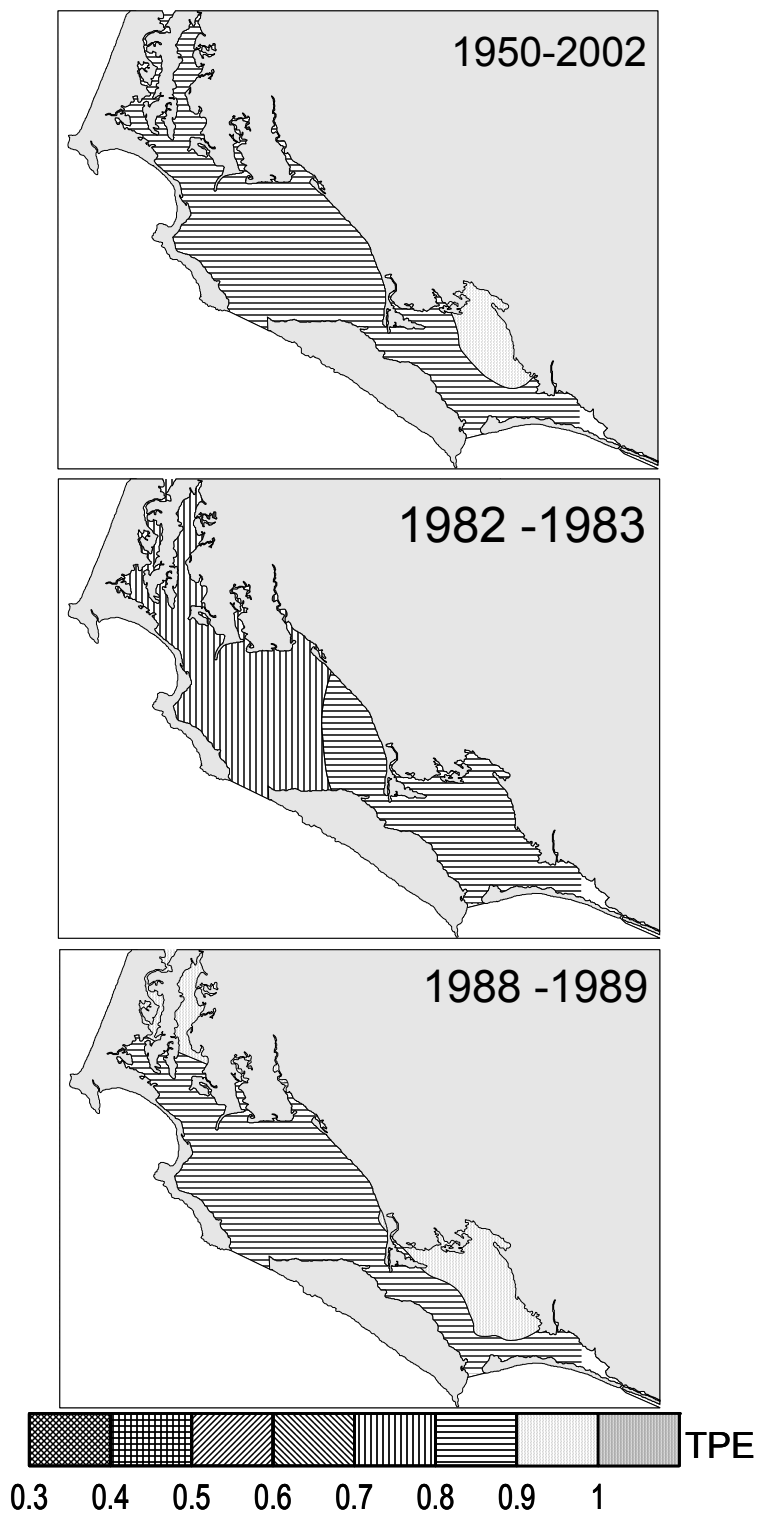


Figura 11.- Distribución espacial de la Temperatura Preferencial Estimada (TPE) del promedio histórico (panel superior) y de las anomalías térmicas en un periodo de dos años: El Niño 82-83 (panel del centro) y La Niña 88-89 (panel inferior).

7.4 Modelo numérico de circulación

7.4.1 Generación de la malla (dominio)

En la figura 12 se muestra la malla de elementos finitos triangulares elaborada a partir de los valores de batimetría. Se incluye la zona de canales al norte y el cuadrante del océano adyacente. La malla consta de 16,133 nodos y 27,090 elementos en la dimensión horizontal, con 21 nodos en la vertical por cada nodo horizontal. La resolución aumenta hacia la costa y disminuye hacia mar abierto. En la vertical, la disposición de los nodos es tal que las capas límites superiores e inferiores tienen una resolución mínima de 1 metro, con la disposición de los nodos aumentando en el interior de la columna de agua.

7.4.2 Forzamiento por mareas

Los valores para cada una de las componentes de marea obtenidas con el modelo Fundy muestran similitud con los valores observados en la estación local de San Carlos (Tabla 3). Aunque las simulaciones (Fundy) sobreestiman la amplitud de las componentes semidiurnas en un 10 a 20%.

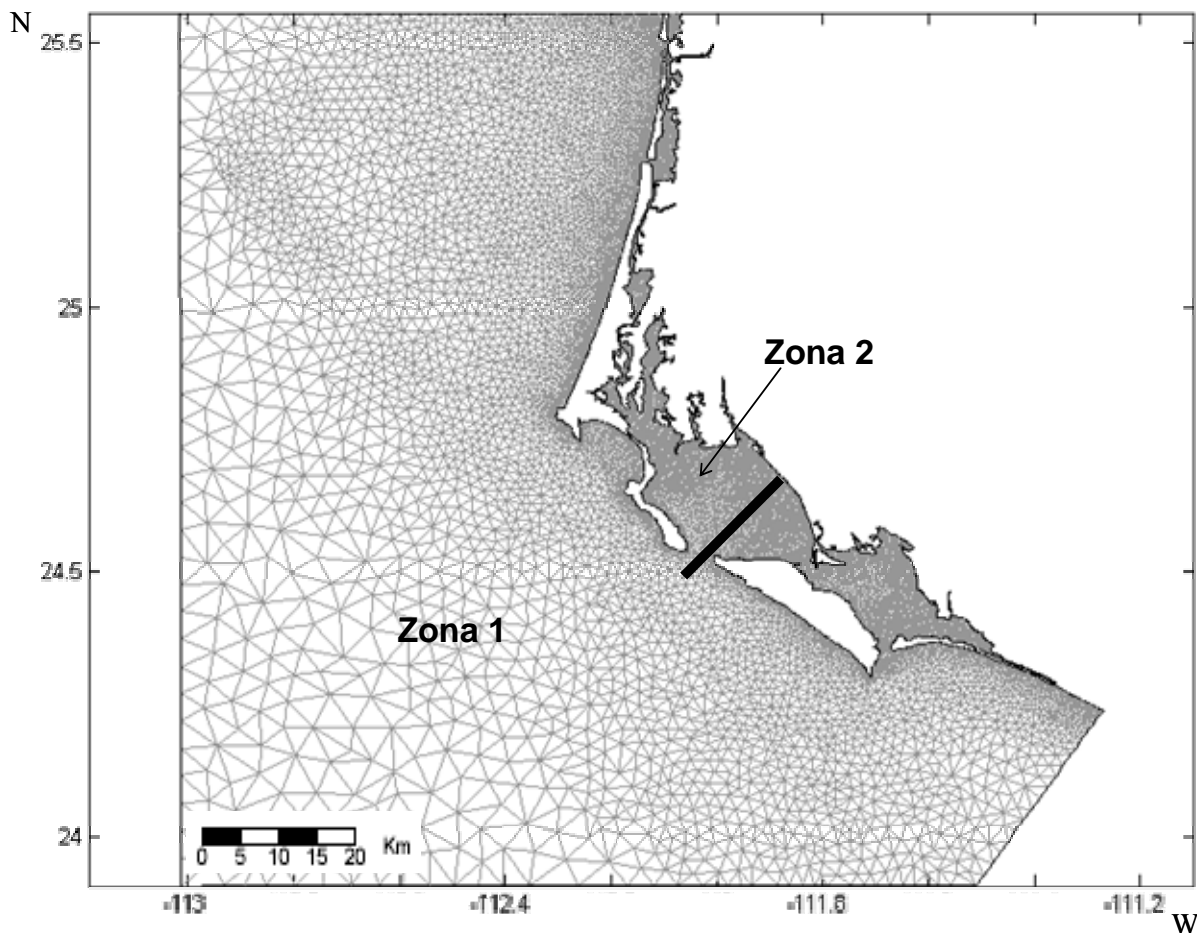


Figura 12.- Malla computacional de elementos finitos triangulares, elaborada para el complejo lagunar de Bahía Magdalena-Almejas. El dominio incluye la zona de canales y el cuadrante oceánico adyacente. Se muestra las zonas 1 y 2 delimitadas por la resolución de los elementos (zona 1: parte oceánica con menor resolución, zona 2: interior de la bahía con mayor resolución) y el transecto perpendicular a la costa del que se hará referencia mas adelante.

A partir de aquí solamente se hará referencia a la componente semidiurna lunar M_2 , ya que por si misma representa \approx el 35% de la variabilidad por marea, y por ser la que caracteriza principalmente al tipo de marea de la región de estudio que es de régimen semidiurno, los resultados obtenidos para las componentes S_2 , N_2 , K_1 y O_1 se presentan en el anexo 2.

Tabla 3.- Valores observados (Mareógrafo de la estación San Carlos, B.C.S.) y estimados con el modelo lineal Fundy de las componente armónicas de marea para la zona de estudio.

	M2		S2		N2		O1		K1	
	Amp.	Fase	Amp.	Fase	Amp.	Fase	Amp.	Fase	Amp.	Fase
Observados	0.55	112	0.31	121	0.12	103	0.27	196	0.18	182
Simulados	0.63	115	0.36	123	0.15	99.1	0.28	195	0.18	180

Las elipses de orientación e intensidad de la componente M_2 se presentan en la figura 13a. Aquí se observa una reorientación e intensificación en las áreas cercanas a las bocas (p.e. La Bocana) con una elongación de las elipses. Los máximos valores se encuentran en la zona de canales. En la figura 13b se presenta la amplitud y fase observándose una amplificación significativa de la señal al interior del complejo lagunar, con valores máximos en las inmediaciones de San Carlos viejo.

La velocidad de marea residual Z_0 (de la componente de marea M_2 ; Figura 14) presenta características complejas dentro del complejo lagunar con una marcada intensificación en las bocas. El flujo en las zonas oceánicas someras frente a Bahía Magdalena muestra una convergencia hacia dentro de la Bocana, mientras que un flujo con dirección hacia la parte oceánica se observa en el centro de la Boca. En el interior de Bahía Magdalena junto a la Bocana se observan dos giros con direcciones opuestas.

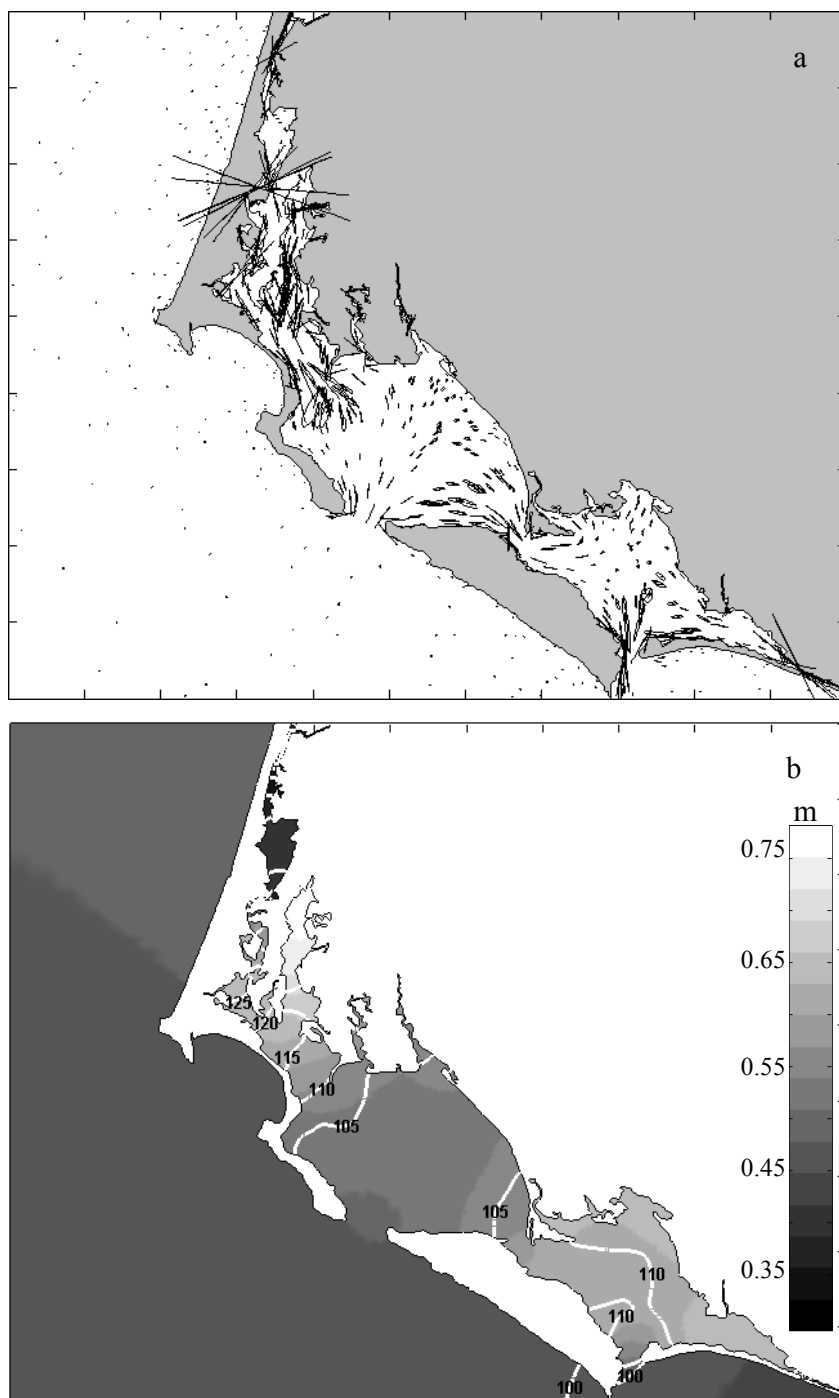


Figura 13.- a) Elipses de intensidad y orientación para la componente de marea M_2 , sobre el complejo lagunar Bahía Magdalena-Almejas (BMA). b) Elevación y fase de la componente de marea M_2 en el complejo Bahía Magdalena-Almejas (BMA).

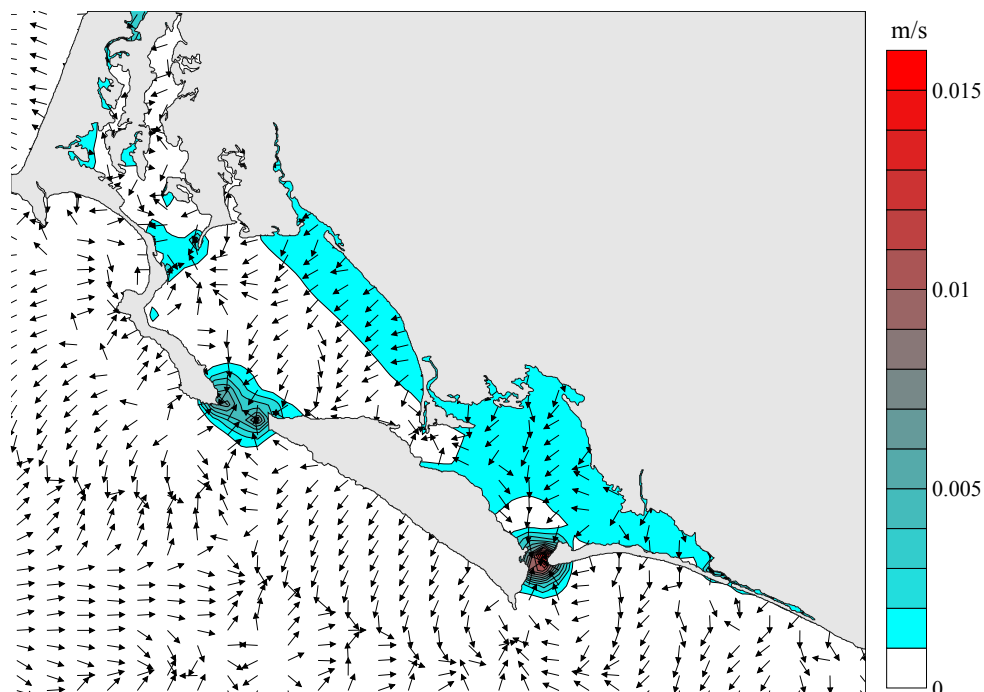


Figura 14.- Circulación promedio vertical de la marea residual Z_0 de M_2 en el complejo lagunar Bahía Magdalena-Almejas (BMA).

