

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



**Maestría en Ciencias
en Oceanografía Física**

**Hidrodinámica en el Alto Golfo de California y su
relación con el flujo de sedimento y la abundancia
relativa de los organismos bentónicos.**

Tesis

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

Presenta:

Alejandra Quintanilla Zurita

Ensenada, Baja California, México

2019

Tesis defendida por

Alejandra Quintanilla Zurita

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Rafael Ramírez Mendoza

Codirector de tesis

Dr. Modesto Ortiz Figueroa

Codirector de tesis

Dr. José Gómez Valdés

Dra. Sharon Zinah Herzka Llona



Dr. José Gómez Valdés

Coordinador del Posgrado en Oceanografía Física

Dra. Rufina Hernández Martínez

Directora de Estudios de Posgrado

Alejandra Quintanilla Zurita © 2019

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis

Resumen de la tesis que presenta Alejandra Quintanilla Zurita como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Física.

Hidrodinámica en el Alto Golfo de California y su relación con el flujo de sedimento y la abundancia relativa de los organismos bentónicos.

Resumen aprobado por:

Dr. Rafael Ramírez Mendoza

Codirector de tesis

Dr. Modesto Ortiz Figueroa

Codirector de tesis

En este trabajo se pretende caracterizar al Alto Golfo de California (AGC) en cuanto a la circulación por marea, hidrografía, abundancia de organismos bentónicos, granulometría y transporte de sedimento. La circulación por marea se calculó empleando un modelo numérico de alta resolución con la batimetría más actualizada cortesía de Alvarez *et al.* (2009). Los resultados indican la presencia de una corriente residual en forma de giro ciclónico que entra por el lado de Sonora hasta la profundidad de 30 m y sale por el eje central del AGC a través de un par de vórtices, siendo ésta la corriente residual más importante que “ventila” al AGC. También se aprecia una corriente residual orientada a lo largo del eje central proveniente del extremo norte del AGC que también sale por el eje central. En contraste, tanto al norte como al oeste del AGC, la circulación en forma de giros mantiene confinada a estas aguas impidiendo su salida del AGC. El transporte del sedimento por tracción es en general hacia el sur y el sedimento en suspensión es transportado por las corrientes residuales. Se propone que ambos mecanismos de transporte de sedimento han permitido que haya menor abundancia de sedimento fino del lado de Sonora en el área comprendida entre las isóbatas de 30 y 60 m, área que a su vez es la más “ventilada” por las corrientes de marea y en donde a su vez se encuentra la mayor abundancia de organismos bentónicos en aguas más cálidas y menos salinas.

Palabras clave: Golfo de California, batimetría de alta resolución, transporte de sedimento, organismos bentónicos.

Abstract of the thesis presented by Alejandra Quintanilla Zurita as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Physical Oceanography.

Hydrodynamics in the Upper Gulf of California and its relationship with sediment flow and relative abundance of benthic organisms.

Abstract approved by:

Dr. Rafael Ramírez Mendoza

Thesis Co-Director

Dr. Modesto Ortiz Figueroa

Thesis Co-Director

This study is focused on the characterization of tidal circulation, the abundance of benthic organisms, hydrography, granulometry, and sediment transport in the Upper Gulf of California (AGC). The tidal circulation is estimated here by solving the Shallow Water Model Equations numerically in an updated high-resolution bathymetry courtesy of Alvarez et al. (2009). The results indicate the presence of a residual current with the shape of a cyclonic gyre, entering to the AGC by the coast of Sonora up to the depth of 30 m, turning Southward by the AGC central axis, to finally leave the AGC through a pair of vortexes, being this the most important residual current that "vents" the AGC. In addition, a residual current produced at the northern part of the AGC is flowing along the central axis that finally joint with the residual current that "vents" the AGC. In contrast, the residual circulation in the form of gyres in either the north and west side, tend to keep these waters confined within the gyres, preventing to leave from the AGC. The estimated bed-load sediment transport is mainly southward and suspended sediment is transported by the residual currents. These findings suggest that both bed and suspended sediment transport has allowed less abundance of fine sediment towards the coast of Sonora in the area between the 30 and 60 m isobaths, where in turn, the water is well vent by the residual currents, the benthic organisms are more abundant, and the waters are warmer and less salty.

Keywords: Gulf of California, high-resolution bathymetry, sediment transport, benthic organism.

Dedicatoria

A mis padres Fernando y Sonia.

A mi hermano Santiago.

A mis abuelos Carmita y Arnaldo.

A Fer.

MILITIA EST VITA

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría. No. de becario: 634264.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada y al Posgrado en Oceanografía Física.

A mis directores de tesis, Dr. Modesto Ortiz y Dr. Rafael Ramírez, por aceptarme como su alumna y dedicarle tanto tiempo a este trabajo. Gracias por todo lo que me enseñaron y por el tiempo dedicado. A los miembros de mi comité, Dr. José Gómez y Dra. Sharon Herzka, gracias por sus valiosas observaciones para mejorar este trabajo.

A todos los profesores del departamento de Oceanografía Física por todo el tiempo dedicado a los cursos y siempre tener la puerta abierta para resolver las dudas que surgieron en mi tiempo en CICESE.

A la Secretaria de Marina por la invitación a participar en los cruceros "Vaquita", a la tripulación del B.O. Río Tecolutla, a los técnicos del departamento Arturo I. Ocampo Torres, Erick R. Rivera Lemus, Víctor M. Godínez Sandoval y Maricarmen Necochea Zamora por obtener todos los datos y realizar el trabajo de laboratorio necesario para este trabajo.

A todo el personal administrativo y técnico de CICESE, en especial a Lupita Pacheco.

A mis amigos de generación Bere, Arantxa, Dani, Gina, Gaby, Mariam, Julieta, Oscar, Quinn, Paulino, Marco, Camilo, David y Yandy por siempre ayudarme y por todos los momentos que compartimos en Ensenada.

A mis amigos que vinieron conmigo desde Puebla y que hicieron que nunca me sintiera sola en Ensenada, team BUAP.

A los CNSNTE.

A mi familia por siempre apoyarme en esta travesía, sin ellos nada de esto sería posible.

A mi novio Fernando por siempre estar para mí, eres lo más bonito que me paso en Ensenada.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español	ii
Resumen en inglés	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras	ix
Lista de tablas	xii
Capítulo 1. Introducción	
1.1. Antecedentes	1
1.1.1. Área de estudio	1
1.1.2. Mareas	2
1.1.3. Sedimento en el Alto Golfo de California	2
1.2. Macrofauna bentónica en ambiente sedimentario suave	4
1.2.1. Circulación por mareas	5
1.3. Justificación	7
1.4. Objetivos	8
1.4.1. Objetivo general	8
1.4.2. Objetivos específicos	8
Capítulo 2. Metodología	
2.1. Campañas Oceanográficas	9
2.2. Análisis de sedimento	10
2.2.1. Granulometría	10
2.2.2. Parámetros bióticos	10
2.3. Modelo numérico	11
2.3.1. Batimetría y parámetros del modelo	13
2.4. Transporte de sedimento	15
Capítulo 3. Resultados	
3.1. Hidrografía	18
3.1.1. Temperatura	18
3.1.2. Salinidad	19
3.2. Granulometría	21
3.3. Macrofauna bentónica	23
3.4. Validación y resultados del modelo numérico hidrodinámico	25
3.4.1. Mapas de amplitud y fase	25
3.4.2. Nivel del mar	28
3.4.3. Corrientes de marea	29
3.5. Corriente residual inducida por marea y líneas de corriente	30
3.6. Transporte de Sedimento	35

Capítulo 4. Discusión y conclusiones

Literatura citada 42

Lista de figuras

Figura	Página
1. Alto Golfo de California. Tomado de Google earth, 2006	1
2. Variación espacial del tamaño de grano medio en el Alto Golfo de California. Modificado de Carriquiry <i>et al.</i> (2001).	3
3. Transporte instáneo de sedimnto en el norte de Golfo de California para cuatro tiempos diferentes del periodo T de la componente M2. a)T=T/4, b)T=T/2, c)T=3T/4 y d)T. Modificado de Hernández-Azcúnaga <i>et al.</i> (2014).	4
4. Corrientes residuales en el norte del Golfo de California, para los primeros 10 m. Modificado de Marinone <i>et al.</i> (2008).	5
5. Posición de partículas pasivas después de a) 2 semanas, b) 4 semanas, c) 6 semanas y d) 8 semanas. Modificado de Marinone <i>et al.</i> (2008).	6
6. Promedio de corrientes residuales en el Alto Golfo de California. Modificado de Montes <i>et al.</i> (2015).	7
7. Mapa de los sitios donde se realizaron los muestreos. A) corresponde al polígono del Alto Golfo de California, donde el azul indica el lugar del anclaje del correntómetro Vector. B) corresponde al polígono de la vaquita marina y Delta del Río Colorado en donde además de las estaciones indicadas en (A) se realizaron las estaciones que se indican en (B).	9
8. Golfo de California dividido en 4 mallas anidadas. Cada malla con resolución de: A) 2501 m, B) 833 m, C) 277 m y D) 92 m.	14
9. Factor de proporcionalidad K en función del esfuerzo relativo para tamaños de grano 0.19 mm, 0.28 mm, 0.45 mm y 0.93 mm. Modificado de Ortiz <i>et al.</i> (2003).	16
10. Umbrales de velocidad a 100 cm del fondo en función del diámetro del sedimento. Modificado de Ortiz <i>et al.</i> (2003).	17
11. Distribución espacial de la temperatura en el fondo del Alto Golfo de California. Las líneas grises representan las isóbatas de 10, 30 y 50 m y las líneas negras representan las isotermas. Los puntos rojos representan los puntos de muestreo.	18
12. Perfiles de temperatura para las 23 estaciones muestreadas con CTD.	19
13. Distribución espacial de la salinidad en el fondo del Alto Golfo de California. Las líneas grises representan las isobatas de 10, 30 y 50 m y las líneas negras son las isopicnas. Los puntos rojos representan los puntos de muestreo.	20
14. Perfiles de salinidad para las 23 estaciones muestreadas con CTD.	21
15. Distribución típica del tamaño de grano representativa de todas las estaciones.	22

Figura	Página
16. Distribución del tamaño de grano promedio en unidades ϕ en el Alto Golfo de California. Las líneas grises muestran las isobatas de 10, 30 y 50 m y las líneas negras son los contornos de tamaño de grano. Los puntos rosas representan los puntos de muestreo.	23
17. Abundancia de organismos macrobentónicos por estación y su distribución por Filo	24
18. Distribución espacial de la abundancia de organismos macrobentónicos en el AGC. Las líneas grises muestran las isobatas de 10, 30 y 50 m y las líneas negras son los contornos de número de organismos por punto. Los puntos azules representan los puntos de muestreo.	25
19. Mapa cotidal de la componente M2 en el Golfo de California, a partir de los resultados del modelo. A) Amplitud en centímetros y B) Fase 105 W.G. .	26
20. Mapa cotidal de la componente M2 en el Golfo de California. Tomado de Morales Pérez y Gutiérrez de Velasco (1989). A) Amplitud en centímetros y B) Fase 105 W.G.	27
21. Mapa cotidal de la componente K1 en el Golfo de California, a partir de los resultados del modelo. A) Amplitud en centímetros y B) Fase 105 W.G. .	27
22. Mapa cotidal de la componente K1 en el Golfo de California. Tomado de Morales Pérez y Gutiérrez de Velasco (1989). A) Amplitud en centímetros y B) Fase 105 W.G.	28
23. Series de tiempo de predicción de marea (negro) contra resultados del modelo (magenta). A) San Felipe y B) Golfo de Santa Clara.	29
24. Series de tiempo de datos del anclaje (negro) contra modelo (rojo). A) variación del nivel del mar, B) componente u de la velocidad y C) componente v de la velocidad.	30
25. Mapa de corriente residual inducida por marea en el Alto Golfo de California. Las líneas grises muestran las isobatas de 10, 30 y 50 m. Los vectores de dirección están normalizados y la magnitud se encuentra representada por la escala de colores. Se muestran uno de cada 40 vectores.	32
26. Mapa de líneas de corriente residual inducida por marea. Las flechas indican la dirección de la corriente.	33
27. Mapa de tiempo de residencia de partículas en el AGC. La barra de colores indica el tiempo en días. Las zonas en blanco indican zonas de atrapamiento o recirculación de partículas.	35
28. Transporte de sedimento en el Alto Golfo de California en un ciclo de marea (15 días). A) se muestra el transporte de sedimento para partículas con un diámetro de 2.39 ϕ , B) 1.83 ϕ , C) 1.15 ϕ y D) 0.1 ϕ . Los vectores de dirección están normalizados y la magnitud se encuentra representada por la escala de colores. Se muestran uno de cada 70 vectores.	36

Figura	Página
29. Capacidad de transporte de sedimento por tracción de marea en el Alto Golfo de California en un ciclo de marea (15 días) para el tamaño de grano 0.1ϕ . Los vectores están normalizados y la magnitud se encuentra representada por la escala de colores. Se muestran uno de cada 70 vectores.	37
30. Trayectoria de partículas pasivas inducidas por velocidades instantáneas en 15 días.	39
31. A)Tamaño de grano promedio, B)Abundancia de organismos, C)CRIM, D)Tiempo de residencia, E)Transporte de sedimento y D)Salinidad.	41

Lista de tablas

Tabla	Página
1. Valores del parámetro $C(\phi)$ en función del diámetro del grano Ortiz et al. (2003).	16

Capítulo 1. Introducción

1.1. Antecedentes

1.1.1. Área de estudio

El Alto Golfo de California (AGC) es el extremo norte y poco profundo del Golfo de California (GdC), donde se encuentra el área de la "Reserva de la Biósfera del Alto Golfo de California y delta del río Colorado". Geográficamente se puede definir como el extremo norte del GdC limitado por Puerto Peñasco, Sonora, y San Felipe, Baja California, como se muestra en la figura 1 (Brusca *et al.*, 2017).

Esta área es de gran relevancia ya que es el hábitat de dos especies endémicas que se encuentran en peligro de extinción: la vaquita marina (*Phocoena sinus*) y la totoaba (*Totoaba macdonaldi*); además de que se considera una de las zonas pesqueras más importantes en México donde se encuentran especies como el camarón azul (*Litopenaeus stylirostris*) y curvina golfinia (*Cynoscion othonopterus*), con una capturas anuales promedio de 1000 y 2700 toneladas (Erisman *et al.*, 2015).



Figura 1. Alto Golfo de California. Tomado de Google earth, 2006

El AGC es considerado un estuario inverso donde la salinidad aumenta hacia la

cabeza durante todo el año debido a la falta de agua dulce proveniente del Río Colorado y a las altas tasas de evaporación de hasta 1.15 m/año (Lavín *et al.*, 1998). Este aumento de salinidad y por tanto de densidad hacia la cabeza produce corrientes de gravedad de un tipo de agua conocida como “Gulf Water” que fluye hacia el Sur (Bray, 1988), con temperatura y salinidad típicas de 12.0°C y 34.5-36.0 PSU respectivamente.

1.1.2. Mareas

Las mareas en el AGC son extraordinariamente altas, llegando a alcanzar hasta 8 m de diferencia de altura entre las bajamares y pleamares registradas en el observatorio de Nivel de Mar en San Felipe, B.C. (comunicación personal Modesto Ortiz, 2019). Morales Pérez y Gutiérrez de Velasco (1989) analizaron la marea tomando datos de 33 estaciones mareográficas a lo largo del GdC para elaborar los mapas cotidales de las principales componentes armónicas de la marea. Encontraron que la marea es de tipo mixta a lo largo del Golfo, con dominancia semidiurna en el extremo norte (AGC), y que existe un punto anfidrómico en la parte central del GdC en las componentes semidiurnas.