7.4.3 Forzamiento por viento y Aproximación Barotrópica de la Corriente de California (ABCC)

La solución del modelo forzado con viento medio (noroeste) y la aproximación barotrópica de la Corriente de California (ABCC) se presenta en la figura 15. En la capa superficial (figura 15a) el viento noroeste produce una respuesta tipo Ekman con flujo hacia el sur-sureste, que sobrepone a la señal de la Corriente de California. La velocidad vertical integrada (figura 15b) muestra la combinación del flujo a lo largo de la costa causado por el viento medio, y la respuesta barotrópica de la ABCC. La principal característica del campo de elevación es el gradiente de sur a norte dentro del complejo lagunar asociado con la ABCC (figura 15c). Los valores mínimos y máximos en el

campo de las elevaciones se aprecian cerca de San Carlos y en parte sur de Bahía Almejas respectivamente.

El efecto local de la brisa marina se abordó con la simulación del viento periódico (figura 16). En la figura 16a, se muestra la distribución espacial de las elipses de velocidad en superficie obtenidas para este forzamiento, observándose valores reducidos en la parte interna de la laguna, especialmente en las zonas más someras y protegidas de Bahía Magdalena y Bahía Almejas, con máximas magnitudes (alrededor de 0.1 ms^{-1}) en las áreas oceánicas, mientras que el efecto de esta misma variable integrada en la vertical (figura 16b) muestra mayor influencia en las zonas someras del complejo BMA, con una marcada intensificación en la zona de canales, el canal de la Gaviota y en la parte sur de B. Almejas.

Con la finalidad de observar la existencia de un intercambio de masas de agua entre la zona oceánica y el interior de la laguna, se diseñó un perfil perpendicular a la línea de costa (ver Figura 12), los resultados se muestran en la figura 17 por separado para cada forzamiento empleado.

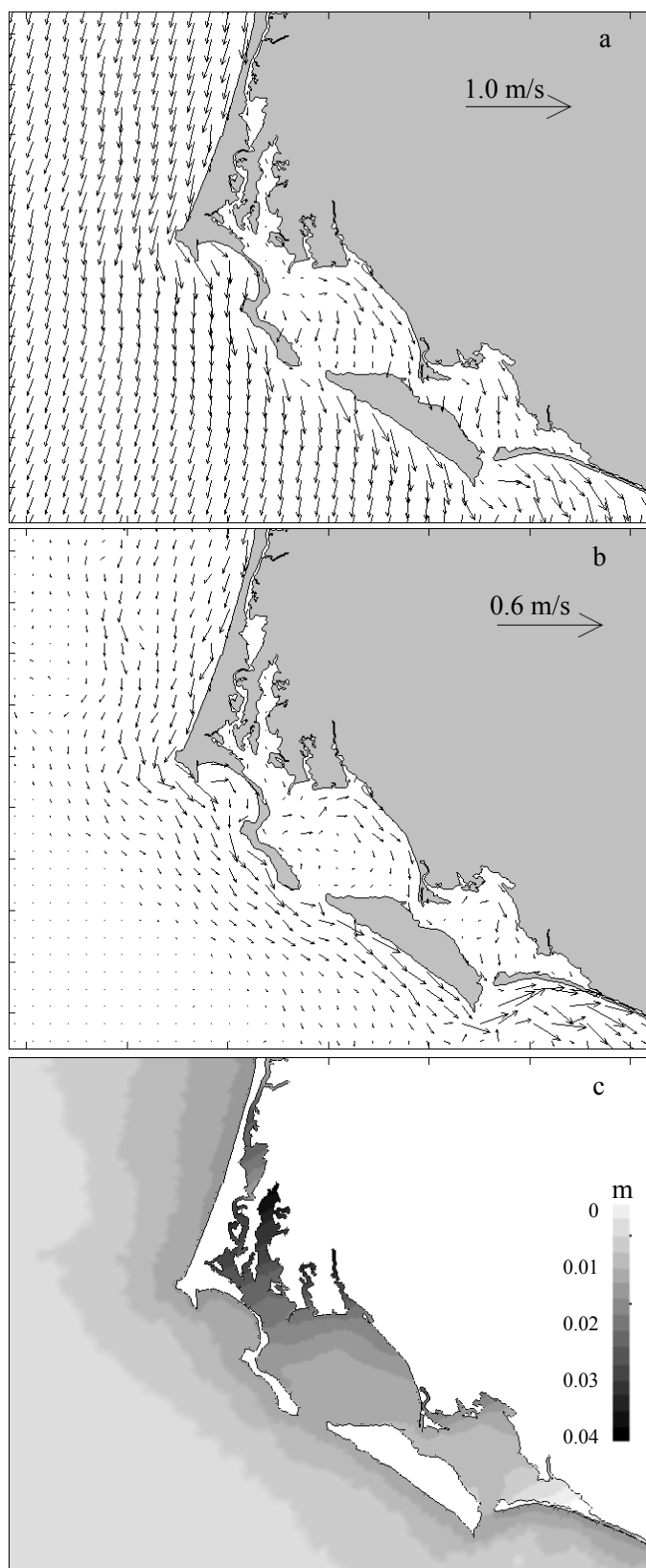


Figura 15.- Patrones de circulación obtenidos con el modelo Fundy utilizando viento medio de febrero y la Aproximación Barotrópica de la Corriente de California (ABCC) como forzamientos. a) Velocidad en superficie; b) Velocidad integrada en la vertical y c) Elevación (m)

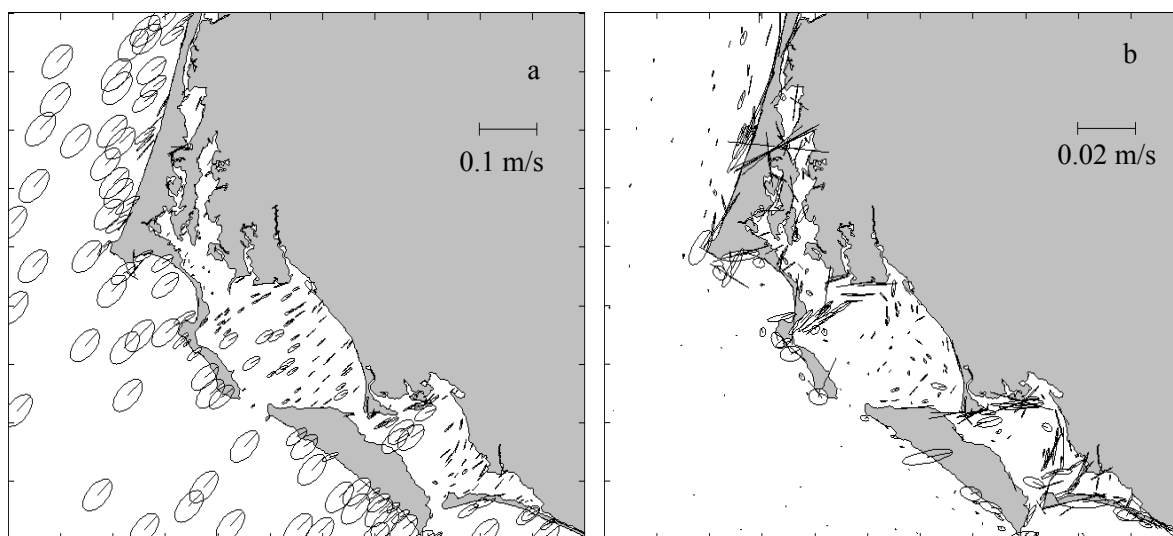


Figura 16.- Elipses de intensidad de las corrientes forzadas con el viento periódico, sobre el complejo lagunar Bahía Magdalena-Almejas (BMA) a) en superficie y b) velocidad integrada en la vertical.

En la figura 17a se muestran los flujos obtenidos por forzamiento de la ABCC, en gris se presenta el flujo correspondiente a lo largo de la costa y en color los flujos perpendiculares a la línea de costa (rojo hacia adentro y azul hacia afuera de la bahía). El fuerte flujo que se observa a lo largo de la costa disminuye en la vertical, debido a que la naturaleza barotrópica del forzamiento, no corresponde a la señal real baroclínica de la Corriente de California. A pesar de esta limitante, los flujos perpendiculares a la línea de costa, así como la presencia de surgencias de fondo son consistentes con las observaciones reales en la zona (Álvarez-Borrego *et al.*, 1975; Zaitsev *et al.*, 2003; Sánchez-Montante, 2004). En la figura 17b se muestra el flujo resultante usando los valores de viento medios durante febrero (favorables para la formación de surgencias en la región). Se reconoce formación de surgencias cerca del fondo, el flujo hacia la costa

se observa en toda la columna de agua cerca de la Bocana, y flujo hacia mar abierto en la superficie tanto en la parte oceánica como en el interior de Bahía Magdalena. La figura 17c presenta los flujos residuales, hacia la costa en el interior de Bahía Magdalena y hacia mar abierto en la parte oceánica cercana a la Bocana.

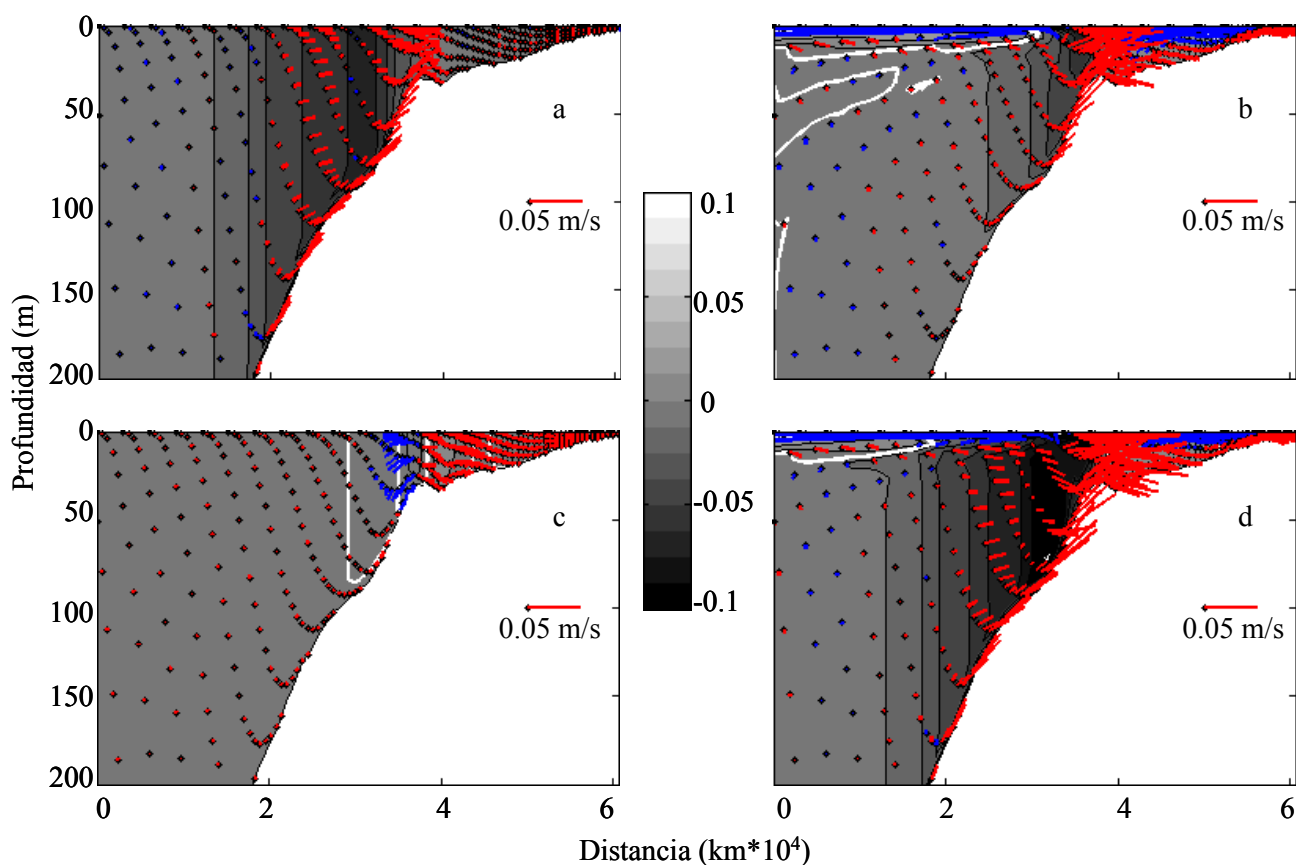


Figura 17.- Transporte a través de la Bocana. Comparación entre los diferentes forzamientos no periódicos a lo largo del transecto perpendicular a la costa: a) Aproximación Barotrópica de la Corriente de California (ABCC); b) Viento medio de febrero; c) Marea residual de M_2 ; d) La combinación de todos. Los contornos grises representan el flujo hacia el sur a lo largo de la costa. Los contornos blancos corresponden a flujo 0 a lo largo de la costa. El flujo perpendicular a la costa está representado por los vectores de color: rojo indica flujo hacia la costa y azul indica flujo hacia mar abierto.

El flujo total resultado de la combinación de todas las forzantes mencionadas se muestra en la figura 17d. Sus características principales son: 1) flujo hacia la costa en casi toda la columna de agua en los 15 km más cercanos a la Bocana en la parte oceánica; 2) presencia de surgencias cerca del fondo en la misma región; 3) un flujo a lo largo de la plataforma en la misma región; 4) un flujo hacia fuera de la costa en la superficie (5-10 m) en la parte oceánica excepto en la cercanía con la Bocana; 5) un flujo hacia la costa en toda la columna de agua entre los 5 y 10 km más cercanos a la Bocana dentro de Bahía Magdalena; y 6) un flujo hacia afuera de la costa (excepto cerca del fondo) desde la línea de costa hasta los 5 - 10 km cerca de la Bocana. El máximo transporte hacia la costa ocurre cerca de la Bocana entre los 20 y los 40 m.

7.4.4 Validación del modelo Fundy

En la Tabla 4 se muestran los valores de velocidad máxima y media (promedio de flujo y reflujos) observados en campo y los obtenidos con el modelo así como la excursión máxima y media para los mismos puntos. Se observa que las diferencias menores se obtuvieron para la Bocana mientras que las máximas diferencias las encontramos en San Carlos.

Tabla 4.- Comparación de las velocidades máximas y medias de corriente observadas en campo y las simuladas con el modelo Fundy.

		vel. max. (m/s)	vel. media (m/s)	excursion max. (m/s)	excursion media (m/s)
Bocana	Observados	0.22	0.15	3.13	2.21
	Simulados	0.24	0.17	3.39	2.36
San Carlos	Observados	0.49	0.34	6.98	4.77
	Simulados	0.51	0.39	7.30	5.55
Canal Gaviota	Observados	0.34	0.19	4.7	2.71
	Simulados	0.29	0.21	4.14	3.02

Por su parte, los valores para cada una de las componentes de marea obtenidas con el modelo Fundy muestran buena similitud con los valores observados en la estación local de San Carlos (Tabla 2), aunque las simulaciones (Fundy) sobreestiman la amplitud de las componentes semidiurnas en un 10 a 20%, los valores de fase son bastante cercanos (diferencias menores al 5%). Por su parte, las simulaciones no lineales (Quoddy) mejoraron las estimaciones para las componentes semidiurnas (1-1.5%) manteniendo una acertada representación de la fase. Dado que uno de los factores limitantes es la falta de información precisa de batimetría, el utilizar los valores de marea obtenidos con un modelo más complejo en el dominio del tiempo como Quoddy no resulta significativo, por lo que para realizar la caracterización de la circulación en esta región se emplearon los resultados obtenidos con las simulaciones lineales de Fundy (ver también Werner *et al.*, 1999).