1.1.3. Sedimento en el Alto Golfo de California

El relieve del fondo marino del AGC está dominado por un conjunto de crestas y valles paralelos entre sí orientados en dirección noroeste a lo largo del eje longitudinal del Golfo; nueve de estas crestas y valles se encuentran entre las profundidades de 10 a 50 m (Alvarez *et al.*, 2009). El fondo está cubierto por una capa de material fluvial no consolidado proveniente del Río Colorado (Carriquiry y Sánchez, 1999) y el patrón de distribución general de los sedimentos superficiales muestra un lado este arenoso frente a Sonora, en contraste con un lado oeste fangoso en la costa de Baja California (Alvarez *et al.*, 2009).

El estudio sedimentológico de Carriquiry *et al.* (2001) indica que el tamaño de grano medio está en el rango de 2.0-7.0 ϕ encontrando el sedimento más fino en el lado noroeste del AGC y el sedimento más grueso en el lado este, como se observa en

la figura 3, indicando a su vez que el delta del Río Colorado continúa exportando sedimento debido a las corrientes de marea.

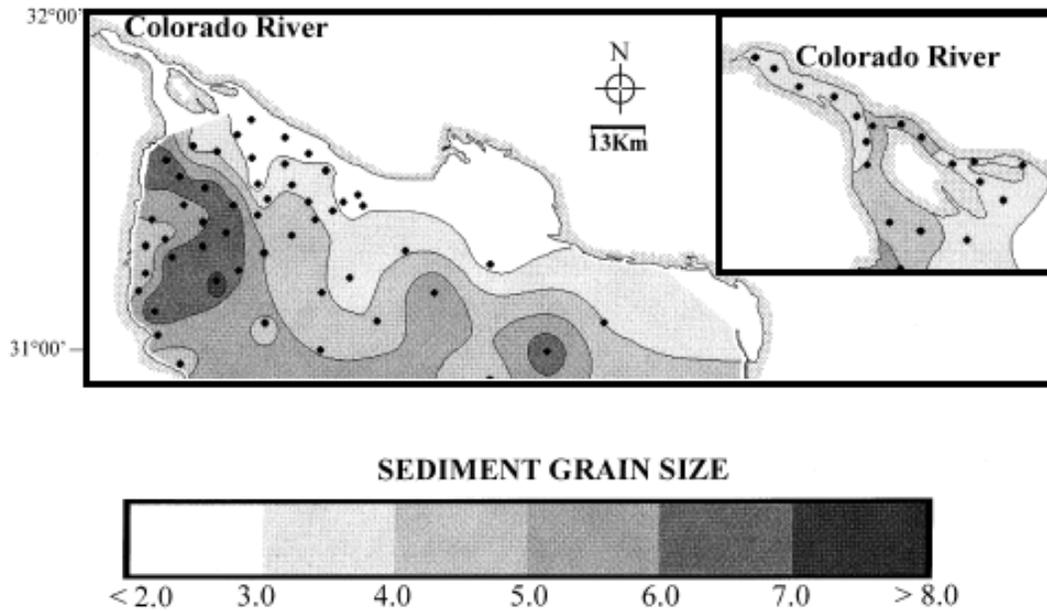


Figura 2. Variación espacial del tamaño de grano medio en el Alto Golfo de California. Modificado de Carriquiry *et al.* (2001).

Hernández-Azcúnaga *et al.* (2014) simularon el transporte de sedimento en el norte del GdC con un modelo bidimensional con las ecuaciones de conservación de masa y volumen integradas verticalmente, acoplado con el modelo de van Rijn *et al.* (2007) para el transporte de sedimento. El modelo fué forzado únicamente con la componente M2. Encontraron que en el AGC existen tres zonas donde se puede generar el transporte de sedimento (figura 2).

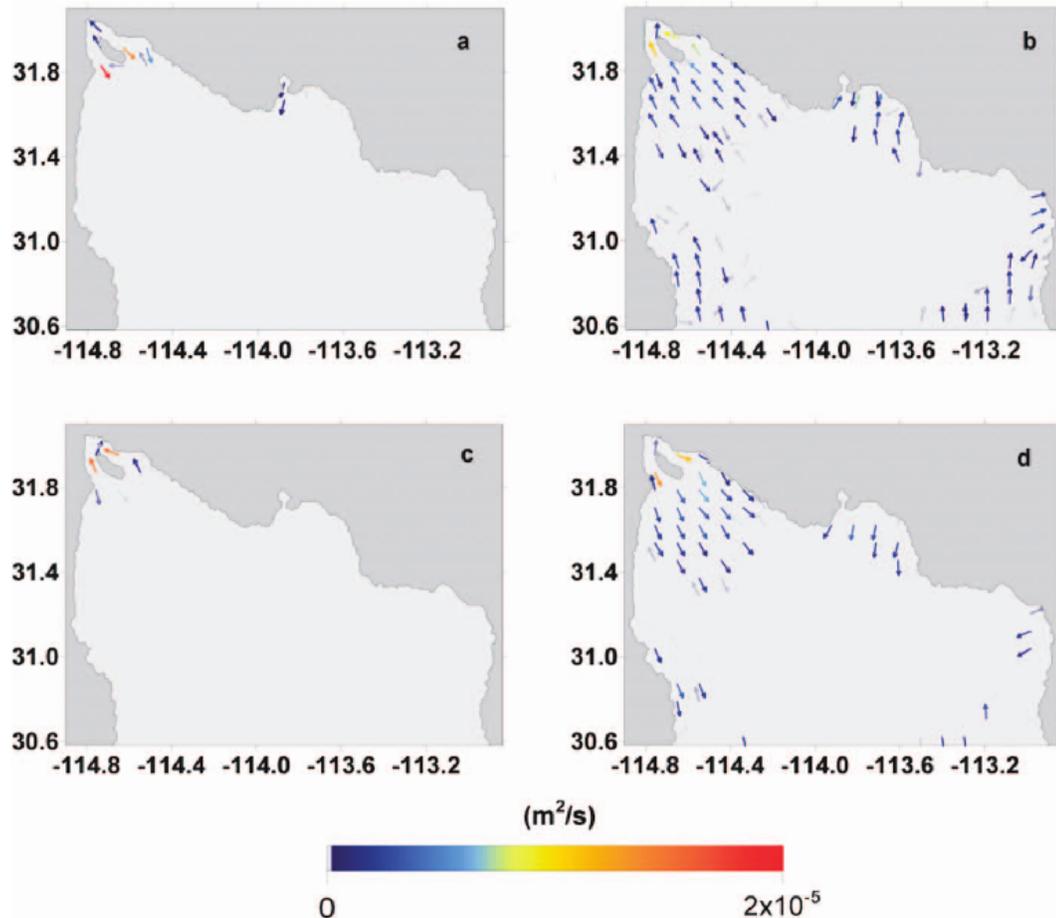


Figura 3. Transporte instantáneo de sedimento en el norte de Golfo de California para cuatro tiempos diferentes del periodo T de la componente $M2$. a) $T=T/4$, b) $T=T/2$, c) $T=3T/4$ y d) T . Modificado de Hernández-Azcúnaga *et al.* (2014).

1.2. Macrofauna bentónica en ambiente sedimentario suave

En el AGC no encontramos antecedentes de estudios de organismos macrobentónicos, sin embargo, los estudios de este tipo de hábitat en otros lugares indican que la biomasa bentónica está dominada por invertebrados macrobentónicos ($> 0.5\text{mm}$), principalmente poliquetos, crustáceos, equinodermos y moluscos (Bertness *et al.*, 2001), en suelos lodosos que son ideales para varias especies de poliquetos, cangrejos y gasterópodos, y que a su vez, la materia orgánica en forma de fitoplancton o materia residual generada por el zooplakton es la mayor fuente de alimento de la mayoría de las especies de macrofauna bentónica (Dauwe *et al.*, 1998). Los organismos filtradores se encuentran en el fondo en zonas con aporte de materia orgánica donde las velocidades de corriente altas crean un esfuerzo de fondo que levanta el sedimento y lo

pone en suspensión abasteciendo a los filtros de alimento (Bertness *et al.*, 2001).

1.2.1. Circulación por mareas

La hidrodinámica en general del GdC ha sido objeto de un gran número de estudios mediante observaciones y modelos numéricos. Uno de los trabajos más recientes es el de Marinone *et al.* (2008) que describe mediante un modelo numérico las corrientes residuales de marea y la conectividad entre las diferentes regiones del norte del GdC. En general, la circulación residual describe un gran giro ciclónico que abarca tanto al AGC como a la región de las grandes islas (figura 4). Aún cuando la resolución de sus resultados (4×5 km) no es suficiente para describir las particularidades de la circulación del AGC, la excursión lagrangeana de partículas pasivas liberadas en el modelo numérico indica que éstas tienden a concentrarse en la zona noroeste del AGC (figura 5).

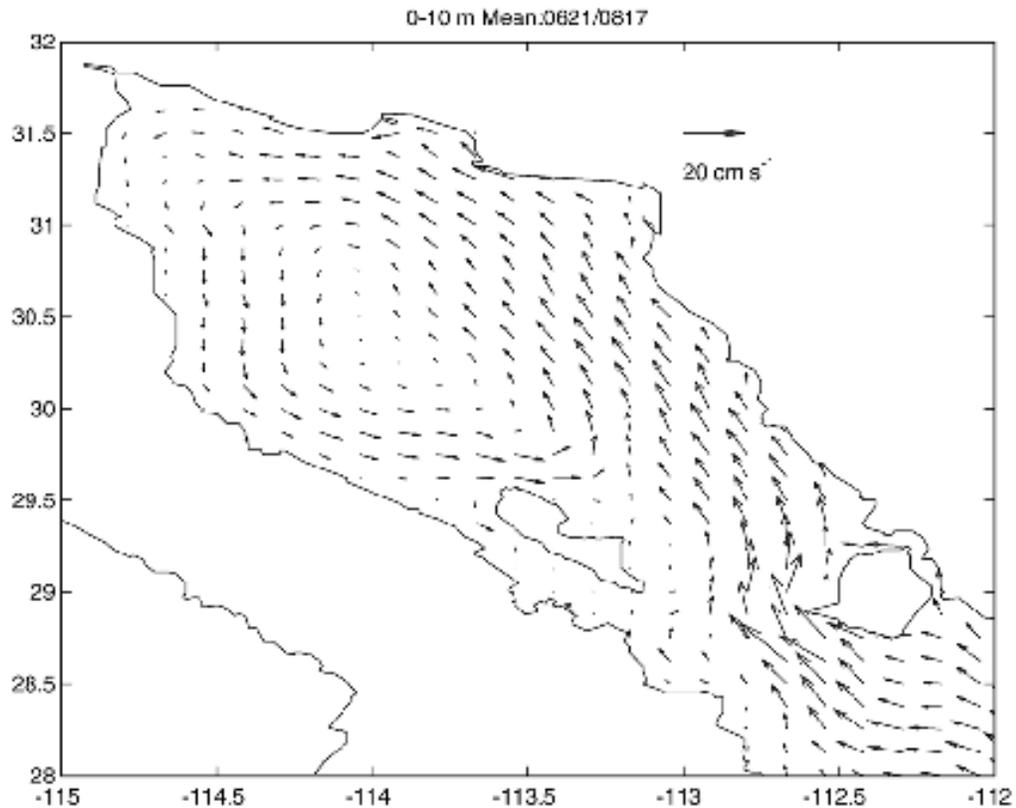


Figura 4. Corrientes residuales en el norte del Golfo de California, para los primeros 10 m. Modificado de Marinone *et al.* (2008).

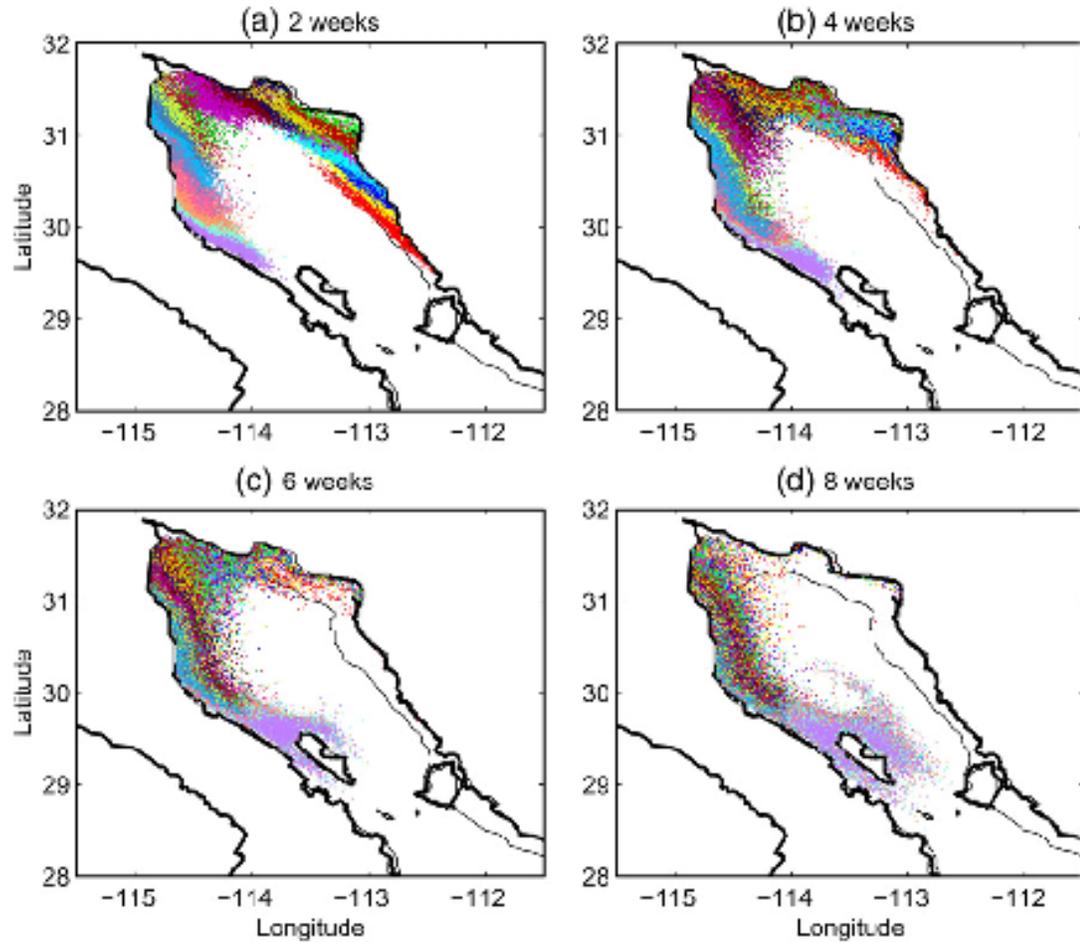


Figura 5. Posición de partículas pasivas después de a) 2 semanas, b) 4 semanas, c) 6 semanas y d) 8 semanas. Modificado de Marinone *et al.* (2008).

Montes *et al.* (2015) estudiaron con mayor detalle el AGC y sus corrientes residuales. Utilizaron el modelo ROMS con una resolución espacial de ~ 1 km con 20 capas, la batimetría la obtenida por Alvarez *et al.* (2009) y como forzamientos utilizaron climatología de flujos de calor y el viento además de la marea obtenida del modelo TPSX06. El promedio de la circulación residual anual (figura 6) muestra una circulación ciclónica, con flujo de dirección variable al sur de San Felipe.