7.5 Modelo lagrangiano

7.5.1 Selección de forzamientos

Para continuar con esta parte de resultados se emplearon los campos armónicos obtenidos con el modelo Fundy, y se utilizaron para evaluar por separado la influencia de cada uno de los forzamientos en la dispersión de partículas. Señalando las diferencias observadas en el desplazamiento de las partículas según el forzante aplicado y la suma de los mismos.

Los resultados mostraron que el viento medio y la ABCC son los factores que mayor influencia tuvieron en el desplazamiento de las partículas tanto para el cuadrante de la plataforma (Figura 18) como para el cuadrante situado en la Bocana (Figura 19). Por su parte para el caso del cuadrante de la plataforma, la influencia de la marea (M_2) y la marea residual (Z_0 de M_2) es mínima en comparación con las partículas puestas a derivar en La Bocana, donde las intensidades de corriente provocadas por marea son mayores. Finalmente se observó que de manera individual el viento periódico fue el forzamiento que menor influencia tuvo sobre el desplazamiento de las partículas en ambos cuadrantes, sin embargo, este forzamiento en conjunto con el viento medio cobra importancia en la posición final de las partículas en el plano longitudinal, principalmente en el interior del complejo BMA.

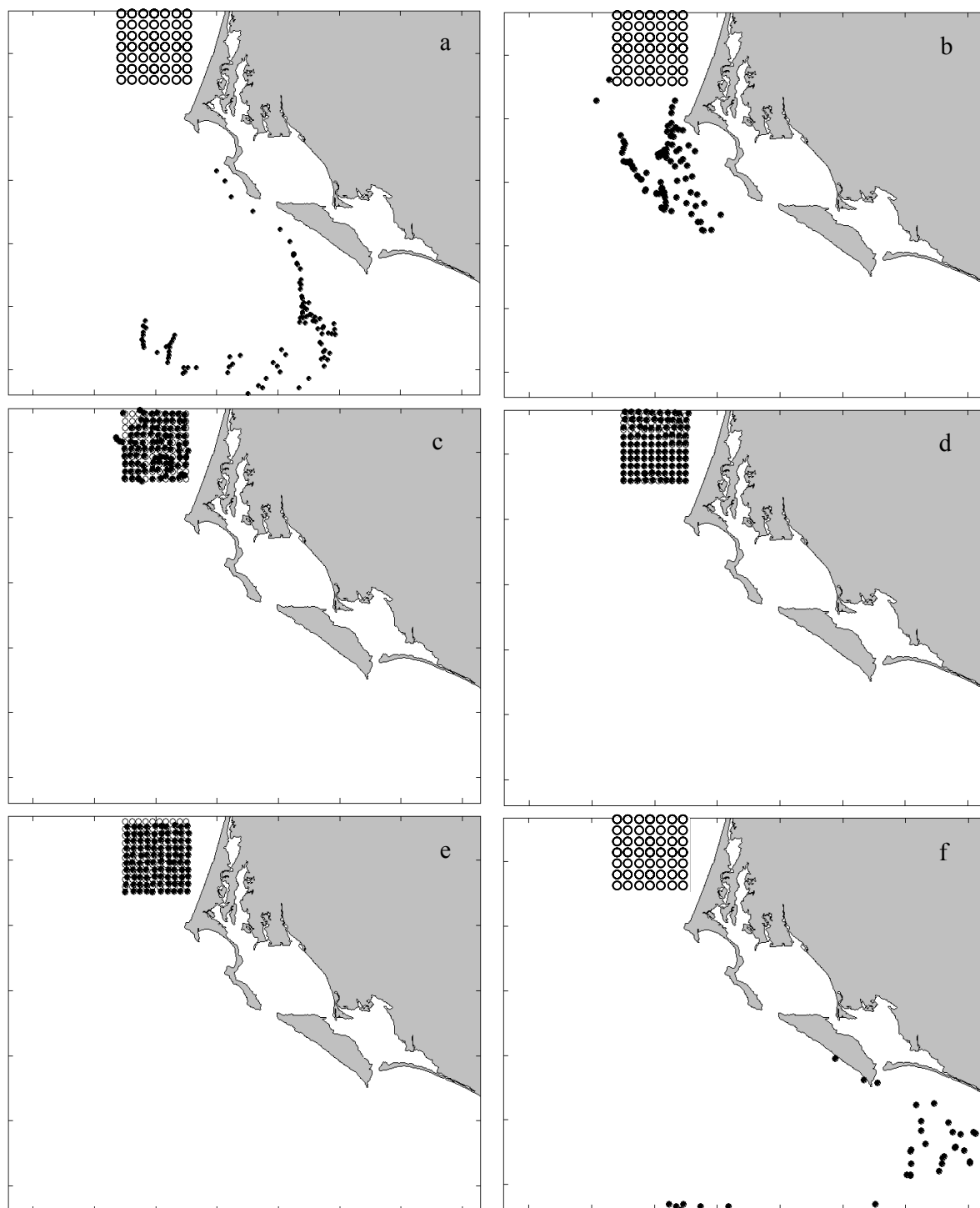


Figura 18.- Comparación entre el desplazamiento de las partículas aplicando los diferentes forzamientos, para un cuadrante en la plataforma continental del área de estudio. Los círculos marcan la posición inicial de las partículas y los puntos negros la posición final; a) Viento medio noroeste, b) Aproximación Barotrópica de la Corriente de California (ABCC), c) M_2 , d) Z_0 de M_2 , e) Viento periódico y f) Suma de todas las anteriores.

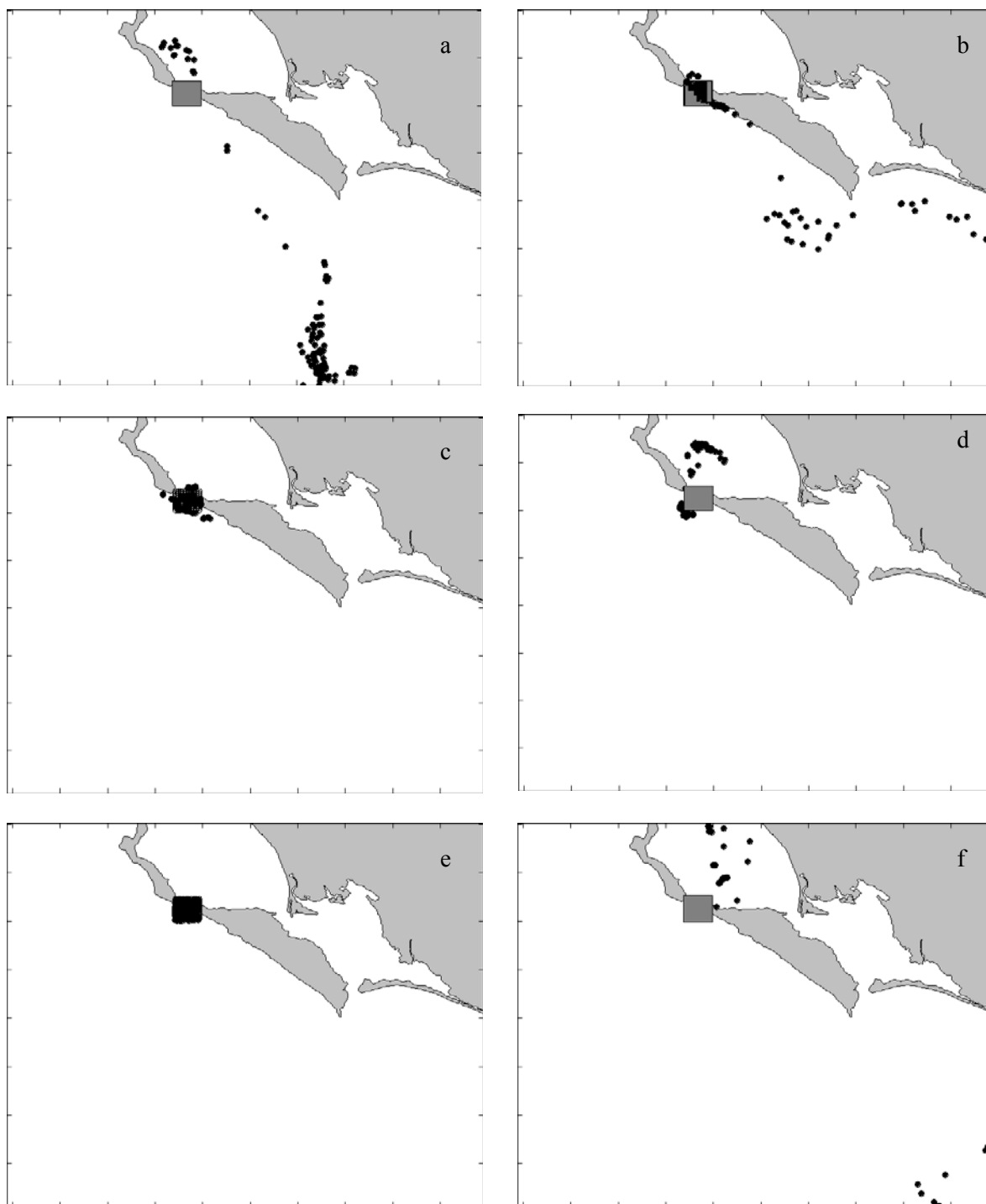


Figura 19.- Comparación entre el desplazamiento de las partículas aplicando los diferentes forzamientos, para un cuadrante en la Boca de B Magdalena. El cuadro gris marca la posición inicial de las partículas y los puntos negros la posición final; a) Viento medio noroeste, b) Aproximación Barotrópica de la Corriente de California (ABCC), c) M_2 , d) Z_0 de M_2 , e) Viento periódico y f) la suma de todas las anteriores.

7.5.2 Experimentos de deriva

7.5.2.1 Estimación de retención dentro del complejo lagunar

En la figura 20 se muestran los resultados de la caracterización de zonas de retención de partículas dentro del complejo, según el modelo de deriva. Se muestran mapas de concentración de partículas en pasos de tiempo de cuatro días. Las zonas de mayor concentración incluyen las áreas someras a lo largo de la parte sur de Bahía Almejas, las zonas someras a lo largo de Isla Margarita dentro del complejo lagunar y áreas específicas en la parte norte del complejo. La acumulación se da en parches, especialmente en las áreas del norte. La concentración máxima se registró en la porción norte de Isla Margarita. Respecto al tiempo, se observó que el mayor movimiento de partículas se presentó durante los primeros seis días, de tal manera que a partir del día siete las partículas permanecieron en el mismo sitio hasta el final del experimento, debido a que las estructuras oceanográficas presentes en el área funcionan como mecanismos de retención.

7.5.2.2 Intercambio de partículas entre la Zona de canales, Bahía Magdalena y Bahía Almejas

Se hicieron experimentos de intercambio de partículas dentro del complejo con la idea de explorar la comunicación entre bancos, si se daba en un sólo sentido o era recíproca y su intensidad, en función de distintas condiciones de circulación.

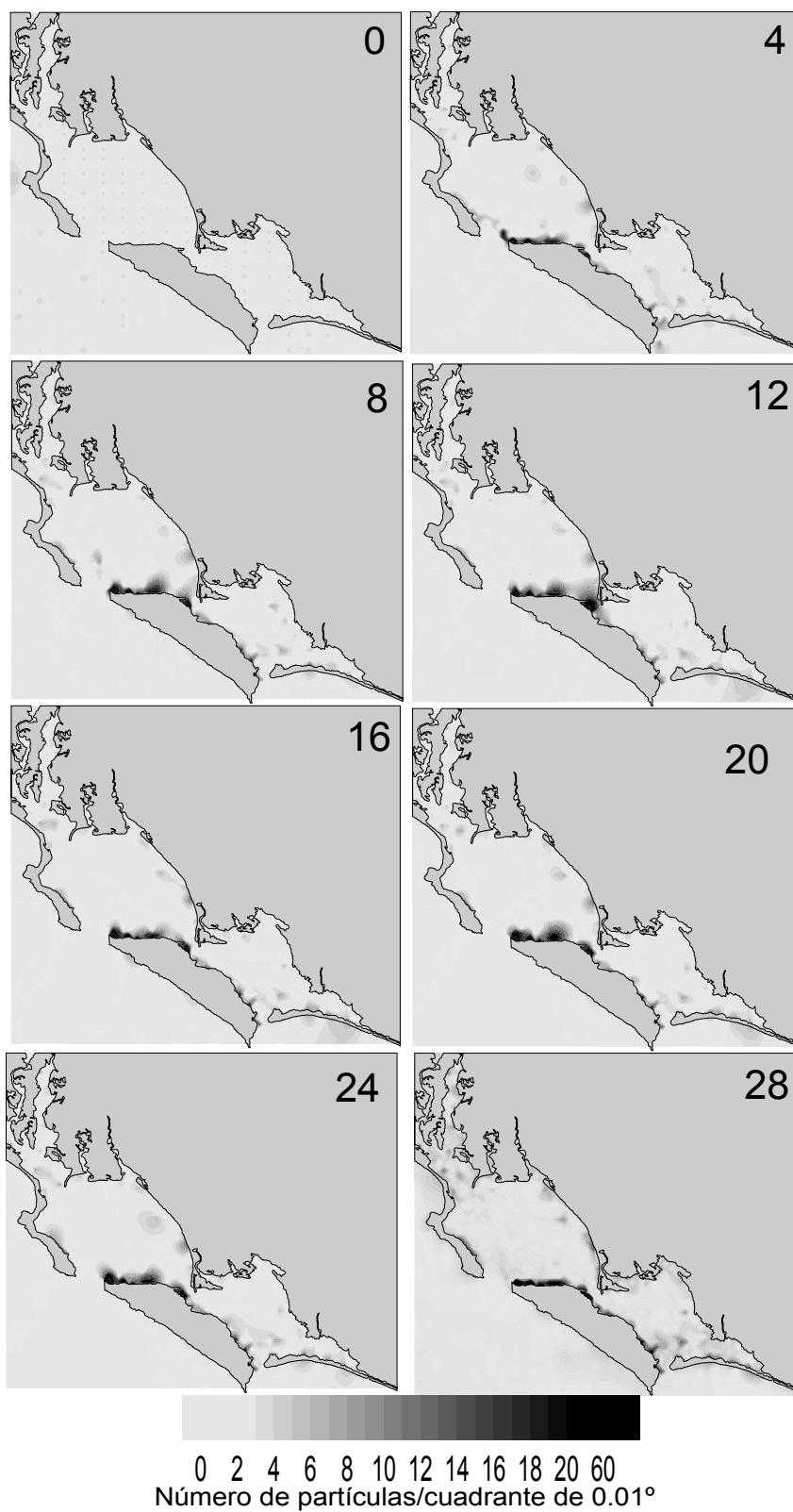


Figura 20.- Áreas de retención. Concentración de partículas pasivas puestas a derivar en una distribución homogénea a 1 m de profundidad. Los mapas se presentan en intervalos de 4 días.

Se consideraron tres zonas: 1) Zona de canales, 2) Bahía Magdalena y 3) Bahía Almejas y tres escenarios de viento (viento débil 1.8 ms^{-1} , promedio 3 ms^{-1} y viento fuerte 5 ms^{-1}).

Las zonas sembradas se muestran en las figuras 21, 22 y 23. Cabe mencionar que tanto la zona de canales (Figura 21) como la de Bahía Magdalena (Figura 22), cubren áreas en las que se encuentran asentados los bancos almejeros de importancia semi-permanentes, por lo que estos sitios se pueden tomar como indicadores de zonas de desove de la almeja catarina. En cambio, el área de Bahía Almejas (Figura 23) sólo se forman bancos ocasionalmente.

En la zona 1 (Fig. 21) se encontró que el desplazamiento de partículas hacia otras zonas es prácticamente nulo ante los tres escenarios de viento incluyendo el escenario de viento fuerte (Fig. 21c); sin embargo, se aprecia una dispersión de las partículas que tiende a concentrarse en las inmediaciones de La Florida, La Vuelta del Diablo, La Libertad, San Carlos viejo, al norte del Bajo Banderitas, y los esteros de San Buto y El Chisguete.

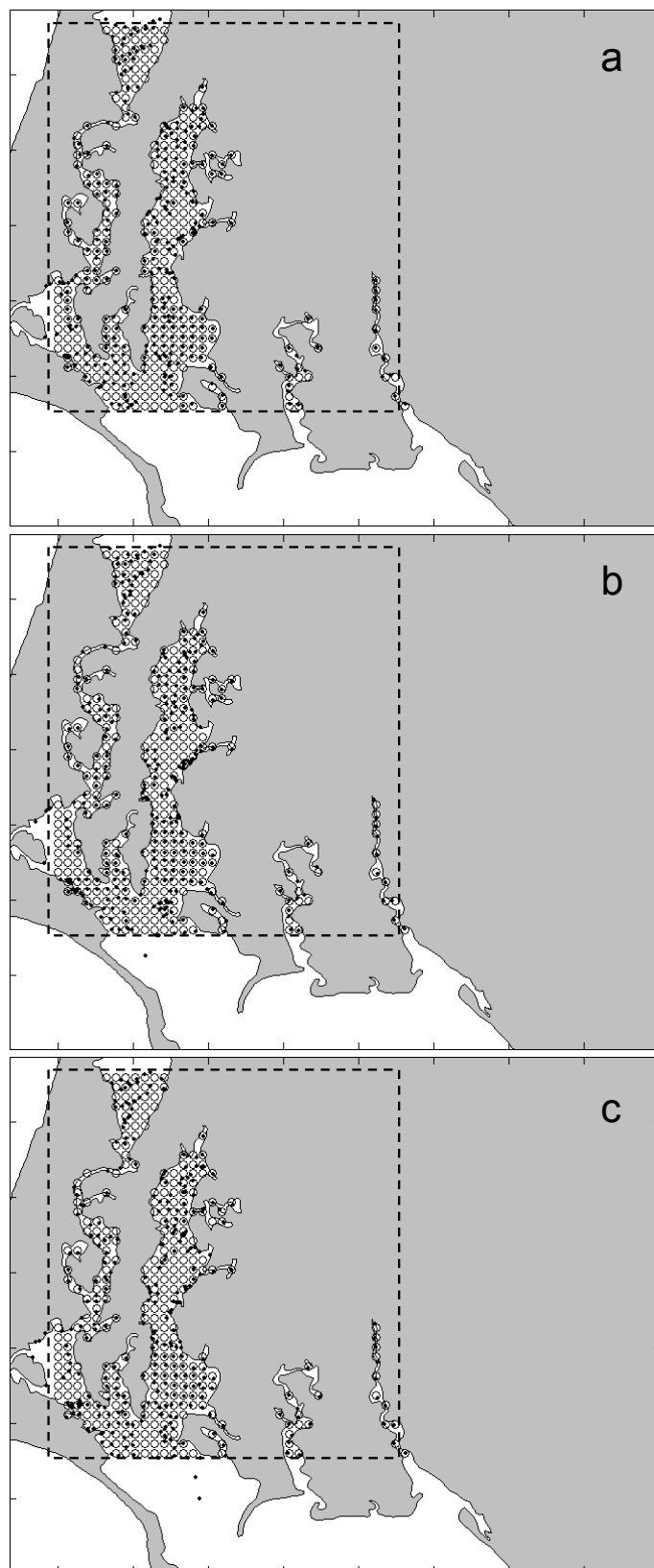


Figura 21.- Dispersión de partículas en la zona de canales del complejo lagunar Bahía Magdalena-Almejas, probando tres escenarios de viento Noroeste: a) viento débil (1.8 m s^{-1}); b) viento medio (3 m s^{-1}) y c) viento fuerte (5 m s^{-1}).

En la zona 2 (porción norte de Bahía Magdalena; Fig. 22), se observó que en condiciones de viento débil (Fig. 22a), el desplazamiento de las partículas fue muy limitado, permaneciendo más del 99% dentro del complejo y apenas unas pocas alcanzaron a cruzar el canal de la Gaviota.

A pesar de ello se aprecia la misma tendencia de las partículas a concentrarse alrededor de Puerto San Carlos, los esteros San Buto, el Chisguete y toda la zona del Médano Amarillo. Se observó la retención de partículas en la porción norte de la isla Margarita se mantiene además de otra zona de retención en Puerto Magdalena y la parte sureña de la isla Magdalena. Para las condiciones de viento promedio (panel b) se observó que la mayoría de las partículas permaneció en Bahía Magdalena, alrededor del 10% salieron hacia la parte oceánica por la boca de Bahía Magdalena y aproximadamente un 22% pasaron a la porción occidental de Bahía Almejas a través del canal de la Gaviota. Se observa también una concentración de partículas en las inmediaciones de los esteros San Buto, el Chisguete y en toda la porción del Médano Amarillo, cerca de la Bocana y en toda la porción norte de la isla Margarita, lo que concuerda con lo encontrado en el experimento de retención (Figura 20).

En la misma zona, en el panel c de la figura 22 se aprecia mayor dispersión asociada al escenario de viento más intenso (5 ms^{-1}). Alrededor del 45% de partículas permanecieron dentro de Bahía Magdalena, manteniendo los patrones de retención observados en los dos casos anteriores, cerca de la mitad de las partículas pasaron a Bahía Almejas a través del canal de la Gaviota, cubriendo casi todo el área pero con una tendencia a concentrarse en el estero Salinas y la Laguna Palmer.

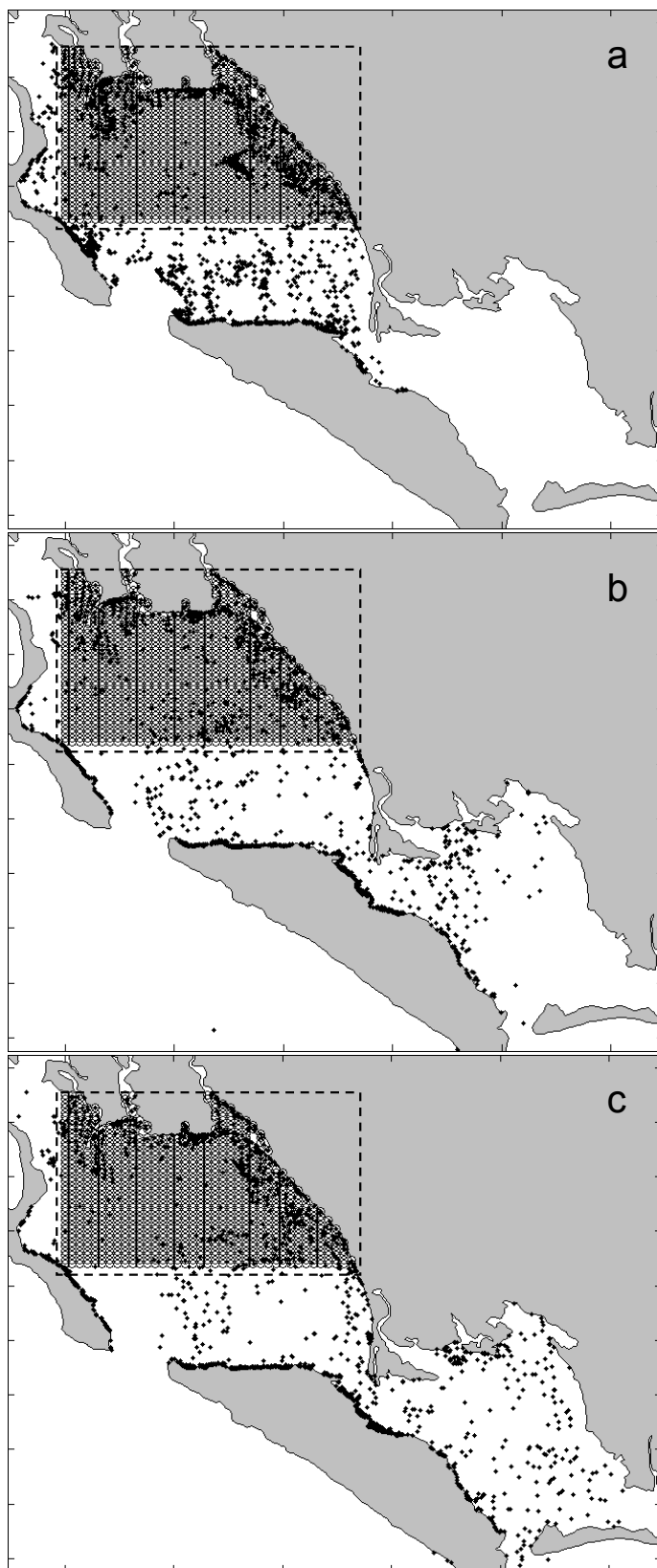


Figura 22.- Dispersión de partículas en la porción norte de Bahía Magdalena, probando tres escenarios de viento Noroeste: a) viento débil (1.8 m s^{-1}); b) viento medio (3 m s^{-1}); y c) viento fuerte (5 m s^{-1}).

Aproximadamente el 14% de las partículas salieron hacia la parte oceánica por las principales bocas del complejo, (La Bocana en Bahía Magdalena y el canal de Rehusa en Bahía Almejas).

La figura 23 muestra los resultados obtenidos para la zona tres (Bahía Almejas). En el primer panel, correspondiente al viento débil (Fig. 23a) se aprecia el mismo patrón de concentración descrito anteriormente solo que notoriamente más denso debido a que el 99.9% de las partículas permanecieron dentro de la Bahía y sólo unas pocas salieron por el canal de Rehusa desplazándose hacia el sur no más de 25 km. En el panel b de condiciones de viento promedio (3 ms^{-1}), se encontró que aproximadamente el 15% de las partículas salieron de la bahía por el canal de Rehusa desplazándose primero hacia el sureste y posteriormente al suroeste, alcanzando algunas el límite de la malla. A pesar de que una porción considerable de partículas se encuentra en el centro de la bahía, se puede apreciar una tendencia a concentrarse en la parte este del estero Salinas, en las inmediaciones de la Laguna Palmer y su parte sur hasta Puerto Chale. Así mismo se observa una concentración en la parte que rodea el norte del canal de Rehusa en la zona conocida como Almejas, en La Poza cerca de la isla Margarita y en la porción noroccidental de isla Creciente. Finalmente para el tercer escenario correspondiente al viento fuerte (Fig. 23c) el 72% de las partículas permaneció dentro del complejo mientras que el 28% restante salieron hacia la parte oceánica por el canal de Rehusa. Las partículas que quedaron dentro fueron consistentes en el patrón de concentración, notándose solamente un ligero incremento en la porción noroccidental de la isla Creciente. Algunas partículas se desplazaron hasta la porción más oriental del complejo lagunar, cerca de Rancho Bueno.

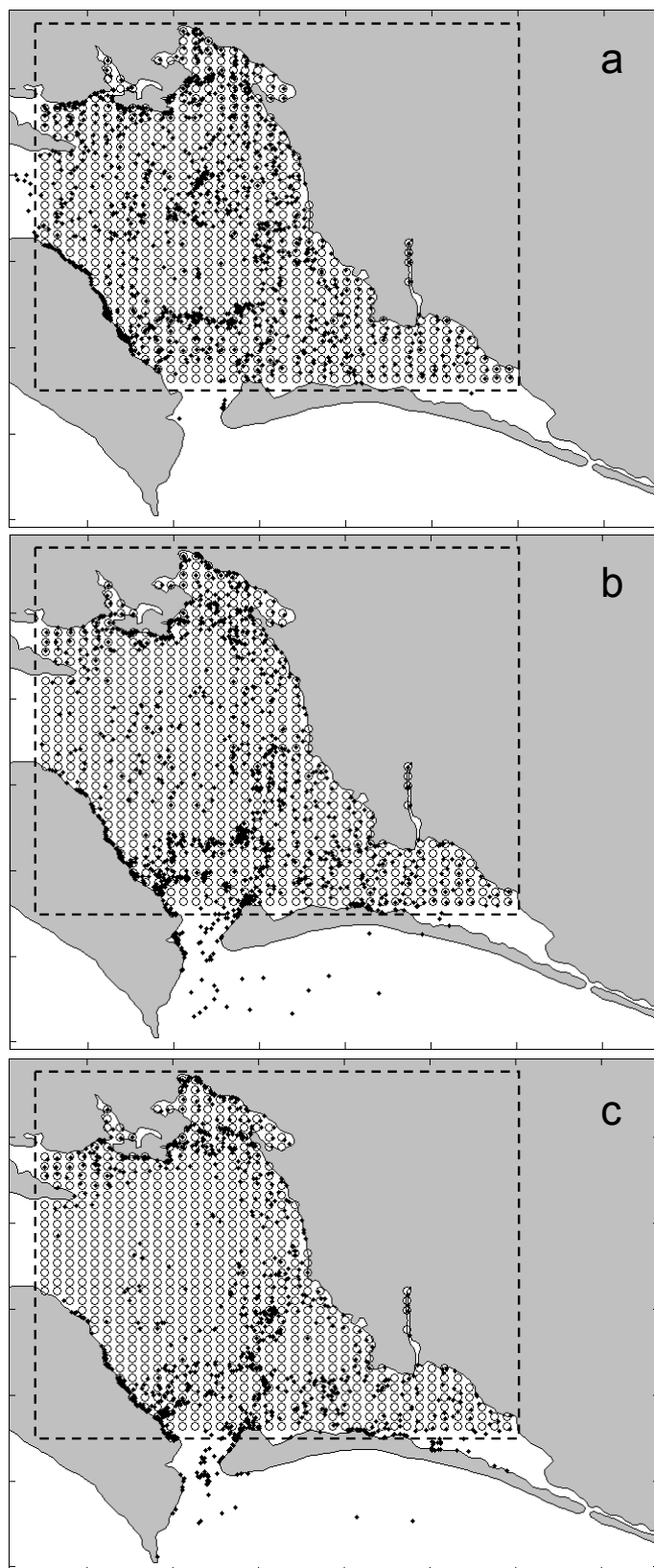


Figura 23.- Dispersión de partículas en Bahía Almejas, probando tres escenarios de viento Noroeste: a) b) viento débil (1.8 m s^{-1}); b) viento medio (3 m s^{-1}) y c) viento fuerte (5 m s^{-1}).

7.5.2.3 Estimación de la importación al complejo lagunar

En la primer parte de esta sección se hicieron experimentos para evaluar la posible intrusión de partículas desde la plataforma continental hacia el interior del complejo BMA, con la finalidad de explorar su frecuencia e intensidad, en función de distintas condiciones de circulación. Se consideraron 54 cuadrantes a lo largo de la isolínea de los 200 m de profundidad y tres escenarios de viento (viento débil 1.8 ms^{-1} , promedio 3 ms^{-1} , y viento fuerte 5 ms^{-1}).

En la figura 24 se muestran los resultados obtenidos para 2 cuadrantes seleccionados. Con el escenario de viento débil (panel superior) se puede apreciar, que las partículas tuvieron un desplazamiento moderado, donde ni siquiera las partículas sembradas en superficie alcanzaron los límites de la malla, y la dirección tiene menor componente oeste. Por su parte, el resto de las partículas puestas a derivar a profundidades $\geq 10\text{m}$ también mostraron un desplazamiento y dispersión mucho menor. El porcentaje de cuadrantes que tuvieron al menos una partícula dentro del complejo fue de 18 %, y el porcentaje de partículas que entraron se mantuvo entre el 0.17 y 1.33%.

Para el escenario de viento promedio (3 ms^{-1} ; panel central), se observó en todos los casos que las partículas puestas a derivar en la superficie (0.5 m) tuvieron un desplazamiento mucho mayor que el resto de las partículas sembradas a mayores profundidades.