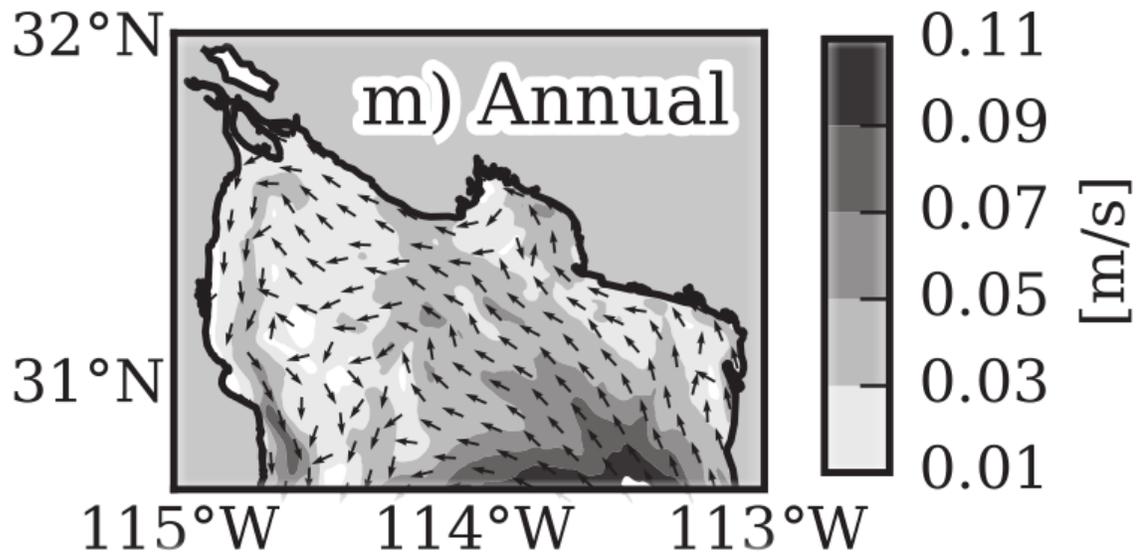


Figura 6. Promedio de corrientes residuales en el Alto Golfo de California. Modificado de Montes *et al.* (2015).

1.3. Justificación

En febrero de 2015, el gobierno federal anunció la Estrategia Integral para la Recuperación de la Vaquita Marina y la Totoaba. Como medida de protección se amplió el polígono de protección en el AGC (1 millón 300 mil hectáreas), desde el delta del Río Colorado, hasta la línea que une a los puertos de San Felipe, B.C., y Puerto Peñasco, Son., para garantizar la protección de ambas especies, y se decretó la suspensión por dos años de la pesca comercial mediante el uso de redes de enmalle (<https://www.gob.mx/semarnat/articulos/proteccion-de-la-vaquita-marina-compromiso-de-mexico>). A consecuencia de esta iniciativa el CICESE participó en dos cruceros oceanográficos en el polígono de protección con el objetivo de caracterizar con alta resolución el hábitat de la vaquita marina en cuanto a hidrografía, granulometría del fondo marino y, por vez primera, en cuanto a la caracterización y abundancia de organismos bentónicos.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Estudiar la circulación por marea, la distribución y transporte de sedimento, así como la distribución y composición de organismos de la infauna en el Alto Golfo de California.

1.4.2. Objetivos específicos

Caracterizar la granulometría y distribución del sedimento en el Alto Golfo de California utilizando muestras de sedimento de fondo y datos hidrográficos de CTD obtenidos en la campaña oceanográfica "Vaquita" en el invierno de 2017.

Estudiar mediante el uso del modelo numérico hidrodinámico de Goto *et al.* (1997) cómo las corrientes de marea influyen sobre el transporte de sedimento.

Analizar la relación entre la distribución del tamaño de grano, la circulación por marea y la abundancia de los organismos bentónicos.

Capítulo 2. Metodología

2.1. Campañas Oceanográficas

En este trabajo se analizan los datos de la campaña oceanográfica “Vaquita-17” que se llevó a cabo entre el 23 de febrero y el 3 de marzo del 2017, a bordo del B.O. RÍO TECOLUTLA” (cortesía de la Secretaría de Marina). La red de estaciones constó de 32 sitios, distribuidos como se indica en la figura 7. En cada una de las estaciones se obtuvieron datos hidrográficos con CTD, registros de las corrientes de fondo, y muestras de sedimento y de organismos bentónicos con draga.

- Lances con CTD (Conductivity-Temperature-Depth).
- Muestras de sedimento de fondo con draga Van Veen.
- Instalación de anclaje con correntómetro tipo Vector.

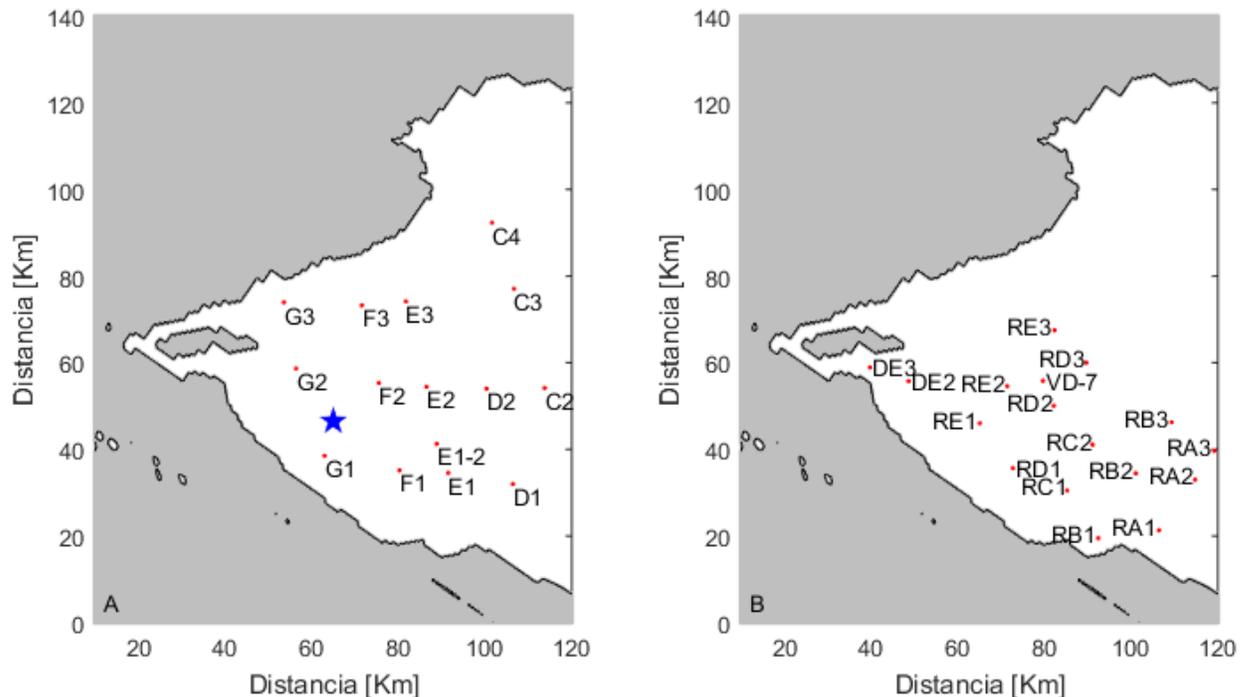


Figura 7. Mapa de los sitios donde se realizaron los muestreos. A) corresponde al polígono del Alto Golfo de California, donde el azul indica el lugar del anclaje del correntómetro Vector. B) corresponde al polígono de la vaquita marina y Delta del Río Colorado en donde además de las estaciones indicadas en (A) se realizaron las estaciones que se indican en (B).

2.2. Análisis de sedimento

Las muestras de sedimento fueron obtenidas con una draga tipo Van Veen de 21.7 litros de capacidad con la cual se pueden extraer muestras de hasta 20 cm de profundidad. Al momento de la extracción de las muestras se pudo observar que eran lodos arenosos con gran presencia de organismos por lo que el análisis se divide en granulométrico y de parámetros bióticos.

2.2.1. Granulometría

La muestra se tamizó en húmedo con una malla de $350\ \mu\text{m}$ y agua destilada. Al sedimento más fino que pasó la malla de $350\ \mu\text{m}$ se le agregó oxalato de sodio como dispersante. Posteriormente se tomaron lecturas de la distribución de tamaños de grano con el analizador de partículas (LISST). Se encontraron 29 tamaños de grano que van de $3.4\text{-}350.19\ \mu\text{m}$. A partir de la distribución de tamaño de grano se realizó la estadística granulométrica para cada estación empleando el método GRADISTAT (Blott y Pye, 2001), que a su vez se basa en la metodología de Folk y Ward (1957).

El analizador de partículas LISST (Laser In-Situ Scattering and Transmissometry) obtiene la distribución del tamaño de las partículas a partir de la difracción que éstas producen de una luz láser. Para mayor información del equipo puede consultar www.SequoiaSci.com.

2.2.2. Parámetros bióticos

De la muestra de sedimento de cada estación se recuperaron los organismos de macrofauna bentónica, que son los organismos que por su tamaño no son capaces de pasar una malla de $500\ \mu\text{m}$, para después ser estudiados en el laboratorio con la siguiente metodología (Necoechea Zamora *et al.*, 2018):

- Se fijaron con una solución de formaldehído preparada al 4% de concentración y neutralizada con bórax.

- Una vez fijados, se les retiró la solución de formaldehído lavándolos cuidadosamente con agua y utilizando un tamiz de 500 μm para dejar pasar el sedimento fino y retener los organismos de macrofauna presentes en cada muestra.
- La macrofauna retenida fue transferida a un frasco para ser preservada en una solución de alcohol etílico preparado al 70 %.
- Con ayuda de un microscopio estereoscópico, cajas petri, pinzas de punta fina, y viales en diferentes tamaños, se hizo la clasificación taxonómica en nivel Filo de todos los organismos de macrofauna encontrados en cada una de las muestras colectadas.
- Ya identificados taxonómicamente todos los organismos bénticos, se elaboró un listado sistemático de las familias encontradas y siguiendo el orden propuesto por Fauchald (1977).

2.3. Modelo numérico

El modelo numérico hidrodinámico de Goto *et al.* (1997), es un modelo barotrópico que consiste en la integración en diferencias finitas de las ecuaciones de conservación de masa y momento para ondas largas en aguas poco profundas:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{U^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{UV}{D} \right) - fV + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gm^2}{D^{\frac{7}{3}}} U \sqrt{U^2 + V^2} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{UV}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{V^2}{D} \right) + fU + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gm^2}{D^{\frac{7}{3}}} V \sqrt{U^2 + V^2} = 0 \quad (3)$$

En las ecuaciones (1-3), t es el tiempo, x, y son las coordenadas cartesianas, η es el desplazamiento vertical de la superficie del mar con respecto al nivel medio del mar, g es la aceleración gravitacional, h es la profundidad media de la columna de agua, D es la profundidad instantánea de la columna de agua ($\eta + h$), U y V son las componentes

de la velocidad en las direcciones x y y integradas verticalmente en toda la columna de agua, f es el parámetro de Coriolis y m es el parámetro de rugosidad de Manning.

El sistema de ecuaciones diferenciales se resolvió utilizando una malla Arakawa C con base en el esquema de "salto de rana" de Goto *et al.* (1997), que consiste en sustituir las derivadas por diferencias finitas centradas en el espacio y adelantadas en el tiempo e integrarlas en todo el espacio para cada paso de tiempo.

El último término de las ecuaciones 2 y 3 es la fricción de fondo. Sabiendo que esta fricción se expresa como:

$$\frac{\tau_x}{\rho} = \frac{C_D}{2D} u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (4)$$

$$\frac{\tau_y}{\rho} = \frac{C_D}{2D} v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (5)$$

donde τ_x y τ_y son los esfuerzos de fondo, u y v son las componentes de la velocidad en las direcciones x y y , y C_D es el coeficiente de arrastre, este se relaciona con el coeficiente de Manning por

$$m = \sqrt{\frac{C_D D^{\frac{1}{3}}}{2g}} \quad (6)$$

Consecuentemente:

$$\frac{\tau_x}{\rho} = \frac{gm^2}{D^{\frac{4}{3}}} u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (7)$$

$$\frac{\tau_y}{\rho} = \frac{gm^2}{D^{\frac{4}{3}}} v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (8)$$

Al integrar estas ecuaciones en la vertical obtenemos el último término de las ecuaciones (2) y (3).

2.3.1. Batimetría y parámetros del modelo

Debido a que nuestra zona de estudio es solo una pequeña parte del GdC se decidió trabajar con 4 mallas rectangulares anidadas o dominios de integración numérica para representar en alta resolución el AGC. Las mallas tienen una resolución de 2501, 833, 277 y 92 metros, donde la de mayor resolución corresponde a la zona del AGC. El siguiente paso fue rotar la batimetría sobre la esfera terrestre para minimizar la distorsión de la misma al proyectarla en coordenadas cilíndricas, tomando como nuevo ecuador el eje central del GdC. De esta forma se obtuvo un nuevo sistema coordenado centrado a lo largo del eje del GdC. En la zona del AGC se utilizó la batimetría de alta resolución de Alvarez *et al.* (2009), y en el resto del GdC se utilizó la batimetría del banco de datos ETOPO2v2 (cortesía del “National Geophysical Data Center”, 2006). El paso de tiempo de integración del modelo numérico es de 2 segundos en todas las mallas anidadas, sin embargo, las matrices resultantes de los campos dinámicos (η , U y V), se recuperaron a intervalos de tiempo de 10 minutos.

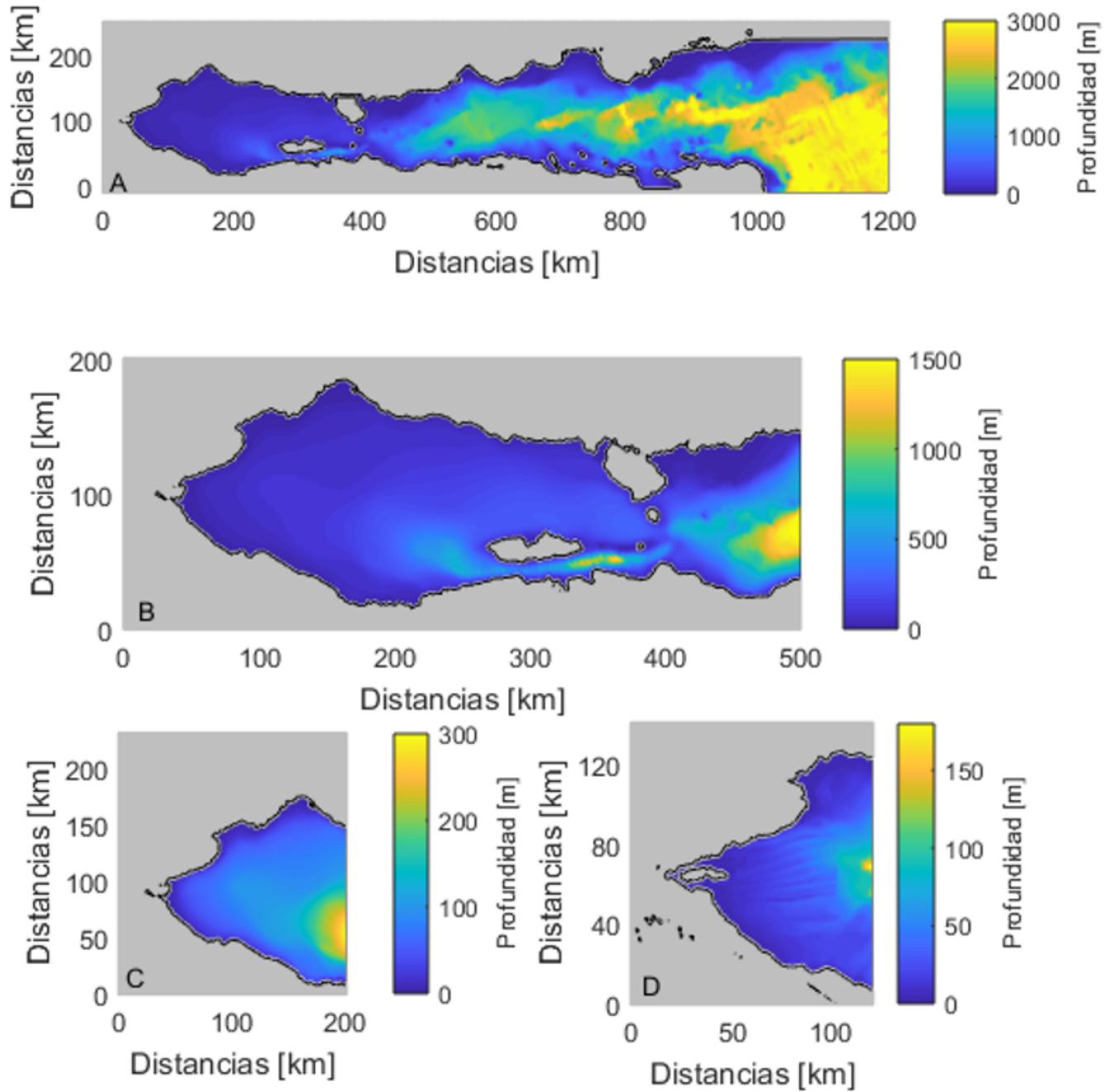


Figura 8. Golfo de California dividido en 4 mallas anidadas. Cada malla con resolución de: A) 2501 m, B) 833 m, C) 277 m y D) 92 m.

2.4. Transporte de sedimento

Sternberg (1972) estimó el transporte de sedimento por tracción basándose en la metodología de Bagnold (1963)

$$\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho_s}\right)gj = K\rho U_*^3 \quad (9)$$

donde j es el flujo de masa de sedimento, g es la gravedad, ρ es la densidad del fluido, ρ_s es la densidad del sedimento, U_* es la velocidad friccional y K es el factor de proporcionalidad. La velocidad friccional está basada en la ley del esfuerzo cuadrático de la velocidad

$$\tau_0 \propto \rho U_z^2 \quad (10)$$

donde τ_0 es el esfuerzo que el flujo de agua ejerce sobre el fondo, U_z es la velocidad promedio del flujo de agua a una distancia z del fondo.

Como 10 no es una igualdad necesita una constante de proporcionalidad para poder relacionar todos los terminos de manera correcta, y fue por eso que Sternberg propuso el coeficiente de arrastre C_{100} . Este coeficiente fue calculado para fondos arenosos naturalmente clasificados como $C_{100} = 3 \times 10^{-3}$. Por lo tanto, la ecuación 10 puede escribirse como:

$$\tau_0 = 3 \times 10^{-3} \rho U_{100}^2 \quad (11)$$

Si se considera un sistema homogéneo, la velocidad friccional puede obtenerse como:

$$U_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = 5.47 \times 10^{-2} U_{100} \quad (12)$$

El factor de proporcionalidad K relaciona el transporte de sedimento con el trabajo que el flujo de agua ejerce sobre el fondo y su valor depende del tamaño del sedimento, el esfuerzo relativo $\frac{\tau_0 - \tau_c}{\tau_c}$. Al ajustar los datos experimentales de Guy *et al.* (1966), (Sternberg, 1972) determino la relación entre estas variables para distintos tipos de tamaño de sedimento como se muestra en la figura 9. A partir de esta figura es posible obtener la relación :

$$\log K = \frac{3.301}{C(\phi)} \frac{\tau_0 - \tau_c}{\tau_c} \quad (13)$$

donde $C(\phi)$ depende del tamaño de grano y sus valores se muestran en la tabla 1 (Ortiz *et al.*, 2003).

Tabla 1. Valores del parámetro $C(\phi)$ en función del diámetro del grano Ortiz *et al.* (2003).

$C(\phi)$	Diámetro (mm)	Diámetro (ϕ)
11	0.19	2.39
10.7	0.28	1.83
4.45	0.45	1.15
1.5	0.93	0.1

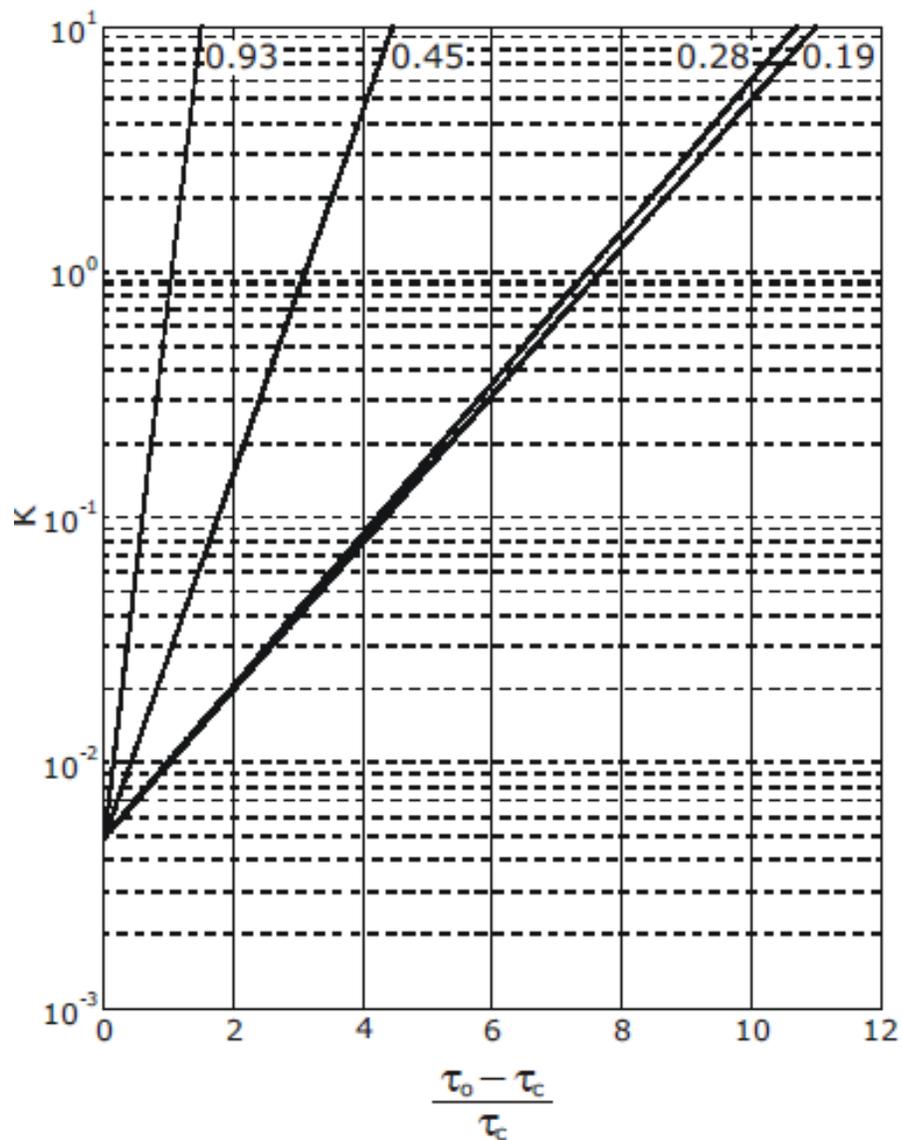


Figura 9. Factor de proporcionalidad K en función del esfuerzo relativo para tamaños de grano 0.19 mm, 0.28 mm, 0.45 mm y 0.93 mm. Modificado de Ortiz *et al.* (2003).

El esfuerzo crítico τ_c se obtiene de la ecuación 11, considerando la velocidad mínima para mantener el movimiento (figura 10). Esta velocidad fue determinada por Sternberg (1972) comparando resultados obtenidos en laboratorios y canales de marea por otros autores.

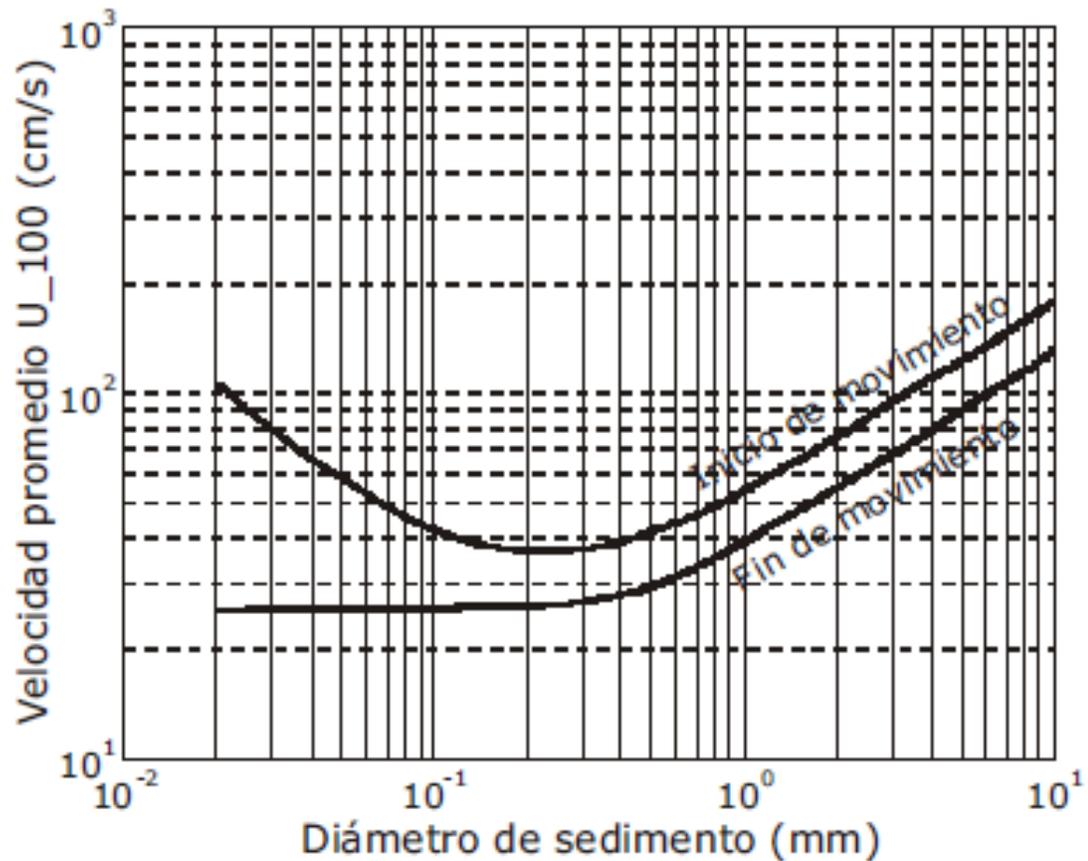


Figura 10. Umbrales de velocidad a 100 cm del fondo en función del diámetro del sedimento. Modificado de Ortiz *et al.* (2003).

Capítulo 3. Resultados

3.1. Hidrografía

3.1.1. Temperatura

La distribución espacial de la temperatura en el fondo del AGC, durante el invierno del 2017 se muestra en la figura 11, en donde se aprecia que el rango de temperatura comprende de los 15.7°C a los 17.45°C. En la zona más profunda (>50 m) se encuentra el mínimo de temperatura y conforme la profundidad disminuye la temperatura aumenta gradualmente, con la diferencia de que en la zona cercana a la costa de Sonora el gradiente de temperatura es más pronunciado.

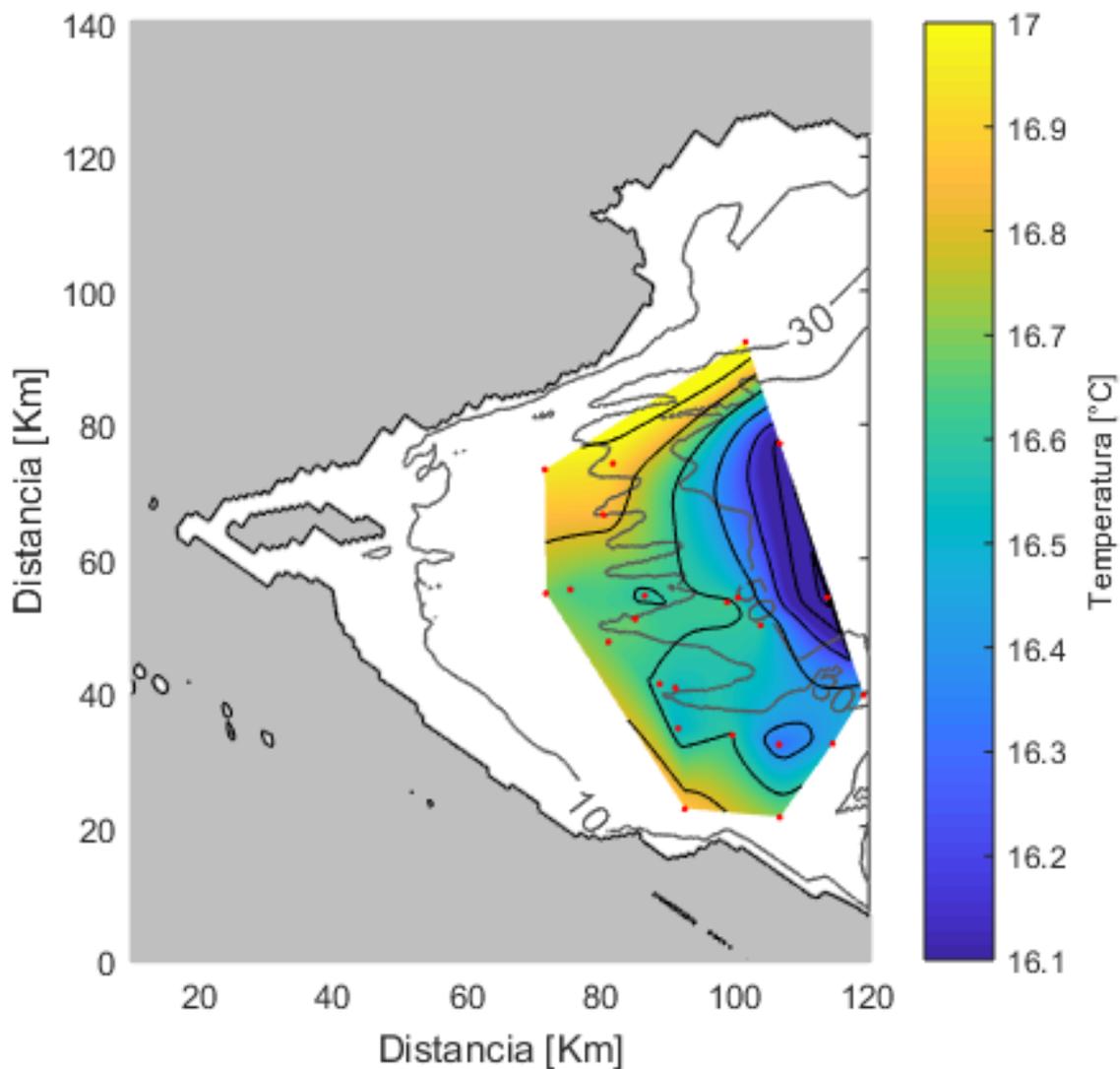


Figura 11. Distribución espacial de la temperatura en el fondo del Alto Golfo de California. Las líneas grises representan las isóbatas de 10, 30 y 50 m y las líneas negras representan las isotermas. Los puntos rojos representan los puntos de muestreo.

La distribución vertical de temperatura en las estaciones de muestreo se muestra en la figura 12. La temperatura superficial comprende de los 16.5°C a los 17.4°C, un rango de 1°C entre todas las estaciones. En las estaciones C2 y C3 se alcanzan las mayores profundidades (98 y 72 m respectivamente) y consecuentemente es donde se encuentran las menores temperaturas ($\sim 16^\circ\text{C}$). En la mayoría de las estaciones se observa un comportamiento \sim barotrópico, y en las que se llegan a observar cambios de temperatura con la profundidad, la variación es menor a 1°C.