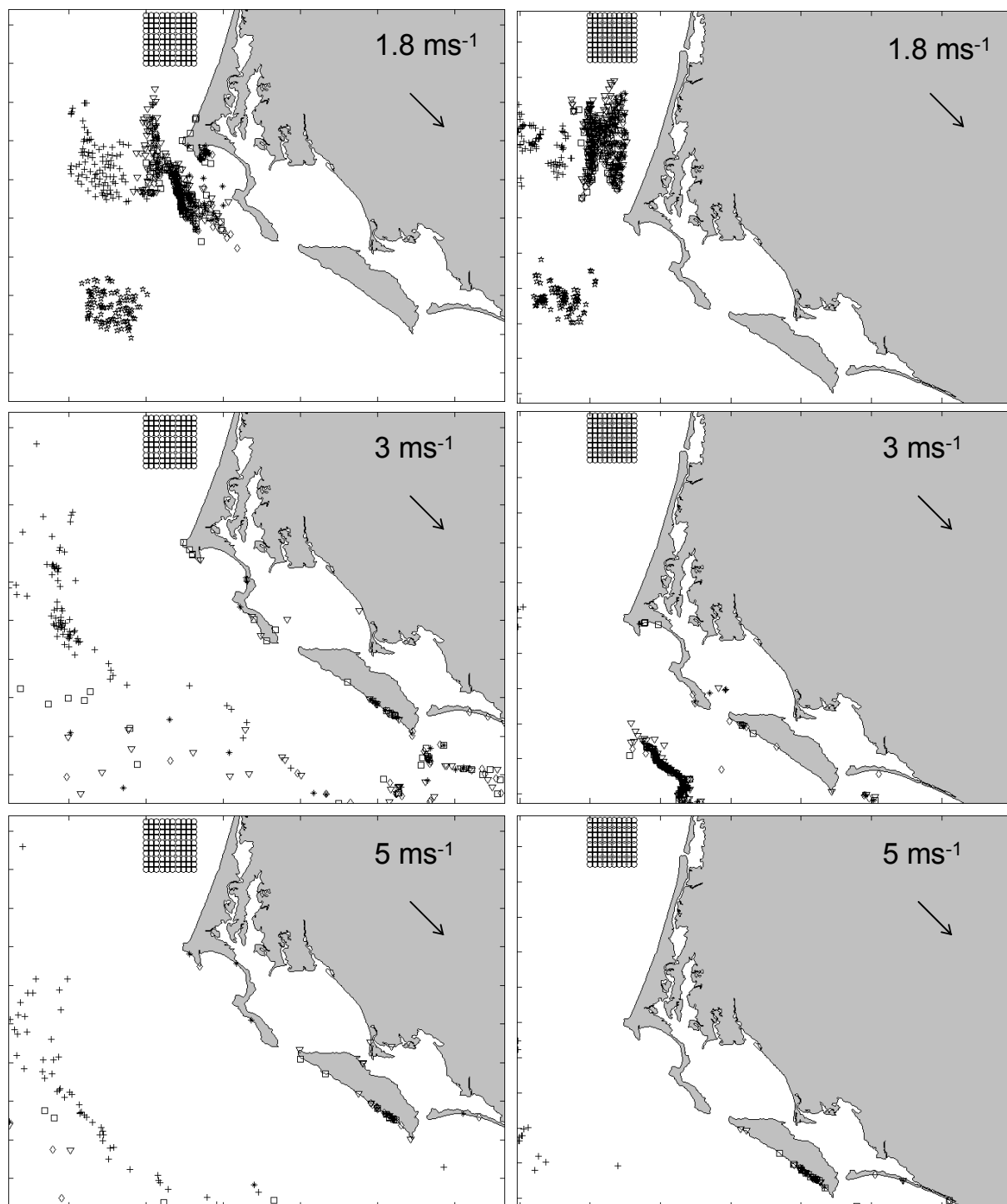


Figura 24.- Selección de cuadrantes mostrando la posición final de partículas puestas a derivar en dos cuadrantes diferentes sobre la plataforma continental siguiendo la isolínea de los 200m. Se mantuvieron constantes los forzamientos de la Aproximación Barotrópica de la Corriente de California, M_2 , viento periódico y Z_0 de M_2 y se variaron tres intensidades de viento noroeste: débil (1.8 m s^{-1}); promedio (3 m s^{-1}) y fuerte (5 m s^{-1}). Los círculos blancos (cuadro) indica la posición inicial de las partículas, las figuras señalan la profundidad a la cual se sembraron inicialmente y la posición final: \square (40m); \diamond (20m); * (15m); ∇ (10m); + (5m); * (0.5m).

Estas partículas se desplazaron con dirección suroeste hasta el límite del dominio para algunos cuadrantes. Para el caso de las partículas puestas a derivar a -5m, encontramos que el desplazamiento fue menor pero con la misma dirección que las anteriores (suroeste). Las partículas entre 10 y 40 m se desplazaron con dirección sureste principalmente siguiendo el curso de la ABCC y la línea de costa en algunos casos.

Para el escenario de viento fuerte (5ms^{-1} ; panel inferior) el desplazamiento y la dispersión de partículas fueron mayores que para los dos casos anteriores, con una influencia del viento reflejada en la deriva de las partículas sembradas a todas las profundidades. Se observa que la mayoría de las partículas en todos los cuadrantes derivaron a una mayor distancia de la costa y que incluso para los cuadrantes más norteños un porcentaje ($\sim 10\%$) de las partículas alcanzaron los límites de la malla antes de terminar el periodo de simulación (25 días). En condiciones de viento medio y fuerte, del 36% de los cuadrantes resultó al menos una partícula dentro del complejo lagunar al final del periodo de simulación (25 días), variando el porcentaje de intrusión entre el 0.17 y el 1.83.

A partir de los resultados se evaluó la intrusión de partículas en función de 25 escenarios de intensidad y dirección de viento solamente en el cuadrante que presentó mayor número de partículas entrando al complejo (Tabla 5; Figura 25).

De los 25 escenarios simulados (para ver detalle de cada escenario consultar anexo 3), el 48% tuvieron al final de la simulación al menos una partícula dentro del complejo

lagunar, con una intrusión de entre el 0.11 y el 15.22% del total de partículas sembradas.

De los escenarios con intrusión, en un tercio de casos la localización final de las partículas dentro del complejo coincidió con la ubicación real de bancos registrados en el complejo, y el tiempo de deriva fue congruente con la duración del periodo planctónico (hasta 25 días; Figura 26).

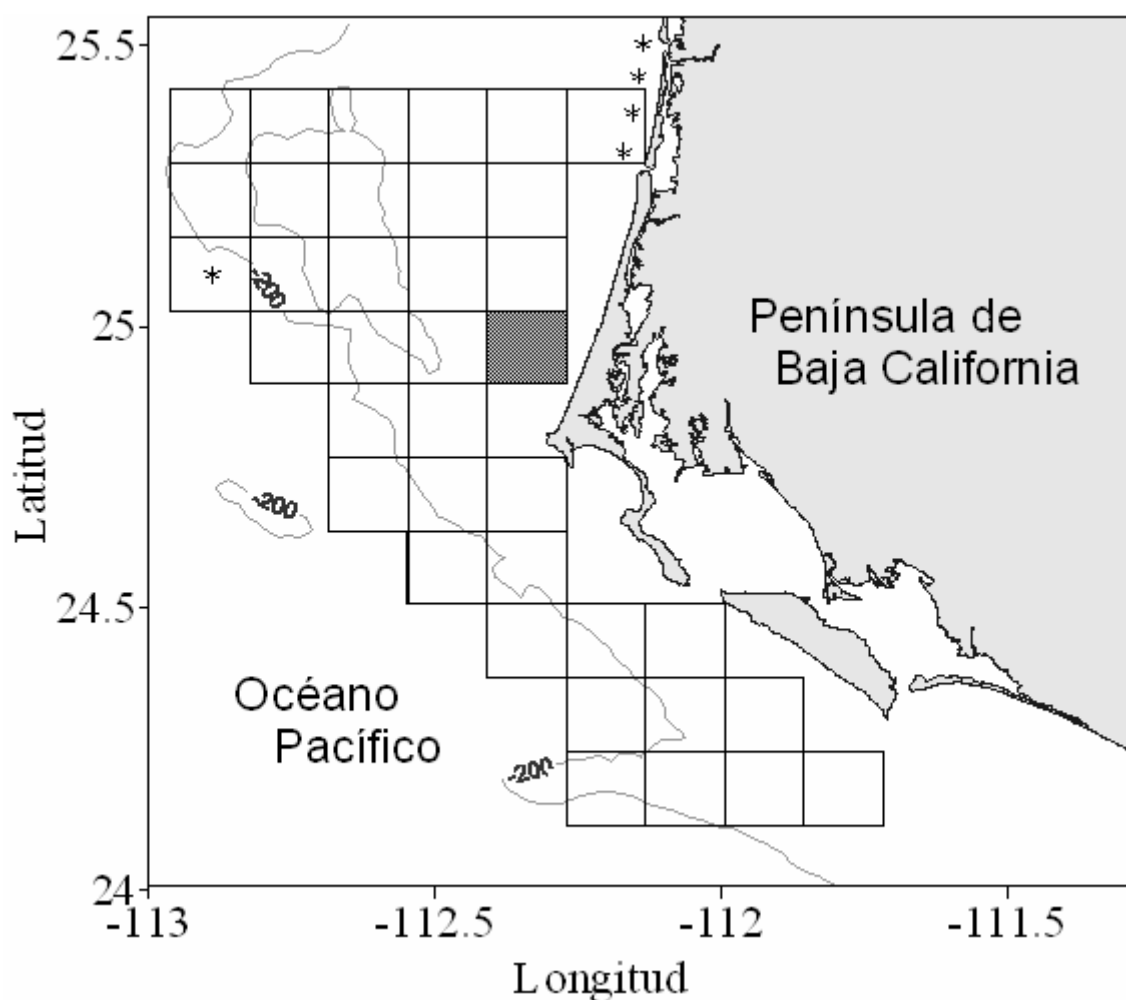



























Figura 25.- Tamaño y ubicación de los cuadrantes sembrados, el cuadrante sombreado indica el cuadrante que mayor intrusión de partículas tuvo. Los asteriscos muestran los puntos en los que fueron reportados presencia de almeja catarina. Se excluyen los cuadrantes que quedaron completa o parcialmente dentro del complejo lagunar Bahía Magdalena-Almejas.

Tabla 5.- Resultados obtenidos para los escenarios de simulación variando dirección e intensidad de viento. Se muestran los valores de viento, el porcentaje de intrusión y si hubo o no distribución en bancos almejeros. Se resaltan en negritas los escenarios 21-24 porque la posición final de las partículas coincide con la distribución real de los bancos.

Escenario	X (m/s)	Y(m/s)	Intensidad (m/s)	Dirección	% Intrusión	Dist. en bancos
1	0.5	-0.5	0.50		0.00	--
2	0.5	-1	1.12		0.00	--
3	0.5	-2	2.06		0.00	--
4	0.5	-3	3.04		0.00	--
5	0.5	-4	4.03		0.00	--
6	1	-0.5	1.00		0.00	--
7	1	-1	1.41		0.00	--
8	1	-2	2.24		0.00	--
9	1	-3	3.16		0.00	--
10	1	-4	4.12		0.00	--
11	2	-0.5	2.00		1.22	No
12	2	-1	2.24		2.56	No
13	2	-2	2.83		0.56	No
14	2	-3	3.61		0.00	--
15	2	-4	4.47		0.00	--
16	3	-0.5	3.00		14.89	No
17	3	-1	3.16		15.22	No
18	3	-2	3.61		9.56	No
19	3	-3	4.24		0.11	No
20	3	-4	5.00		0.00	--
21	4	-0.5	4.00		14.44	Si
22	4	-1	4.12		14.89	Si
23	4	-2	4.47		12.56	Si
24	4	-3	5.00		4.22	Si
25	4	-4	5.66		0.22	No

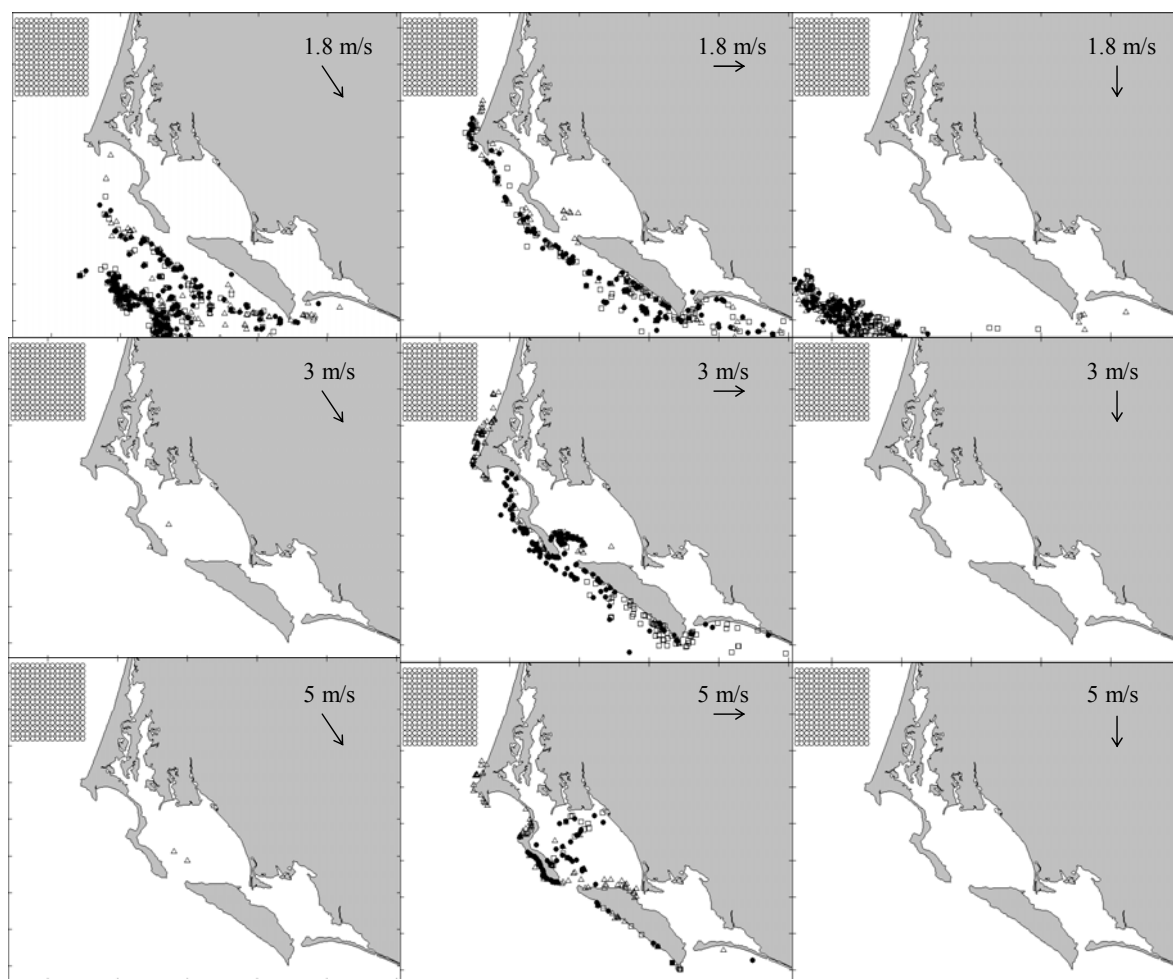


Figura 26.- Selección de escenarios para observar la importación de partículas desde un cuadrante situados en la plataforma continental. En la esquina superior derecha se muestra la intensidad y la dirección del viento utilizada en cada escenario. El resto de los forzamientos se mantuvieron constantes (Aproximación Barotrópica de la Corriente de California, viento periódico, M_2 y Z_0). Los símbolos muestran las profundidades iniciales en las que fueron liberadas las partículas: 40 m (*); 20 (◆); 15 (□); 10 m (●); 5 (△).

Según los resultados, la dirección del viento tiene una mayor influencia en la intrusión de partículas al complejo lagunar que la intensidad, aunque existe un valor óptimo de velocidad del viento. En el escenario de $U = 2 \text{ ms}^{-1}$ y $V = 0.5$ a 2 ms^{-1} se alcanzó un porcentaje de intrusión de entre 0.56 y 2.56 %, y las partículas no llegaron a las zonas

donde se esperaría el reclutamiento. Para un viento de $U = 3 \text{ ms}^{-1}$ y $V = 0.5$ a 2 ms^{-1}) el porcentaje de intrusión se elevó considerablemente a 9.56 y 15.22%, mientras que la combinación de $U = 3 \text{ ms}^{-1}$, $V = 3 \text{ ms}^{-1}$ presentó un porcentaje de 0.11. Los escenarios correspondientes a los valores de viento en U más intenso (4 ms^{-1}) y V débil a moderado (0.5 a 2 ms^{-1}) presentaron un porcentaje de intrusión entre el 12.56 y 14.44 %, mientras que para valores de $U = 4 \text{ ms}^{-1}$ y $V = 3 \text{ ms}^{-1}$ el porcentaje obtenido fue de 4.22 y para un viento fuerte noroeste ($U = 4 \text{ ms}^{-1}$ y $V = 4 \text{ ms}^{-1}$) solo entró el 0.22%. Para estos escenarios, con excepción del último, se encontró que la distribución espacial final de las partículas correspondió a zonas consideradas aptas para el reclutamiento (Figura 27).