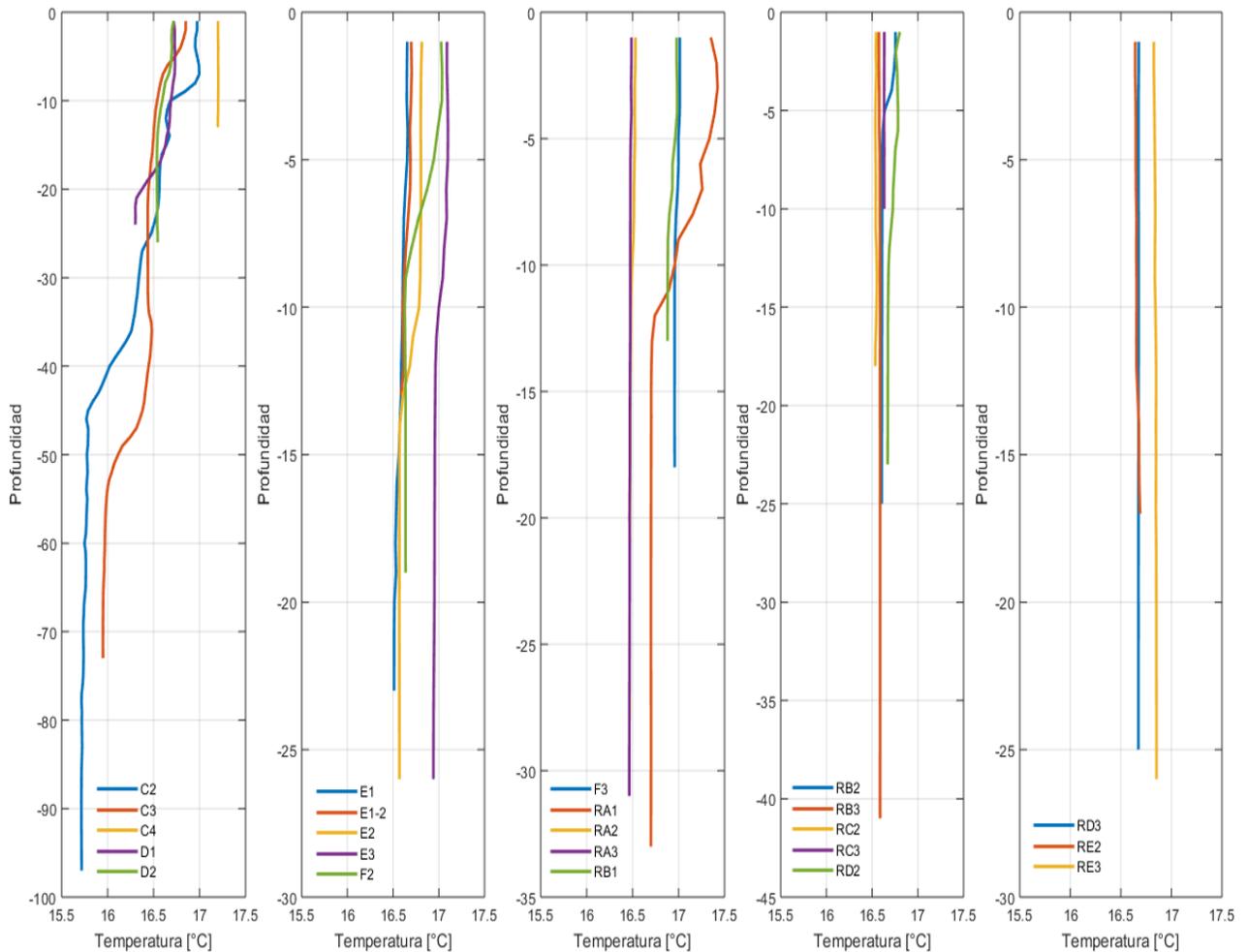


Figura 12. Perfiles de temperatura para las 23 estaciones muestreadas con CTD.

3.1.2. Salinidad

La distribución espacial de la salinidad en el fondo se muestra en la figura 13. El rango de salinidad es de 35.41-35.95 *PSU* en el fondo del AGC. La zona con menor salinidad es la parte mas profunda ($>50\text{ m}$) y la que tiene mayor salinidad es la zona

cercana a la costa de Baja California.

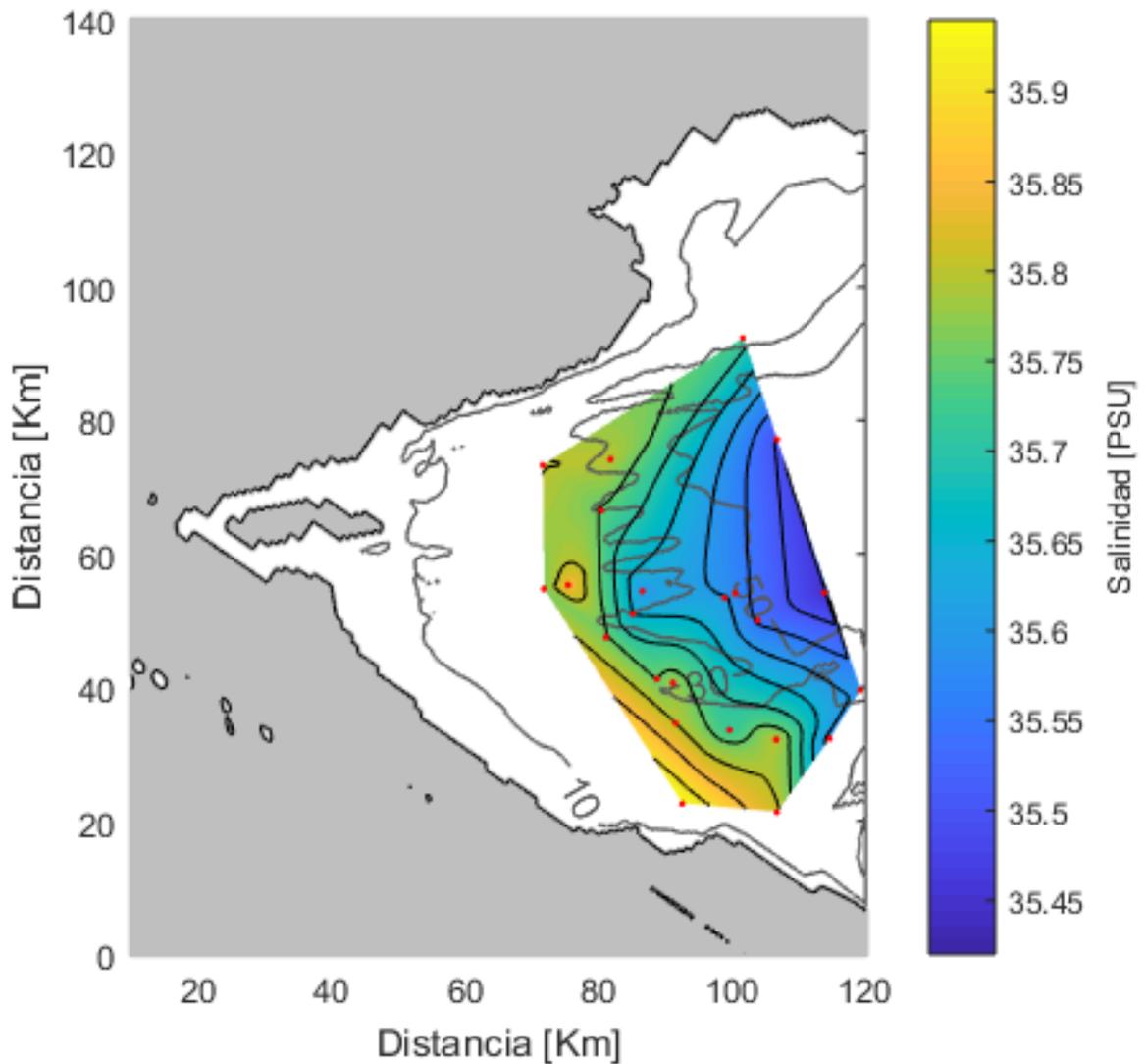


Figura 13. Distribución espacial de la salinidad en el fondo del Alto Golfo de California. Las líneas grises representan las isobatas de 10, 30 y 50 m y las líneas negras son las isopícnas. Los puntos rojos representan los puntos de muestreo.

La figura 14 nos muestra el comportamiento de la salinidad en la columna de agua. La salinidad tiene un comportamiento prácticamente uniforme con una variación máxima entre estaciones de 0.54 *PSU*. Las estaciones D1, E1-2, E1, E3, F2 y RB2 muestran un ligero incremento de salinidad conforme aumenta la profundidad, siendo D1 el punto con mayor incremento (0.15 *PSU*).

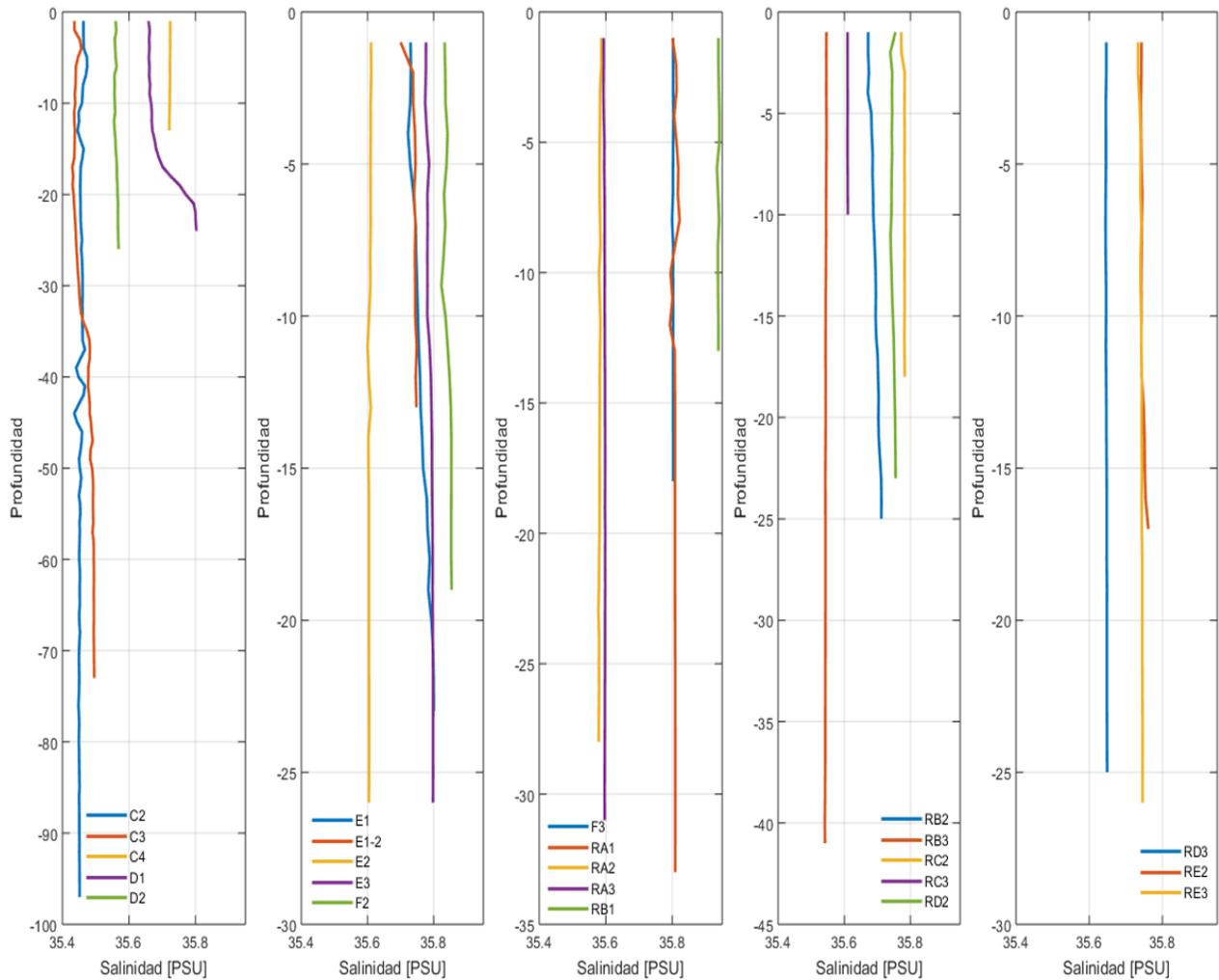


Figura 14. Perfiles de salinidad para las 23 estaciones muestreadas con CTD.

3.2. Granulometría

La mayoría de las partículas de sedimento tuvieron diámetros entre $4.83\text{-}7.48 \phi$, $35\text{-}5.58 \mu\text{m}$ respectivamente. Este rango es característico de sedimento del tipo lodo arenoso, compuesto por limo grueso y arena muy fina (Folk y Ward, 1957). La distribución del tamaño de grano es muy homogénea en toda la zona de estudio, con abundancias similares en los 29 tamaños de grano (figura 15).

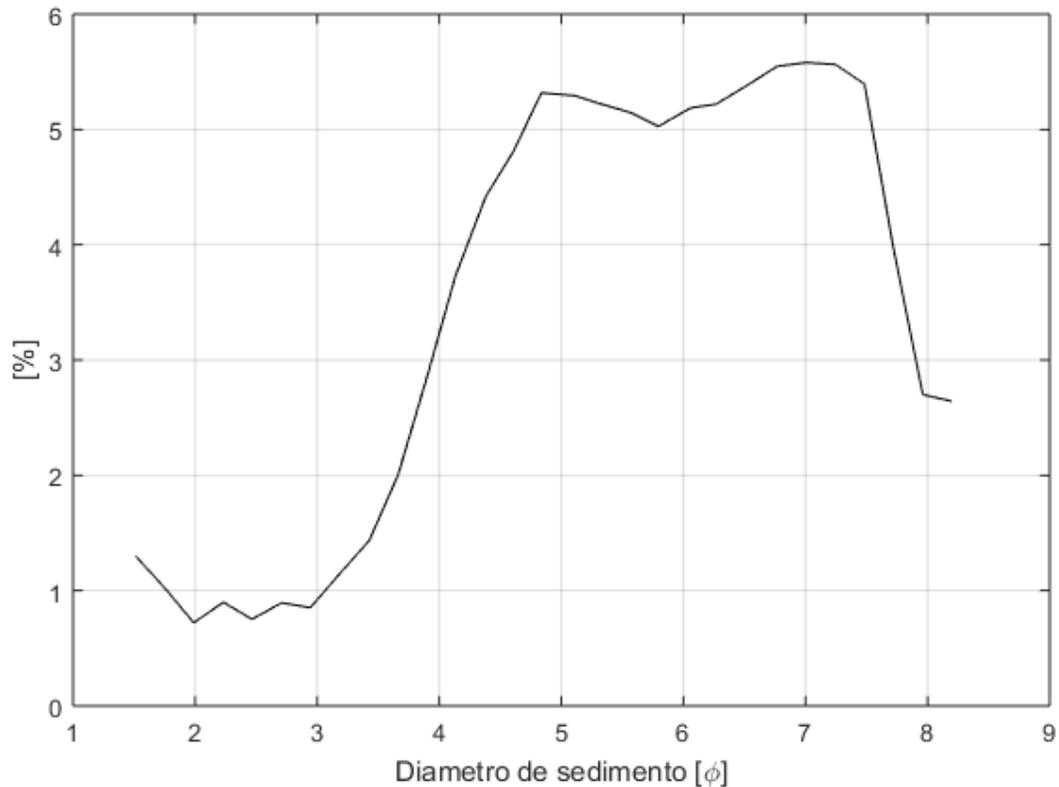


Figura 15. Distribución típica del tamaño de grano representativa de todas las estaciones.