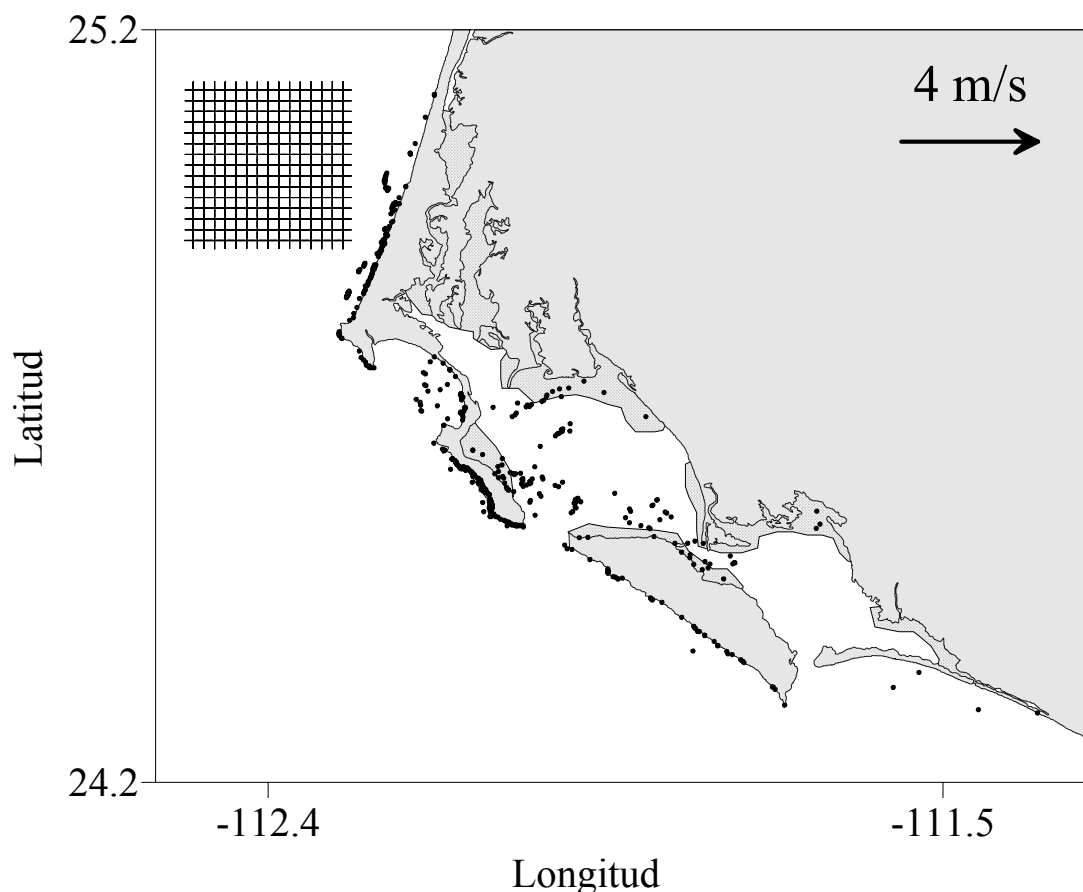


Figura 27.- Posición final de las partículas puestas a derivar con una intensidad de viento de 4 ms^{-1} y dirección oeste. Obsérvese que algunas partículas se ubicaron en las zonas reconocidas como bancos almejeros naturales (áreas sombreadas) dentro del complejo lagunar Bahía Magdalena-Almejas.

En la figura 28 se muestran gráficamente los resultados de las simulaciones de deriva, donde los contornos indican la proporción de partículas que entraron al complejo BMA desde la plataforma continental, y con un asterisco (*) se indica el contorno de mayor intrusión el cual se obtuvo a un valor óptimo de viento de $U = 3\text{ms}^{-1}$ y $V = 1\text{ms}^{-1}$. Las cruces los escenarios probados y los círculos muestran los valores de viento observado (Parés-Sierra CICESSE, com. pers.). En esta figura los valores simulados se encuentran dentro del intervalo de valores observados.

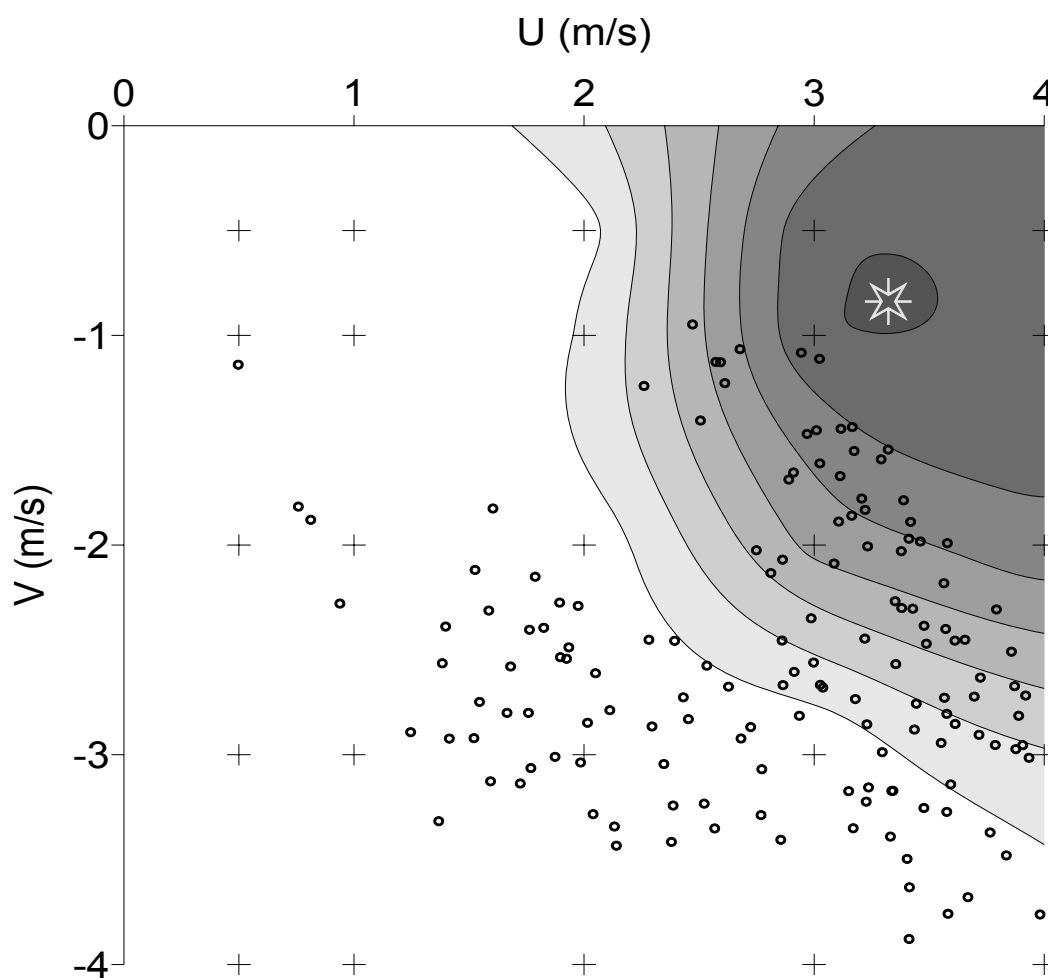


Figura 28.- Valores de intensidad y dirección de viento óptimo para la intrusión de partículas al complejo lagunar Bahía Magdalena-Almejas. Los contornos marcan la proporción de partículas importadas al complejo desde la plataforma continental según la Tabla 5. Los círculos muestran los valores de viento observado durante invierno y las cruces los escenarios simulados.

A partir de la distancia entre cada valor de viento observado (Figura 29) y valor el óptimo simulado, se generó una serie de tiempo de distancia al óptimo; es decir, la distancia entre cada valor de viento mensual y el valor modelado que resulta en una mayor cantidad de partículas entrando al complejo a partir de la plataforma. La figura 30 muestra la serie de tiempo de las “distancias” (considerando únicamente la mitad invernal del año) y se compara con la serie de anomalías térmicas registradas en el área para el mismo periodo. En la serie se encontraron tres casos en los que los valores de viento son altamente favorables para promover la intrusión de partículas al complejo BMA: El primero que coincide con las anomalías térmicas más frías registradas en el periodo (1988-1989 señalado con un triángulo blanco), y dos que coinciden con eventos cálidos (1992-1993 y 1997-1998, señalados con triángulos negros).

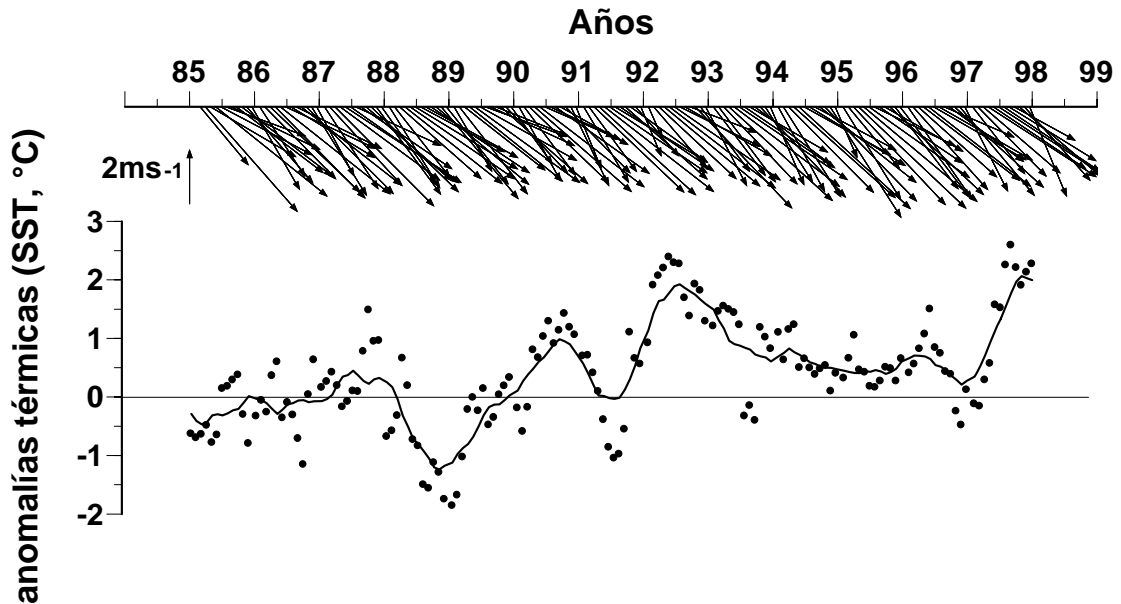


Figura 29.- Dirección e intensidad del viento (panel superior) y anomalías térmicas registradas en el complejo lagunar Bahía Magdalena-Almejas.

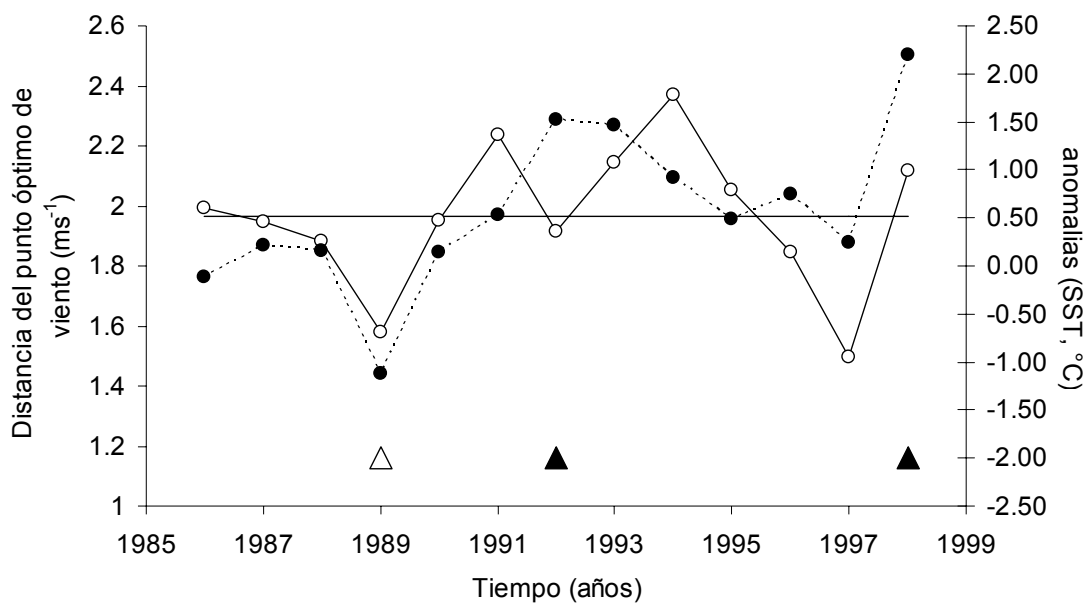


Figura 30.- Serie de tiempo generada con las distancias entre puntos de viento observados respecto al óptimo calculado (solamente invierno; línea continua con puntos blancos) comparada con la serie de anomalías térmicas en la zona (línea discontinua con puntos negros). Se señalan los casos en los que la distancia al punto óptimo es mínima. Los triángulos negros indican eventos cálidos (1992 y 1998), y el triángulo blanco indica un evento frío (1989).

8. Discusión

La almeja catarina es un recurso pesquero importante en la región, tanto por el alto valor económico que puede alcanzar como por ser un recurso tradicional, explotado desde hace ya muchas décadas en nuestro estado. Una de las características que más llaman la atención de este recurso son los fuertes pulsos de producción que se presentan en algunos años. Las hipótesis para explicarlos han estado relacionadas con la variabilidad de la temperatura, la presencia de pastizales que permitan el asentamiento de las semillas, y la importación de organismos al interior de la laguna a partir de bancos en la plataforma continental. En particular hay controversia respecto a este último aspecto, dado que no hay evidencias claras de su tamaño, dinámica y localización.

En el presente estudio se abordó en primer lugar la variabilidad de la temperatura como posible regulador de los pulsos de producción y según los resultados obtenidos encontramos que en la región prevalecen condiciones térmicas adecuadas para el desarrollo de almeja catarina a lo largo del año. Sicard-Gonzalez *et al.* (2006) evaluaron el uso de registros de temperatura de diferentes orígenes y resoluciones para caracterizar dos sitios de la península para zonas de cultivo de moluscos (Rancho Bueno, dentro del complejo BMA y Laguna Manuela, en el estado de Baja California), tomando en cuenta tanto las características térmicas de cada zona, como las temperaturas óptimas y letales estimadas en laboratorio. Los autores encontraron que existe un patrón de alta variabilidad en ambos sitios, principalmente en Rancho Bueno, pero que aún así solamente el 7% de los registros (datos horarios tomados *in situ* con termógrafos

autónomos) sobrepasaron el límite térmico de tolerancia de la especie (29° C). Estos resultados son congruentes con lo encontrado en el presente trabajo utilizando fuentes de información independientes (base de datos de temperatura), mostrando la prevaencia de valores altos de temperatura preferencial estimada (TPE; temperatura modificado por la función de Gauss ajustada a las estimaciones de laboratorio de Sicard-González *et al.*, 1999), en la mayor parte del complejo, especialmente en invierno. Sicard-González *et al.* (2006) reconocen que el periodo que abarcan sus datos *in situ* no incluye años anómalos, y se señala que durante condiciones extremas, como aquellas asociadas al ENSO, las fluctuaciones diarias podrían verse reducidas pero los valores extremos podrían variar fuertemente. Discuten además que el porcentaje de valores que se saldría de los límites de tolerancia podría aumentar significativamente ya que se han documentado cambios de temperatura de hasta 7° C en zonas aledañas. Esta observación es también consistente con lo demostrado en el presente trabajo, donde los valores de TPE se reducen significativamente durante años ENSO, aunque cabe señalar que no existe un efecto directo causado por la temperatura sobre la abundancia de bancos, o al menos no del orden de los pulsos de producción. Sin embargo, sí se detectó en este trabajo un efecto potencial indirecto, tal y como se explicará más adelante.