A manera de indicador para caracterizar la distribución de tamaño de grano se empleó el método de promedios ponderados de Folk y Ward (1957). Los promedios ponderados resultaron en un rango de 4.8-6.2 ϕ y su distribución espacial en el AGC se muestran en figura 16. En el delta del Río Colorado se observa una zona con tamaño de grano casi uniforme, entre 6-6.2 ϕ , siendo esta la zona con sedimento más fino. Los sedimentos con tamaño de grano de 4.8-5.1 ϕ se encuentran en la parte central del AGC entre las isóbatas 30 y 50 m, y se extienden desde el centro del AGC hasta la costa de Baja California formando un tipo de barrera que separa el sedimento fino del delta y de la cuenca de Wagner.

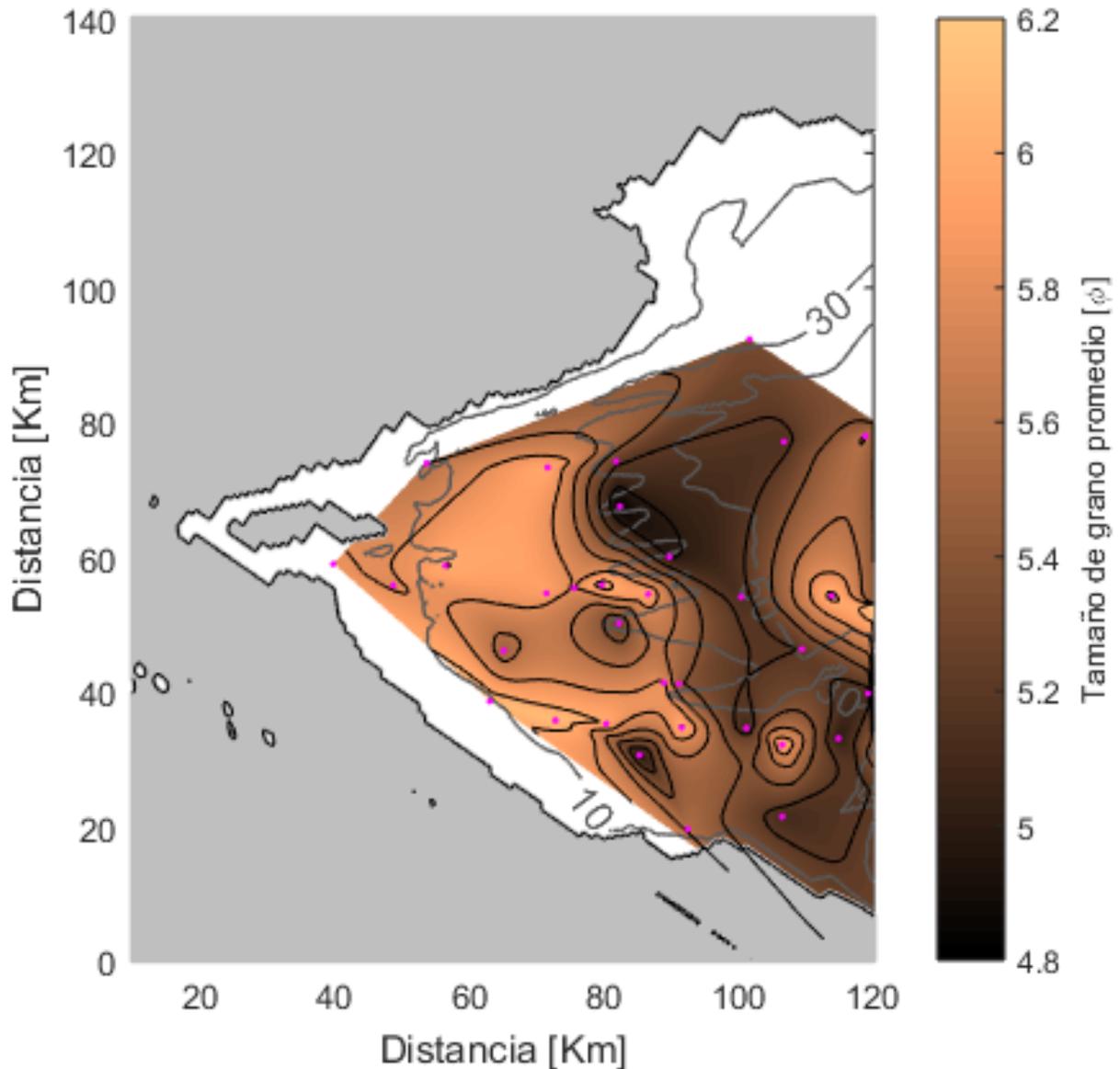


Figura 16. Distribución del tamaño de grano promedio en unidades ϕ en el Alto Golfo de California. Las líneas grises muestran las isobatas de 10, 30 y 50 m y las líneas negras son los contornos de tamaño de grano. Los puntos rosas representan los puntos de muestreo.

3.3. Macrofauna bentónica

Se indentificaron organismos de 12 Filos en las 21 estaciones de muestreo. El total de organismos capturados en cada una de las estaciones del AGC y su clasificación por Filo se muestra en la figura 17. En las estaciones RD2 y RD3 se encontró la mayor abundancia de organismos de entre todas las estaciones, dominada por el Filo Arthropoda. El Filo con mayor presencia en el resto de las estaciones es Annelida a excepción de las estaciones D1, F2 y F3 donde el Filo Mollusca tiene mayor presencia.

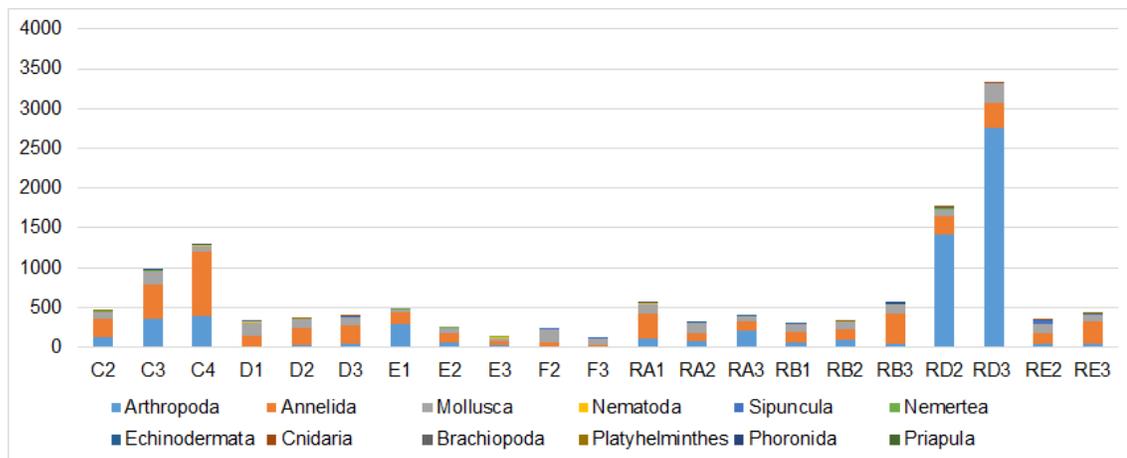


Figura 17. Abundancia de organismos macrobentónicos por estación y su distribución por Filo

La distribución espacial de abundancia de organismos por estación se muestra en la figura 18, en donde se aprecia que se encontró una zona de mayor abundancia de hasta 3000 organismos en el centro del AGC, entre los 30 y 50 m de profundidad. La zona con menor número de organismos es la más cercana al delta del Río Colorado. En el suroeste del ACG, en la parte cercana a la costa de Baja California, se encuentra una zona de abundancia homogénea con aproximadamente 500 organismos por estación.

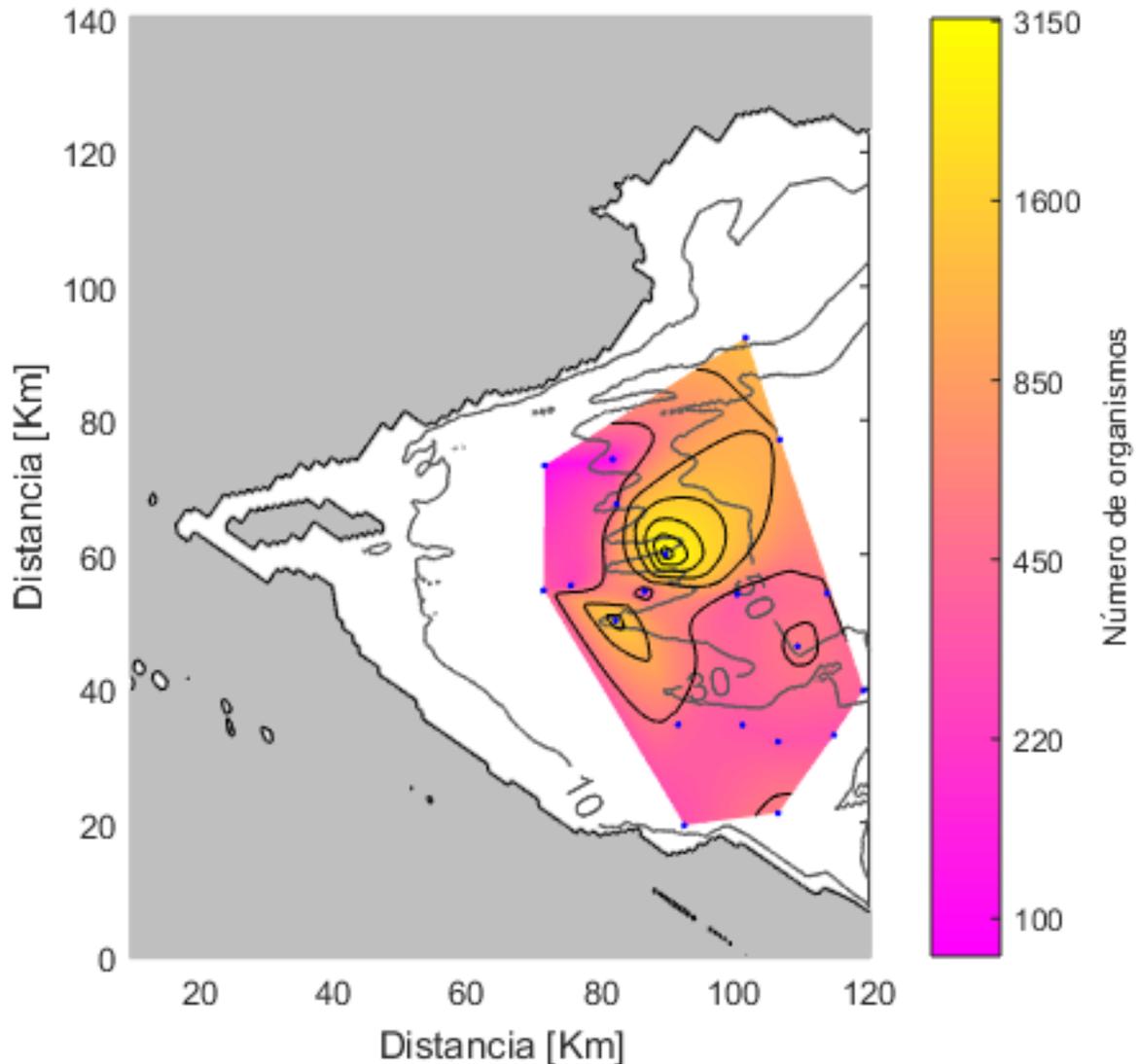


Figura 18. Distribución espacial de la abundancia de organismos macrobentónicos en el AGC. Las líneas grises muestran las isobatas de 10, 30 y 50 m y las líneas negras son los contornos de número de organismos por punto. Los puntos azules representan los puntos de muestreo.

3.4. Validación y resultados del modelo numérico hidrodinámico

3.4.1. Mapas de amplitud y fase

Con la finalidad de verificar que el modelo numérico hidrodinámico reprodujera adecuadamente la distribución de amplitud y fase de las principales componentes armónicas de la marea, se prescribió un forzamiento armónico del nivel del mar en el extremo sur del GdC (figura 8A). En el primer experimento se prescribió el período de la componente M2 de la marea y en el segundo se prescribió el período de la componente K1. Los resultados de ambos experimentos, expresados en mapas de amplitud y fase,

adecuadamente los mapas correspondientes de Morales Pérez y Gutiérrez de Velasco (1989), elaborados a partir de observaciones de marea en 33 localidades del GdC.

En las figuras 19 y 20 se muestran los mapas de amplitud y fase de la componente M2 resultantes del modelo para su comparación con los mapas de Morales Pérez y Gutiérrez de Velasco (1989), y en las figuras 21 y 22 se muestran los mapas correspondientes para la componente K1.

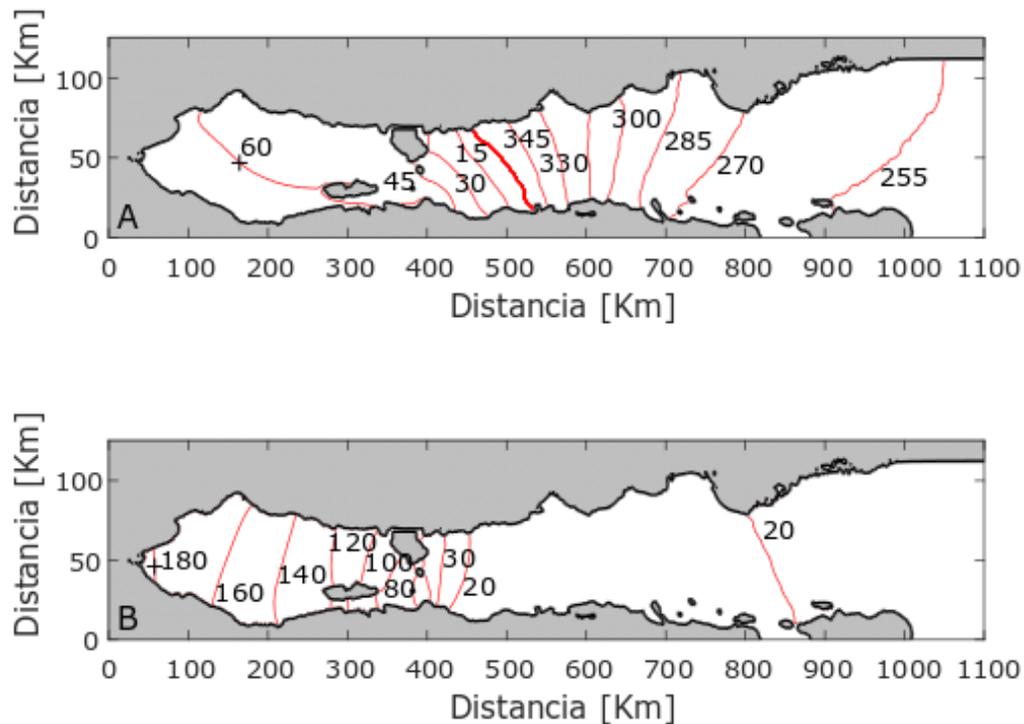


Figura 19. Mapa cotidal de la componente M2 en el Golfo de California, a partir de los resultados del modelo. A) Amplitud en centímetros y B) Fase 105 W.G.

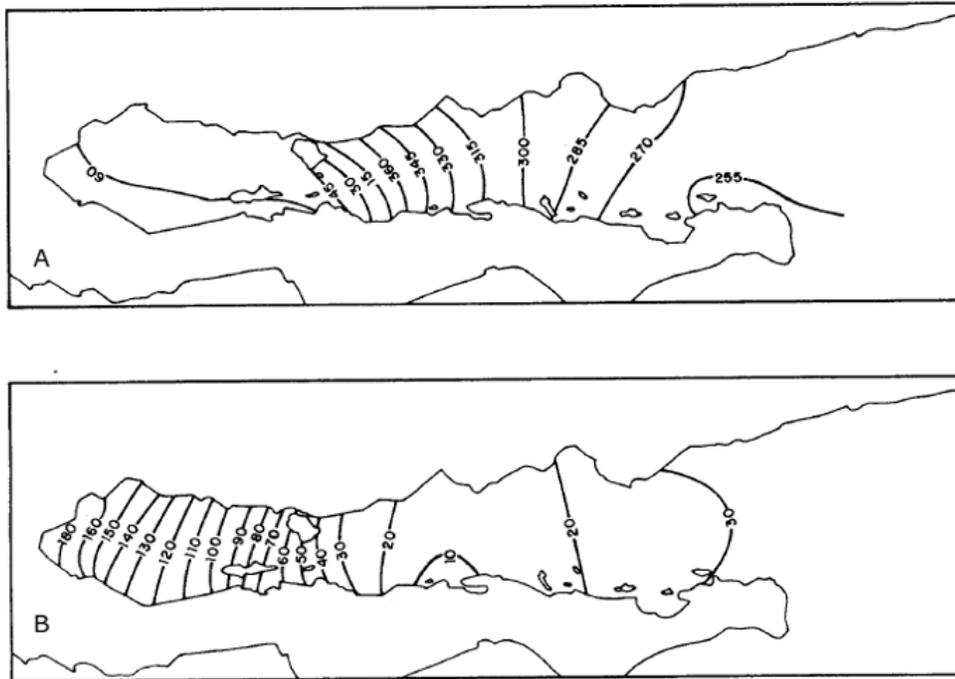


Figura 20. Mapa cotidal de la componente M2 en el Golfo de California. Tomado de Morales Pérez y Gutiérrez de Velasco (1989). A) Amplitud en centímetros y B) Fase 105 W.G.

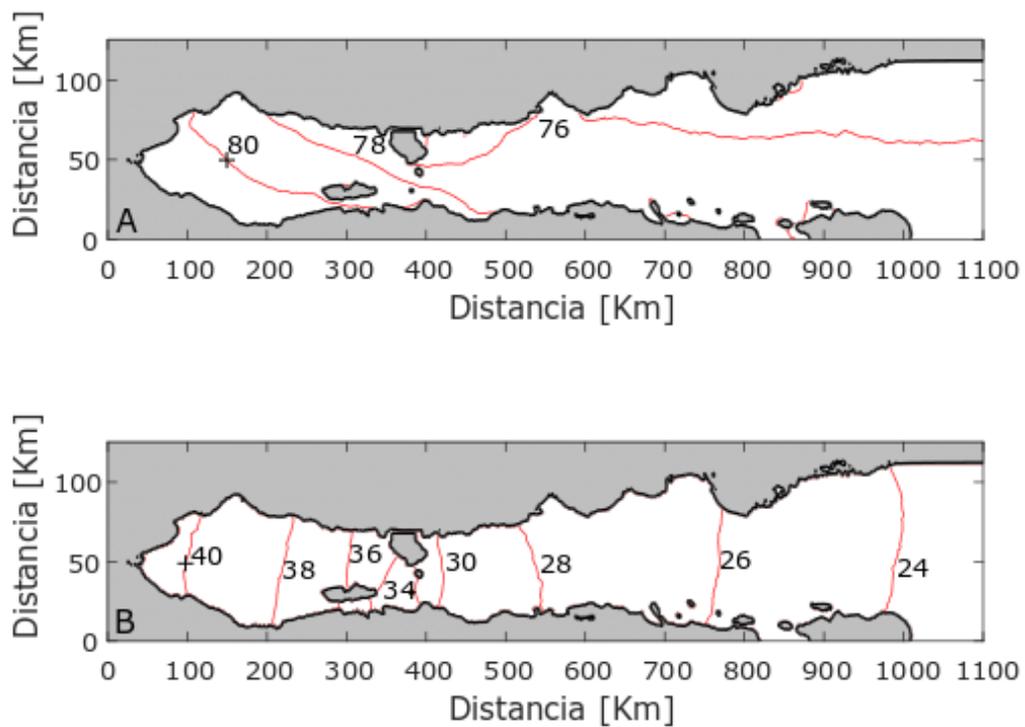


Figura 21. Mapa cotidal de la componente K1 en el Golfo de California, a partir de los resultados del modelo. A) Amplitud en centímetros y B) Fase 105 W.G.

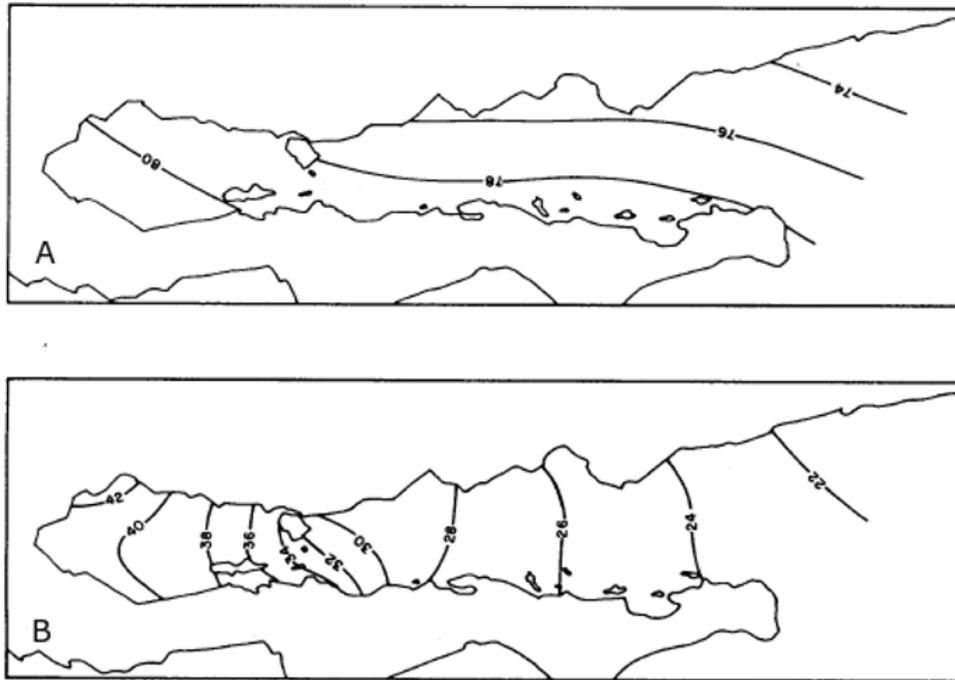


Figura 22. Mapa cotidal de la componente K1 en el Golfo de California. Tomado de Morales Pérez y Gutiérrez de Velasco (1989). A) Amplitud en centímetros y B) Fase 105 W.G.

3.4.2. Nivel del mar

Para reproducir en su totalidad la marea en el AGC se introdujo la predicción de marea de Cabo San Lucas, B. C. S., como forzamiento en la frontera abierta del modelo. En la figura 23 se muestran los resultados del modelo en comparación con la predicción de marea en los puertos de San Felipe y Golfo de Santa Clara, dos estaciones mareográficas de la red de CICESE. En el caso de San Felipe el error cuadrático medio (ECM) es de 0.0589 m y en el Golfo de Santa Clara es de 0.1192 m. Se puede observar que el rango de marea en San Felipe es de aproximadamente de 7 m y en el Golfo de Santa Clara llega hasta un poco menos de 8 m.

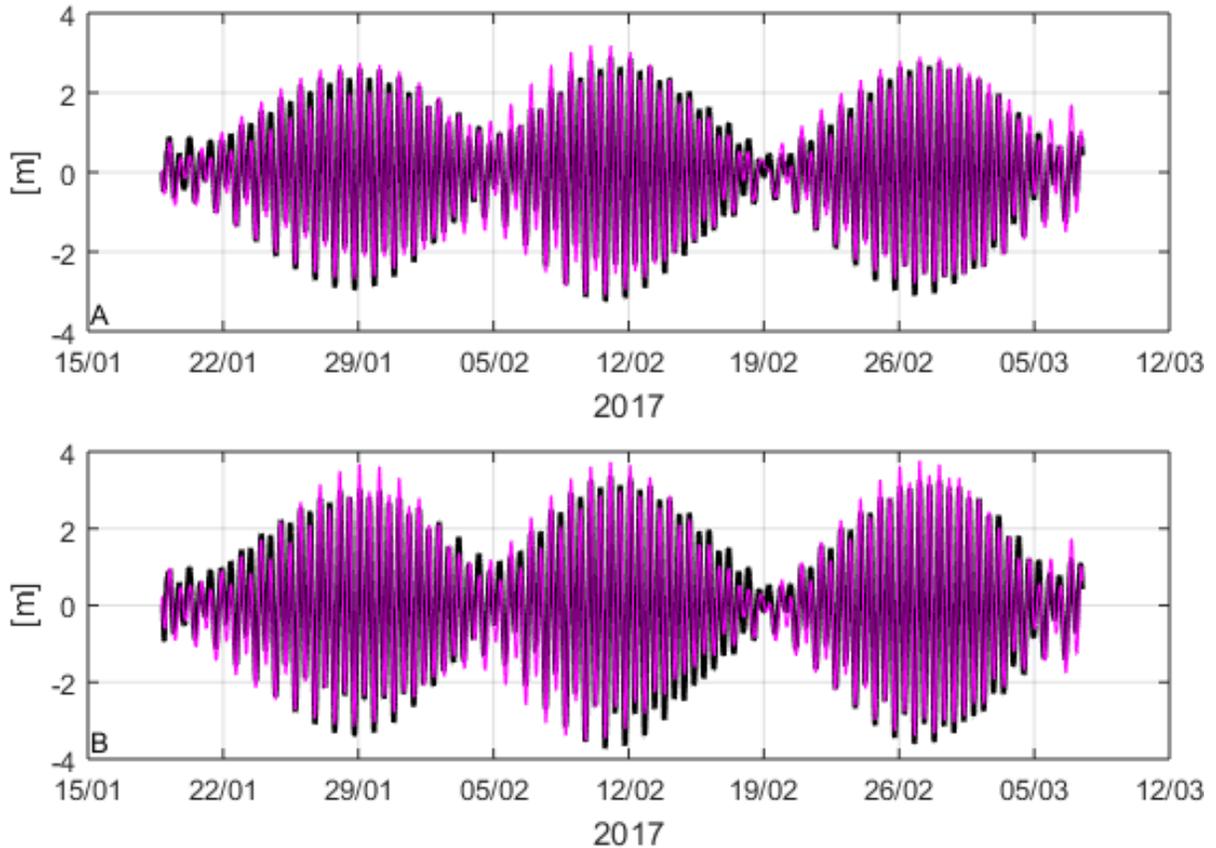


Figura 23. Series de tiempo de predicción de marea (negro) contra resultados del modelo (magenta). A) San Felipe y B) Golfo de Santa Clara.

3.4.3. Corrientes de marea

Durante la campaña oceanográfica en el AGC se obtuvieron mediciones de nivel del mar y de las componentes horizontales de la velocidad de la corriente a 30 cm del fondo. Estas observaciones se emplearon para su comparación con los resultados del modelo en el mismo lugar. En la figura 24 se observa que el modelo reproduce adecuadamente la variación del nivel del mar, con un ECM de 0.05 m, donde el rango de marea es de 8 m. Las componentes norte sur y este oeste de la velocidad se rotaron para que éstas coincidieran el sistema de referencia de las velocidades resultantes del modelo. La componente u representa la dirección de la corriente a lo largo del eje central del GdC en sentido positivo hacia la boca, mientras que la componente transversal v es positiva hacia la costa de Sonora. En la figura 24 B-C, observamos cómo la componente a lo largo del GdC es mucho mayor que la componente transversal, con máximos de hasta 0.6 ms^{-1} durante la campaña de observaciones. El ECM para

la componente u es de 0.05 ms^{-1} y de 0.003 ms^{-1} para la componente v .

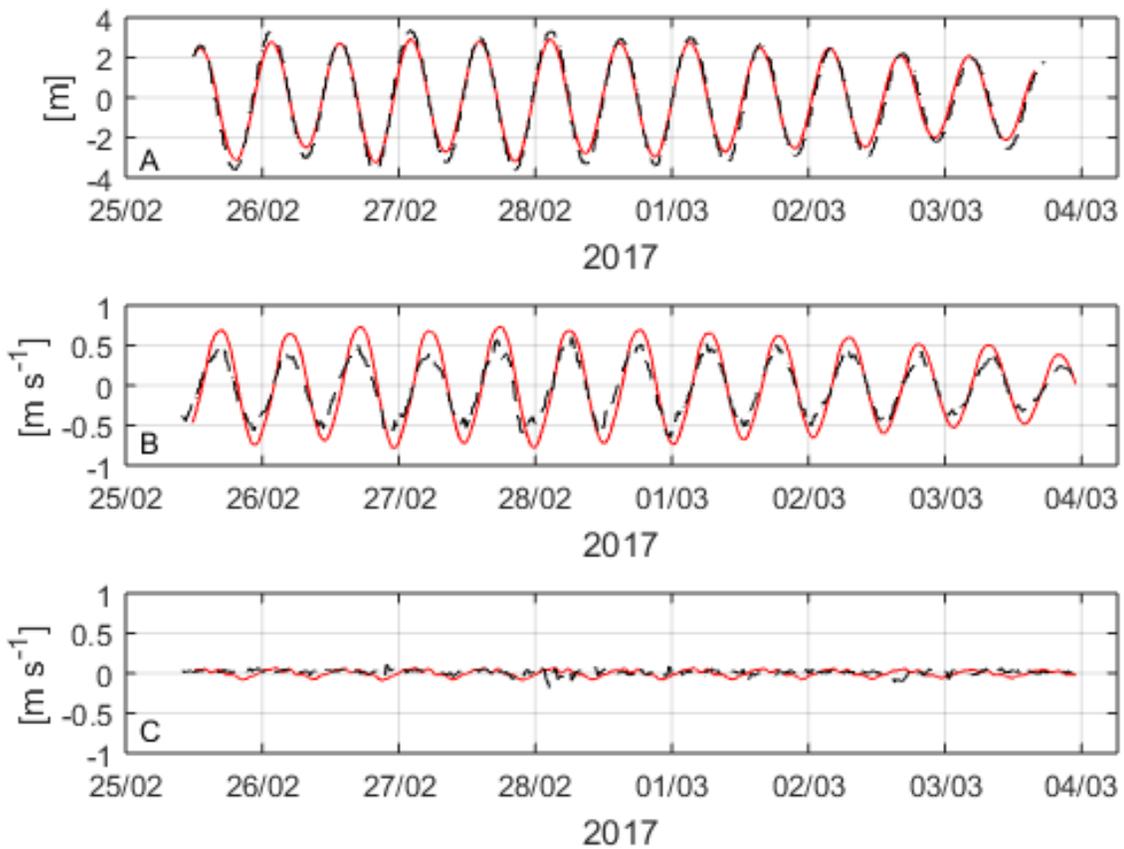


Figura 24. Series de tiempo de datos del anclaje (negro) contra modelo (rojo). A) variación del nivel del mar, B) componente u de la velocidad y C) componente v de la velocidad.

3.5. Corriente residual inducida por marea y líneas de corriente

Una vez validado el modelo numérico se obtuvieron los campos de velocidad y de nivel del mar a pasos de tiempo de 10 minutos en cada uno de los nodos de la malla de alta resolución correspondiente al AGC. Las corrientes residuales de marea se calcularon a su vez como el promedio temporal, durante un ciclo de mareas vivas, a partir de las corrientes resultantes del modelo numérico. En la figura 25 se muestra el mapa vectorial de las corrientes residuales en el AGC. Se observan dos zonas donde las corrientes residuales tienen mayor magnitud: La primera en el delta del Río Colorado y la segunda en el límite sur del área de estudio, ambas con velocidades de hasta 0.2 ms^{-1} ; en el delta del Río Colorado se puede observar que los vectores apuntan en su mayoría hacia el sur, y en la zona sur se aprecian tres giros, dos anticiclónicos y uno

ciclónico.