Al no ser la temperatura el factor determinante en la explicación de los pulsos, se probó entonces la dinámica de bancos al interior del complejo: la localización de bancos, duración del periodo pelágico de la larva en función de temperatura y los patrones de deriva en función de diferentes condiciones de circulación. Los resultados indicaron que con excepción de la zona de canales, en la que prácticamente no hay intercambio de partículas con las otras dos zonas incluso bajo condiciones de viento fuerte (Fig. 21c),

en las otras dos zonas (Bahía Magdalena y Bahía Almejas) si se encontró la posibilidad de un intercambio de partículas entre bancos. Esta apreciación es importante dado que en esta zona se alojan bancos semi permanentes de almeja por lo que pudieran considerarse como una reserva de gametos dentro del complejo. Así mismo, las zonas de retención encontradas, indican que las partículas están en posibilidad de llegar a zonas aptas para su reclutamiento (en las que coincide la presencia de pastos) o bien a zonas en las que se han reportado presencia de bancos esporádicos, que aunque no hay substratos de fijación que limitaría la supervivencia de larvas, no se considera un limitante significativo para el asentamiento de juveniles bentónicos. Estos bancos esporádicos han sido observados en las temporadas en que se registraron los pulsos de producción.

Maeda-Martínez *et al.*, (1993, 2000), consideraron que la presencia de bancos las pruebas de bancos de almeja catarina en la plataforma continental enfrente al complejo BMA, y la presencia de juveniles de almeja adheridas a la langostilla pelágica, son piezas clave en la cual se fundamenta su hipótesis. Parte de los resultados de este trabajo soportan esta hipótesis toda vez que los otros mecanismos explorados (deriva interna y la influencia directa de la temperatura) no alcanzan a explicar los pulsos. Mas aún, los resultados obtenidos de las corridas de diversos cuadrantes situados a lo largo de la isolínea de 200 m sobre la plataforma continental indican que los cuadrantes donde podrían existir bancos de esta especie son aquellos desde los cuales podría exportarse juveniles al interior del complejo lagunar BMA. Por otro lado, los valores de viento que pueden generar intrusión, aunque se presentan poco frecuentes (tal como pasa con los pulsos) se encuentran dentro de los intervalos posibles según los datos

observados en la región. Al comparar los resultados de las 25 corridas variando viento con los registros históricos, se encontró que únicamente durante cuatro inviernos, en un periodo de 12 años se presentan condiciones adecuadas de viento, mientras solamente se presentaron dos pulsos de producción en el mismo periodo. Para ilustrar lo anterior, en la figura 30 se muestra la serie de tiempo de condiciones de viento invernal para la zona, en donde se muestran cuatro casos en los que los valores de viento fueron altamente favorables para promover la intrusión de larvas y/o juveniles de almeja al complejo BMA. De estos cuatro casos se aprecia concordancia con los dos mayores pulsos de producción registrados en la serie de capturas de almeja en Bahía Magdalena (1989-1990 y 1995-1996). No obstante, no hay consistencia para los años 1992-1993 y 1997-1998 en los que se esperaba encontrar altos pulsos de producción dados los valores de viento. La posible explicación para estas discrepancias está en la existencia de un efecto combinado de viento y temperatura preferencial. En la serie de anomalías térmicas de la figura 30, además de que se señalan los años correspondientes a los cuatro casos encontrados en la serie de viento, se encontró que para los años 1989-1990 y 1995-1996 las temperaturas dentro del complejo se encontraron dentro del intervalo óptimo para el desarrollo de la almeja catarina según lo observado en la sección 7.2 (TPE superiores a 0.7) pero no así en los años 1992-1993 y 1997-1998. En esos periodos, la temperatura se elevó considerablemente, debido al fenómeno ENSO registrado en esos años, quedando fuera de los valores óptimos para el óptimo desarrollo de la especie. A pesar de existir la presencia de vientos favorables para la intrusión de larvas/juveniles de almeja al complejo BMA, los bancos no se desarrollaron porque la temperatura pudo afectar la producción de gametos en las poblaciones de adultos (Luna-González, 1997), la supervivencia de las larvas (Sicard-González, *et al.*,

2006, Sicard-González *et al.*, 1999), pudo disminuir la cantidad de alimento debido a la baja productividad primaria asociada a eventos ENSO (Martínez-López y Verdugo-Díaz, 2000; Gárate-Lizárraga y Sequeiros, 1998) o bien pudo limitar el desarrollo de praderas de pastizales que brindan sustrato de fijación a las larvas (Zimmerman *et al.*, 1989) y protección a los juveniles y adultos resultantes (Maeda-Martínez *et al.*, 1992).

De acuerdo a los resultados se puede plantear que los pulsos de producción observados en la serie histórica de capturas de la almeja catarina, se deben muy probablemente a la coincidencia de condiciones específicas locales, diferentes a aquellos que generan las respuestas ilustradas en los grupos de Spencer y Collie (1997). Si bien dados los resultados obtenidos con los procesos de retención es posible argumentar que algunos de los bancos semi permanentes (la Herradura y la Uña de Gato en la zona norte de BM) dentro del complejo BMA pueden llegar a ser autosustentables, no se demostró que estos mismos bancos sean capaces de generar altos índices de reclutamiento. Mas bien se refuerza la idea de que cuando las condiciones ambientales lo permiten es muy probable la intrusión de larvas y/o juveniles de almeja provenientes de la zona oceánica adyacente mediante procesos advectivos de transporte principalmente producidos por viento, pudiendo generar un reclutamiento extra que coincidiendo en tiempo y espacio con la temperatura, alimento y disponibilidad de sustrato adecuado, dicho reclutamiento se puede ver reflejado en los pulsos de producción.

La investigación en torno a los pulsos de almeja catarina en el complejo BMA tiene más de 15 años, pero se mantuvo sin conclusiones contundentes por falta de un muestreo de los bancos en la plataforma continental, y de un estudio de reclutamiento en la boca de

Bahía Magdalena. En el presente trabajo se proporcionó un modelo numérico de deriva de partículas que permitió probar distintos escenarios. El modelo probó ser de gran utilidad, y ayudó a identificar regiones y periodos de zonas de retención larvaria que pueden ser de beneficio para la captación de semillas silvestres destinadas a la acuacultura, así mismo permitió, junto con la comprensión y modelación de las corrientes oceanográficas en el complejo los fundamentos para el desarrollo de pronósticos.

9. Conclusiones

- Se caracterizó el patrón de variabilidad de abundancia de la almeja catarina y se encontró un comportamiento por pulsos no descrito anteriormente y diferente a los propuestos por Spencer y Collie (1997). Se encontró que durante un periodo de 100 años se registraron al menos 9.5 pulsos, de los cuales, los máximos llegaron a ser hasta 20 veces mayores que la producción promedio de los años anteriores.
- Según el comportamiento por pulsos encontrado no creemos que los altos pulsos de producción estén derivados de un incremento en el esfuerzo pesquero o intensificación de la actividad extractiva en la zona. Ya que en primer lugar los pulsos reflejan un aumento y no un decremento en la producción, además los registros señalan que el aumento de biomasa se debe a un aumento en las poblaciones de las zona de pesca y ampliación de las mismas, mas no a un aumento de esfuerzo, lo cual es importante ya que por si mismo se exenta de ser un comportamiento derivado de la sobre explotación del recurso.
- En este estudio se consideró la circulación barotrópica y el transporte pasivo de partículas en el complejo lagunar de Bahía Magdalena–Almejas y la zona oceánica adyacente, y se encontró que dadas las características de circulación en el complejo BMA, las partículas sembradas dentro del complejo tienden a quedarse en mayor porcentaje dentro del mismo complejo en condiciones promedio de viento.

- Los resultados del modelo indican que en la mayoría de los experimentos realizados, el viento incrementa el transporte de partículas hacia adentro del complejo lagunar, donde permanecerán y podrán ser transportadas por viento o marea a zonas de mayor protección como es la zona de canales al norte del complejo. Según los experimentos se encontró que los valores óptimos de viento son de moderados a fuertes entre 3 y 5 ms^{-1} , y con dirección oeste. Así mismo se observó que la dirección del viento tiene mayor influencia para la intrusión de partículas al complejo lagunar que la intensidad.
- Los experimentos realizados ayudarán a identificar regiones y periodos de zonas de retención, lo que podrá ser de gran utilidad para la captación de semillas y juveniles silvestres destinadas a la acuicultura.
- Con base en lo observado se sugiere que los altos pulsos de producción de almeja catarina generados en los años (1989-1990, 1996-1997 y posteriores) se debieron a la intrusión de larvas y juveniles de almeja catrina provenientes de la plataforma continental, además de la retención de larvas desovadas dentro del mismo complejo.
- Se observó que los fenómenos interanuales tipo ENSO tienen repercusiones indirectas en la producción de almeja catarina, ya que a pesar de que durante eventos el Niño los patrones de viento son propicios para la importación de larvas al complejo BMA, pero el incremento de temperatura en el agua limita el desarrollo de los bancos. Sin embargo en la contraparte (durante años Niña) a pesar de que la temperatura es

óptima no siempre se presentan los patrones de viento propicios que promuevan la intrusión de las partículas al interior del complejo lagunar.

- Estos resultados tienen gran relevancia biológica al permitir simular el transporte de huevos y larvas de diferentes organismos y observar que, dados los patrones de circulación, es posible la intrusión de los mismos desde zonas de desove en la plataforma continental hasta zonas de protección como es el complejo lagunar.

10. Recomendaciones

Es necesario incrementar la investigación para caracterizar el tipo de variabilidad por pulsos, destacado en el presente trabajo, dado que ha sido frecuentemente ignorada por no tener una relación directa con eventos anómalos de alto impacto como el Niño, y porque aparentemente no se presentan en pesquerías masivas, pero principalmente por no tratarse de colapsos pesqueros, sino mas bien reflejan un incremento en la producción.

Por sus características, las poblaciones con comportamiento por pulsos requieren estrategias de manejo particulares. No pueden basarse en la estimación de biomasa de años anteriores (tipo biomasa dinámica de cómo los de Hilborn y Walters, 1987; Shaefer, 1954), ni pueden tratarse con los supuestos clásicos de RMS, al menos no durante los pulsos. Una estrategia precautoria (esperar a ver si es un aumento de biomasa) implicaría perder biomasa importantes susceptibles de captura en ese periodo (p.e. según los registros de captura en Bahía Magdalena, el total acumulado de 1973 a 1987 fue de 2893 t de músculo, mientras que para un solo año de pulso en 1989 fue de 5500 t de músculo). Por lo que lo correcto sería quizá explotar el pulso de producción antes de que se pierda, y la precaución pertinente estaría en cuidar que se trate de una misma zona (no aumento de biomasa por aumento de zonas de pesca o esfuerzo), de ser capaces de caracterizar a las especies y desarrollar pronósticos (implica pronosticar clima), o en su defecto indicadores tempranos (por ejemplo ver reclutamientos tal como lo hace actualmente el CRIP La Paz para la almeja catarina en el complejo BMA, Massó-Rojas, CRIP-La Paz, com. pers.). Además de los requisitos de conocimiento y

pronóstico, se requiere una estructura social y económica particular, que permita incrementar el esfuerzo (trabajo) de manera casi inmediata, y de igual manera reubicarlo uno o dos años después cuando la producción de los pulsos se haya agotado.

Es altamente recomendable realizar una nueva introspección para evaluar la fauna bentónica de la plataforma continental adyacente a la zona de estudio que permitan ratificar la existencia y ubicación de poblaciones de almeja catrina en la zona. Así mismo se recomienda hacer un monitoreo de por lo menos un ciclo anual con colectores artificiales en las inmediaciones del complejo BMA que permitan corroborar las zonas y periodos de mayor captación de semillas.

11. Bibliografía

Acosta-Ruiz, M. y Lara-Lara, J.R. (1978). Resultados fisicoquímicos de un estudio de variación diurna en el área central de Bahía Magdalena, B.C.S. *Cienc. Mar.* **5**(1):37-46.

Álamo, V. y V. Valdivieso. (1987). Lista sistemática de moluscos marinos del Perú. Boletín Inst. Mar Perú. Vol. Extraordinario. 205 p.

Álvarez-Borrego, S., L.A. Galindo-Bect y A. Chi-Barragán. (1975). Características hidroquímicas de Bahía Magdalena, BCS. *Cienc. Mar.* **2**(2):94-109.

Avilés-Quevedo, M.A. (1990). Crecimiento de la almeja catarina *Argopecten circularis* en función de alimento, con anotaciones sobre su biología y desarrollo. Tesis de Maestría en Ciencias. Instituto Politécnico nacional. La Paz, B.C.S., México. 81 p.

Bakun, A. (1996). Patterns in the ocean. Ocean processes and marine population dynamics. California Sea Grant/CIB. 323 p.

Baqueiro-Cárdenas, E., I. Peña-Rámirez y A. Massó-Rojas. (1982). Análisis de una población sobreexplotada de *Argopecten circularis* (Sowerby 1835) en la Ensenada de La Paz, B.C.S., México. *Cienc. Pesq.* **1**(2):57-65.

Bayne, B.L. (1976). Marine mussels: their ecology and physiology. Cambridge University Press. 505 p.

Betts, A.K., J.H. Ball, A.C.M. Beljaars, M.J. Miller y P. Viterbo. (1996). The land surface–atmosphere interaction: A review based on observational and global modeling perspectives. *J. Geophys. Res.* **101**:7209–7225.

Blanton, B.O. (1995). 3-Dimensional drogoue tracking algorithm for a finite element grid with linear finite elements in spherical coordinates. Technical report., Marine Sciences. University of North Carolina, Chapel Hill, USA. 86 p.

Blanton, B.O., A.L. Aretxabaleta, F.E. Werner y H. Seim. (2003). Monthly climatology of the continental shelf waters of the South Atlantic Bight. *J. Geophys. Res.* 108(C8): 3264.

Bogazzi, E. (2002). Relation of large-scale distribution pattern of patagonian scallop (*Zygochlamys patagonica*) to frontal systems in the Southwestern Atlantic. Final Report. POGO-IOC-SCOR Fellowship Programme. 62 p.

Bojórquez-Verástica, G. (1997). Reclutamiento, crecimiento y supervivencia de *Argopecten circularis* (Sowerby, 1835) = *Argopecten ventricosus* (Sowerby II, 1842), en Bahía Concepción, B.C.S. *Tesis de Licenciatura*. Universidad Autónoma de Baja California Sur. México. 72 p.

Botsfpr, L.W., J.C. Castilla y C.H. Peterson. (1997). The management of fisheries and marine ecosystems. *Science*. 227:509-515

Brusca, R.C. y B.R. Wallerstein. (1979). Zoogeographic patterns of idoteid isopods in the northeast Pacific, with a review of shallow water zoogeography of the area. *Bull. Biol. Soc. Wash.* **3**:67-105.

Chauvaud, L., G. Thouzeau y J. Grall. (1996). Experimental collection of great scallop postlarvae and other benthic species in the Bay of Brest: Settlement patterns in relation to spatio- temporal variability of environmental factors. *Aquacult. Int.* **4**:263-288.

Ciocco, N.F. y M.A. Monsalve. (1999). La vieira tehuelche, *Aequipecten tehuelchus* (d'Orb.,1846), del Golfo de San José (Argentina): captación de postlarvas durante el colapso de la pesquería. *Biol. Pesq.* (Chile) **27**: 23-36 p.

CONABIO (2004). Áreas de importancia para la conservación de las aves: Sistema Bahía Magdalena-Almejas. Consulta en línea (2005). <http://conabioweb.conabio.gob.mx>.

Craig, P.D. y R.J. McLoughlin. (1994). Modelling scallop larvae movement in Great Oyster Bay. En: Sammarco, P. W. y M. L. Heron (Eds): *The Bio-Physics of Marine Larval Dispersal*. American Geophysical Union, Washington DC. 307-326 p.

Cruz, P., C. Rodríguez-Jaramillo y A.M. Ibarra. (2000). Environment and Population origin effects on first sexual maturity of catarina scallop *Argopecten ventricosus* (Sowerby II, 1842). *J. Shellfish Res.* **19**(1):89-93.

Egbert, G.D., A. Bennett y M. Foreman. (1994). TOPEX/Poseidon tides estimated using a global inverse model. *J. Geophys. Res.* **99**(C12): 24821 – 24852.

Egbert, G.D., y S.Y. Erofeeva. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *J. Atmos. Ocean. Tech.* **19**:183-204.

FAO (1995). Guía FAO para la identificación de especies para los fines de la pesca. Pacífico Centro-oriental. Vol. I. Invertebrados. 647 p.

Felix-Pico, E.F. (1993). Estudio biológico de la almeja catarina *Argopecten circularis* (Sowerby, 1835) en Bahía Magdalena, B. C. S., México. Tesis de Maestría, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas-Instituto Politécnico Nacional. 89p.

Félix-Pico, E.F., J. Amador-Buenrostro, G. Bojórquez-Verástica, R. Morales-Hernández, J. Verdugo-Hernández y G. López-García. (1991). New records of pectinid spat (*Argopecten circularis*) on artificial collectors in Concepción and Magdalena Bays, B.C.S., Mexico. En: Abstracts of 8th. International Pectinid Workshop, Cherbourg, France. 79pp.

Foreman, M.G.G. (1977). Manual for tidal heights analysis and prediction. *Pacific Mar. Sci. Rep.* **77**:10-66.

Fry, F.E.J. (1947). The aquatic respiration of fish. En: Brown, M.E. (Ed.) *The Physiology of fishes*. Academic Press. New York and London. 63 p.

Gárate-Lizárraga, I., G. Verdugo-Díaz y D.A. Siqueiros-Beltrones. (2001). Variations in phytoplankton assemblages during 1988-1989 in a subtropical lagoon system on the west coast of Mexico. *Oceánides*. **16**(1):1-16.

Garate-Lizarraga, I., y D.A. Siqueiros-Beltrones. (1998). Time variation of phytoplankton Assamblages in a subtropical lagoon system after the 1982-83 El Niño event. *Pacific Science* **52**(1): 79-97.

Gárate-Lizarraga, I., D.A. Siqueiro-Beltrones, G. Verdugo-Diaz, y R. Guerrero-Caballero. (2000). Dinámica del fitoplancton en el sistema lagunar Magdalena-Almejas. En: Lluch-Belda, D., J. Elorduy-Garay, S.E. Lluch-Cota y G. Ponce-Diaz. (Eds.). BAC Centros de Actividad Biológica del Pacífico Mexicano. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. 367 p.

Greenberg, D.A., F.E. Werner, y D.R. Lynch. (1998). A diagnostic finite element ocean circulation model in spherical-polar coordinates. *J. Atmos. Oceanic. Technol.* **15**:942-958.

Guerrero, G.R., R. Cervantes D. y A. Jiménez. (1988). Nutrient variation during a tidal cycle at the mouth of a coastal lagoon in the northwest of México. *Indian J. Mar. Sci.* **17**: 235-237.

Joll, L.M. (1989). Recruitment variation in stocks of the saucer scallop *Amusium balloti* in the Abrolhos Bank area. En: Dredge, M.C.L., W.F. Zacchrin y L.M. Joll, Proceedings of the Australasian Scallop Workshop. Tasmanian Government Printer (Hobart, Australia). 61-67 pp.

Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, R. Jenne, y M.A. Keen. (1996). Sea shells of tropical West America. Stanford University Press. Stanford, California. 1064 p.

Keen, M.A. (1971). Sea shells of tropical West America. Marine Mollusks, from Baja California to Perú. Stanford Univ. Press. U.S.A. 1064 p.

Kenchington, E. y M.J. Lundy (1996). An assessment of areas for scallop broodstock protection in the approaches to the Bay of Fundy. DFO Atlantic Fish. Res. Doc. 96/13, 21 p.

Lango-Reynoso, F. (1994). Estudios básicos sobre depredadores activos y potenciales para el desarrollo del cultivo extensivo de *Argopecten circularis*. Tesis de Maestría. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas-Instituto Politécnico Nacional, La Paz, B.C.S., México. 99 p.

Leija-Tristán, A., F.A. Solis-Marin, D. Aurióles-Gamboa y E.S. Amador-Silva. (1996). Natural stocks of the scallop *Argopecten circularis*, and relationships with the glateid crab *Pleuroncodes planipes* in the Pacific coast of Baja California Sur, México. *Cah. Biol. Mar.* **37**:153-157.

Lluch-Belda, D., M.E. Hernández-Rivas, R. Saldierna-Martínez y R. Guerrero-Caballero. (2000). Variabilidad de la temperatura superficial del mar en Bahía Magdalena, B. C. S. *Oceánides*. **15**(1):1-23.

Luna-González, A. (1997). Ciclo reproductivo de la almeja catarina *Argopecten ventricosus* (Sowerby II 1842) cultivada en la rada del puerto de Pichilingue, B.C.S., y su relación con el medio. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Baja California Sur, México. 74 p.

Lynch, D.R. y F.E. Werner. (1987). Three-dimensional hydrodynamics on finite elements: I. Linearized harmonic model. *Int. J. Numer. Methods Fluids*. **7**:871-909.

Lynch, D.R. y F.E. Werner. (1991). Three-dimensional hydrodynamics on finite elements. Part II: Non-linear time-stepping model. *Int. J. Numer. Methods Fluids*. **12**: 507–533.

Lynch, D.R., J.T.C. Ip, C. E. Naimie y F.E. Werner. (1996). Comprehensive coastal circulation model with application to the Gulf of Maine. *Cont. Shelf Res.* **16**:875-906.

Lynch, D.R., F.E. Werner, D.A. Greenberg y J.W. Loder. (1992). Diagnostic model for baroclinic, wind-driven and tidal circulation in shallow seas. *Cont. Shelf Res.* **12**:37-64.

Maeda-Martínez A.N., P. Ormart, V. Polo, T. Reynoso. P. Monsalvo, S. Avila y M. Espinoza. (1992). The potential predator impact on bottom cultured mexican catarina scallop (*Argopecten circularis*). En: Book of abstracts. Aquaculture '92. Orlando, Florida. Mayo 21-25. 151-152pp.

Maeda-Martínez, A.N., M.T. Sicard-González, L. Carvalho, S.E. Lluch-Cota y D.B. Lluch-Cota. (2000). Las poblaciones de almeja catarina *Argopecten ventricosus* en el Centro de Actividad Biológica de Bahía Magdalena, México. En: Lluch-Belda, D., J. Elorduy-Garay, S.E. Lluch-Cota y G. Ponce-Diaz. (Eds.). BAC Centros de Actividad Biológica del Pacífico Mexicano. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. 367 p.

Maeda-Martinez, A.N., T. Reynoso-Granados, F. Solis-Marin, A. Leija-Tristan, D. Auriolos-Gamboa, C. Salinas-Zavala, D. Lluch-Cota y P. Ormart-Castro. (1993). A model to explain the formation of catarina scallop *Arpopecten circularis* (Sowerby, 1835), beds, in Magdalena Bay, Mexico. *Aquaculture Fisheries Management* **24**: 323-339 p.

Martínez-García, M y D. Lluch-Belda. (2000). Cambio climático Global y Centros de Actividad Biológica. En: Lluch-Belda, D., J. Elorduy-Garay, S.E. Lluch-Cota y G.

Ponce-Díaz. (Eds.). BAC Centros de Actividad Biológica del Pacífico Mexicano. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. 367 p.

Martínez-López, A., y G. Verdugo-Díaz, (2000). Composición y dinámica del fitoplancton en el BAC de Bahía Magdalena. En: Lluch-Belda, D., J. Elorduy-Garay, S.E. Lluch-Cota y G. Ponce-Díaz. (Eds.). BAC Centros de Actividad Biológica del Pacífico Mexicano. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. 367 p.

Massó-Rojas, J. A. (1999). Pesquería de almeja catarina. En: Casas-Valdez, M. y G. Ponce-Díaz. Estudio del Potencial pesquero y Acuícola de Baja California Sur. Vol. I. Secretaría del Medio Ambiente Recursos naturales y Pesca. Gobierno del Estado de Baja California Sur. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Universidad Autónoma de Baja California Sur. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. Centro Regional de Investigaciones Pesqueras y Centro de Estudios Tecnológicos del Mar. 350 p.

Mazón-Suástegui, J.M. (1999). Cultivo de almeja catarina *Argopecten circularis*. En: Casas-Valdez, M. y G. Ponce-Díaz (Eds). Estudio del Potencial Pesquero y Acuícola de B. C. S. Vol. II. Secretaría del Medio Ambiente Recursos naturales y Pesca. Gobierno del Estado de Baja California Sur. Organización de las Naciones Unidas para la

Agricultura y la Alimentación. Universidad Autónoma de Baja California Sur. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. Centro Regional de Investigaciones Pesqueras y Centro de Estudios Tecnológicos del Mar. México. 544 p.

Mellor, G., y T. Yamada. (1982). Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. of Geophys. Space Phys.* **20**:851–875.

Mohn, R.K., G. Robert, y G.A. P. Black. (1984). Georges Bank scallop assessment. Canadian Atlantic Fisheries Scientific Advisory Committee (CAFSAC). Reporte Interno. 26 p.

Morales-Zárate, M.V. A. L. Aretxabaleta, F. E. Werner y S. E. Lluch-Cota. Modelación de la circulación invernal y la retención de partículas en el sistema lagunar Bahía Magdalena-Almejas (Baja California Sur México). Sometido.

Naidu, K.S. (1991). Fisheries and aquaculture-Sea scallop: *Placopecten agellanicus*. En: S. Shumway (Ed.), *Scallops: Biology, Ecology and Aquaculture*. Elsevier Amsterdam and New York). Capítulo 14. 861-897 pp.

Narvarte, M.A. (1995). Spat collection and growth to commercial size of the tehuelche scallop *Aequipecten tehuelchus* (D'Orb) in the San Matías Gulf, Argentina. *J. World Aquac. Soc.* **26**(1)59-64.

Nienhuis G.H. y R. Guerrero-Caballero. (1985). A quantitative analysis of annual phytoplankton cycle of the Magdalena lagoon complex (Mexico) *J. Plankton Res.* **7**(4):427-441.

NOM-004-PESC-1993. Norma Oficial Mexicana para regular el aprovechamiento de la almeja catarina, en aguas de jurisdicción federal estados de Baja California y Baja California Sur. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca.

Obeso-Nieblas M., J.H. Gaviño-Rodríguez y A.R. Jiménez-Illescas. (1999). Modelación de la marea en el sistema lagunar Bahía Magdalena-Almejas, BCS., México. *Oceánides.* **14**(2):79-98.

Orensanz, J.M., M. Pascual y M. Fernández. (1991). Scallops in Argentina. En: S.E. Shumway, (Ed.). *Scallops: Biology, Ecology and Aquaculture*. Elsevier, Amsterdam. 981-986 pp.

Orensanz, J.M., N.A. San-Román, M.E. Ré. (1985). Results concerning the scallop *Chlamys tehuelcha* (d'Orb.) stocks of the North-Patagonic Gulfs (Argentina). School of Fisheries, University of Washington, Processed Report.

Parrish, R.H., C.S. Nelson y A. Bakun. (1981). Transport mechanism and reproductive success of fishes in the California Current. *Biological Oceanography* **1**(2): 175-203.

Pawlowicz, R., R.C. Beardsley y S. Lentz. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in Matlab using T tide, *Computers and Geosciences*. **28**: 929–937.

Ramírez-García, P., J. Terrados, F. Ramos, A. Lot, D. Ocaña y C.M. Duarte. (2002). Distribution and nutrient limitation of surfgrass, *Phyllospadix scouleri* and *Phyllospadix torreyi*, along the Pacific coast of Baja California (México). *Aquatic Botany*. **74**:121-131.

Roberts, C. M. (1997). Connectivity and management of Caribbean coral reefs. *Science*. **278**: 1454-1457 p.

Román, G. (1991). Scallops in Spain. En: S.E. Shumway (Ed.). Scallops: Biology, Ecology and Aquaculture. Elsevier, Amsterdam. 753-762 pp.

Sánchez-Montante, O. (2004). Hidrodinámica y transporte de masa en el sistema lagunar Bahía Magdalena-Bahía Almejas, Baja California Sur, México: Modelación y experimentación. Tesis de Doctorado. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas-Instituto Politécnico Nacional. 237p.

Santamaría-Gallegos, N.A., E.F. Félix-Pico, J.L. Sánchez-Lizaso, J.M. Mazón-Suastegui y J.R. Palomares-García. (1997). Possible protection effect of eelgrass *Zostera marina* for juvenile *Argopecten ventricosus* (Sowerby II, 1842) in Bahía Concepción,

B.C.S., México. En: Book of abstracts 11th. Internatl. Pectinid Workshop, La Paz, B.C.S. Mexico. Abril 10-15. 63-65 pp.

Santamaría-Gallegos, N.A., E.F. Félix-Pico, J.L. Sánchez-Lizaso, J.R. Palomares-García y J.M. Mazón-Suastegui. (1999). Temporal coincidence of the annual eelgrass *Zostera marina* and juvenile scallops *Argopecten ventricosus* (Sowerby II, 1842) in Bahía Concepción, México. *J. Shellfish Res.* **18**(2):415-418.

Sheperd, J.G., J.G. Pope y R.D. Ccousens. (1984). Variations in fish stocks and hypotheses concerning their links with climate. *Int. Explor. Mer.* **185**:255-267.

Sicard. M.T., A.N. Maeda-Martínez, S.E. Lluch-Cota, C. Lodeiros, L.M. Roldán-Carrillo y R. Mendoza-Alfaro. (2006). Frequent monitoring of temperature: an essential requirement for site selection in bivalve aquaculture in tropical-temperate transition zones. *Aquac. Res. En prensa.*

Sicard-González, M.T., A.N Maeda-Martínez., T. Reynoso-Granados, P. Ormart-Castro y L. Carvalho-Saucedo. (1999). Optimum temperature for growth in the catarina scallop (*Argopecten ventricosus*, Sowerby II, 1842). *J. Shellfish Res.* **18**:383- 390.

Smith, K. y A. Bilgili. (2003). BATTRI: 2-D Finite Element Grid Generator. Internal report # NML-03-15.

Smith T.M. y R.W. Reynolds. (2004). Improved Extended Reconstruction of SST

(1854-1997). **J. Climate** **17**:2466- 2477.

Spencer, P.D. y J.S. Collie. (1997). Patterns of population variability in marine fish stocks. *Fish. Oceanogr.* **63**:188-204.

Stotz, W. y J. Mendo. (2002). Pesquerías, repoblamiento y manejo de bancos naturales: Su interacción con la acuicultura. En: A.N. Maeda-Martínez. (Ed.) Los Moluscos Pectínidos de Iberoamerica: Ciencia y acuicultura. Capítulo 18. Limusa. México. 501 p.

Thompson, R. J. y B. L. Bayne. (1972). Active metabolism associated with feeding in the mussel *Mytilus edulis*. *J. exp. Mar. Biol. Ecol.* **8**:191-212.

Thouzeau, G. (1991). Experimental collection of postlarvae of *Pecten maximus* (L.) and other benthic macrofaunal species in the Bay of Saint-Brieuc, France II. Reproduction patterns and postlarval growth of five mollusk species. *J. exp. Mar. Biol. Ecol.* **148**:181-200.

Tremblay M.J., J. Loder, F.E. Werner, C. Naimie, F.H. Page y M.M. Sinclair (1994). Drift of scallop larvae on Georges Bank: A model study of the roles of mean advection larval behavior and larval origin. *Deep Sea Research.* **41**:7-49.

Trip-Quezada, A. (1985). Explotación y cultivo de la almeja catarina *Argopecten circularis* en Baja California Sur. Tesis de Maestría. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas-Instituto Politécnico Nacional. 164 p.

Uriarte, I. G. Rupp y A. Abarca. (2002). Producción de juveniles de pectínidos iberoamericanos bajo condiciones controladas. En: Maeda-Martínez, A.N. (Ed.) Los Moluscos pectínidos de Iberoamérica: Ciencia y Acuicultura. Limusa, México. Capítulo 8. 147-172 pp.

Werner F.E. y S.E. Lluch-Cota (2002). Course on Coupling Physical Circulation Models and Individual Based Models held in La Paz, Mexico. GLOBEC International Newsletter. 8(2):29-30.

Werner, F.E., A. Viúdez y J. Tintoré. (1993). An exploratory study of the currents off the southern coast of Mallorca including the Cabrera Island complex. *J. Marine Syst.* 4:45-66.

Werner, F.E., J.A. Quinlan, R.G. Lough y D.R. Lynch (2001). Spatially-explicit individual based modeling of marine populations: a review of the advances in the 1990s. *Sarsia*. 86:411-421.

Widdows, J. (1973). The effects of temperature on the metabolism and activity of *Mytilus edulis*. *J. Sea Res.* 7:387-398.

Zaitsev, O., R. Cervantes, O. Montante y A. Gallegos. (2003). Coastal upwelling activity of the Pacific shell of Baja California Peninsula. *J. Oceanogr.* 59 (4):489-502.

Zimmerman, R.C., R.D. Smith y R.S. Alberte. (1989). Thermal acclimation and whole plant carbon balance in *Zostera marina* L. (eelgrass). *J. exp. Mar. Biol. Ecol.* **130**: 93-109.