En general, en la bahía de Adahír, en la costa de Sonora, se observa un flujo hacia el sur entre la costa y la isóbata de 10 m, y se aprecia un flujo hacia el norte que se mantiene entre las isobatas de 10 y 30 m desde la frontera sur del ACG hasta el km 80 a lo largo del eje central del AGC, donde da un giro y avanza hacia Baja California entre las isóbatas de 30 y 50 m, hasta que cerca del eje central del AGC avanza hacia el sur incorporándose a los giros. Al sur de la isla Montague se aprecia una corriente de aproximadamente 0.07 ms^{-1} que sale de ambos lados de la isla avanzando hacia el sur a lo largo de las crestas del relieve del fondo marino hasta incorporarse a los giros del sur. Del lado de Baja California, muy cercana a la costa, se aprecia una corriente que va hacia al sur, mientras que mar adentro, a lo largo de la isóbata de 10 m, se aprecia una corriente hacia el norte.

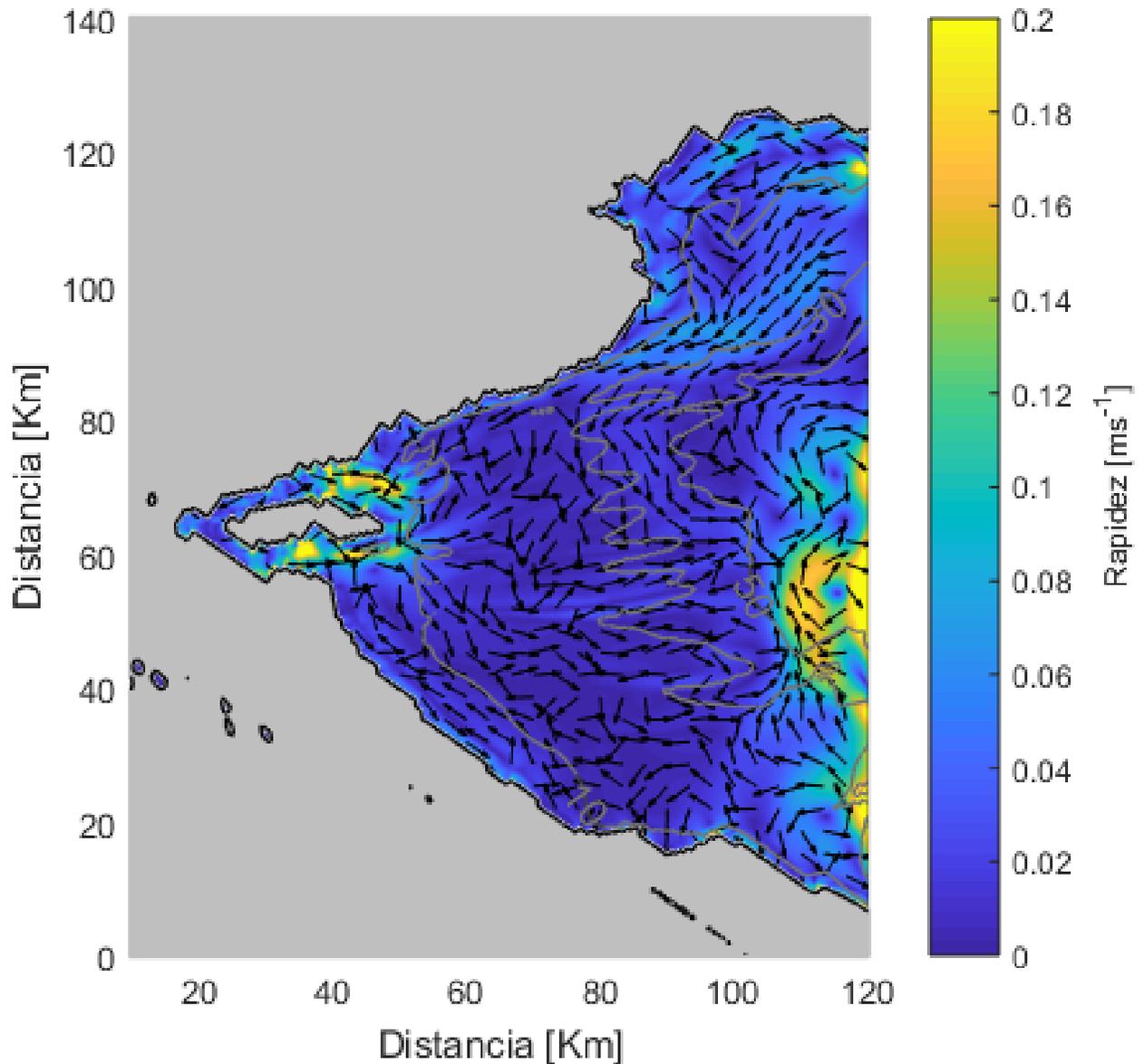


Figura 25. Mapa de corriente residual inducida por marea en el Alto Golfo de California. Las líneas grises muestran las isobatas de 10, 30 y 50 m. Los vectores de dirección están normalizados y la magnitud se encuentra representada por la escala de colores. Se muestran uno de cada 40 vectores.

Con la finalidad de visualizar con mayor facilidad el patrón de corrientes residuales se trazaron líneas de corriente (figura 26) tangentes al campo de velocidad residual, mismas que además indican las trayectorias lagrangeanas o excursión de las partículas de agua, y que además permiten estimar el tiempo de residencia de estas partículas en el AGC. Por ejemplo, en la figura 24 se aprecian zonas de atrapamiento de partículas en la zona del delta del Río Colorado y en la zona cercana a la costa de Baja California. En el centro del AGC se aprecia cómo la corriente que sale del delta llega con facilidad a los giros del sur, y cómo la corriente que entra al AGC por la costa de

Sonora avanza siguiendo las isóbatas de 10, 30 y 50 m, hasta unirse con la corriente que viene del delta para incorporarse a los giros sur, siendo este el único camino de salida del agua en el AGC. En la costa de Baja California observamos cómo la dirección de la corriente es hacia el norte con presencia de giros a la altura de San Felipe y al oeste de la isla Montague.

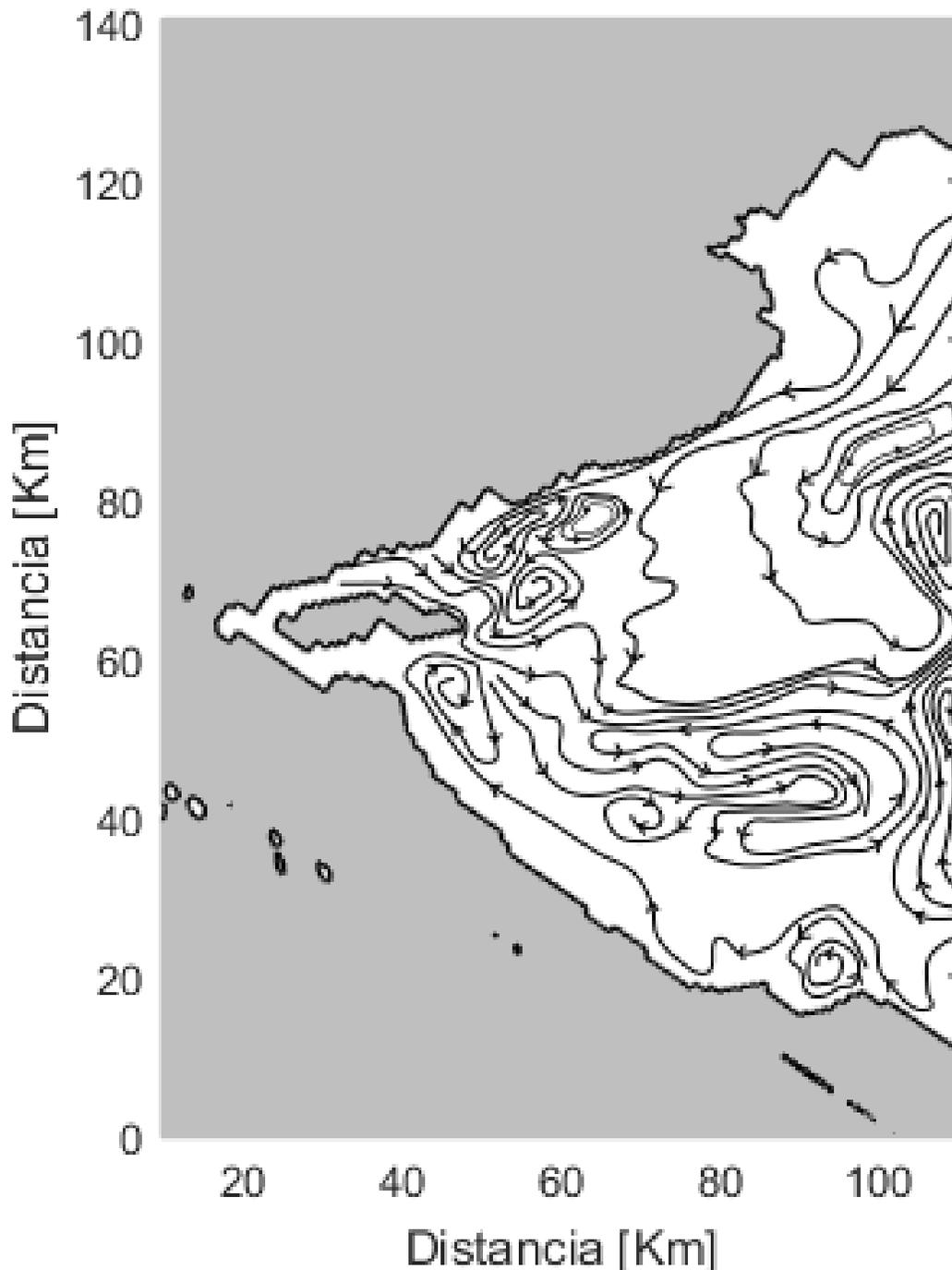


Figura 26. Mapa de líneas de corriente residual inducida por marea. Las flechas indican la dirección de la corriente.

El tiempo de residencia de una partícula de agua en el AGC se contabilizó como el lapso de tiempo necesario para que esta partícula abandonara al AGC a partir de su posición inicial siguiendo las líneas de la corriente residual. Al colocar partículas en cada uno de los nodos de la malla se obtuvo la distribución espacial del tiempo de residencia, misma que se muestra en la figura 27 para tiempos hasta de un año bajo la consideración de que la corriente residual es estacionaria y prácticamente igual en cada ciclo de mareas vivas. Las zonas en blanco muestran los lugares donde el tiempo de residencia es mayor a 365 días, y los colores oscuros denotan zonas con tiempo de residencia muy corto. Las partículas que logran salir del área de estudio logran hacerlo en menos de 4 meses. El tiempo de residencia en la zona de los giros del sur es menor a un mes. Las partículas que entran del lado de la costa de Sonora están divididas en dos grupos. El primero, el más alejado a la costa, tiene tiempos de residencia de 1-2 meses, mientras que el segundo, el más cercano a la costa, tiene tiempos de residencia de 3-5 meses.

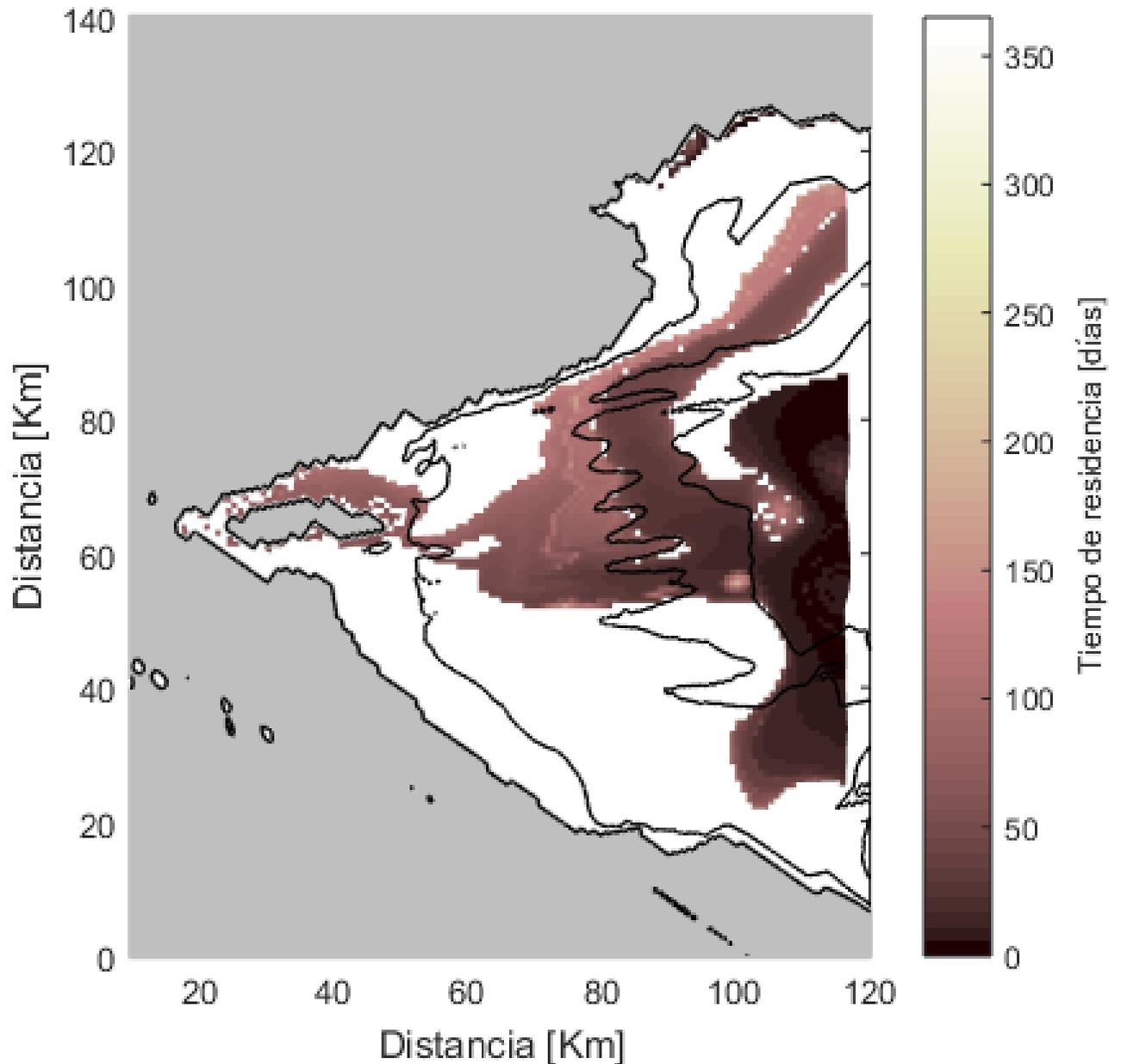


Figura 27. Mapa de tiempo de residencia de partículas en el AGC. La barra de colores indica el tiempo en días. Las zonas en blanco indican zonas de atrapamiento o recirculación de partículas.

3.6. Transporte de Sedimento

La capacidad de transporte de sedimento por tracción de marea se calculó en m^3 por ciclo de marea ($m^3/15das$) para los cuatro tamaños de grano que considera el modelo de Sternberg (1972). En la figura 28 se aprecia que sin importar el tamaño de grano, existen tres zonas donde el transporte de sedimento es de mayor magnitud: en el delta del río Colorado; en la Bahía Adair, y en el límite sur del AGC del lado de la península de Baja California hacia el eje central.

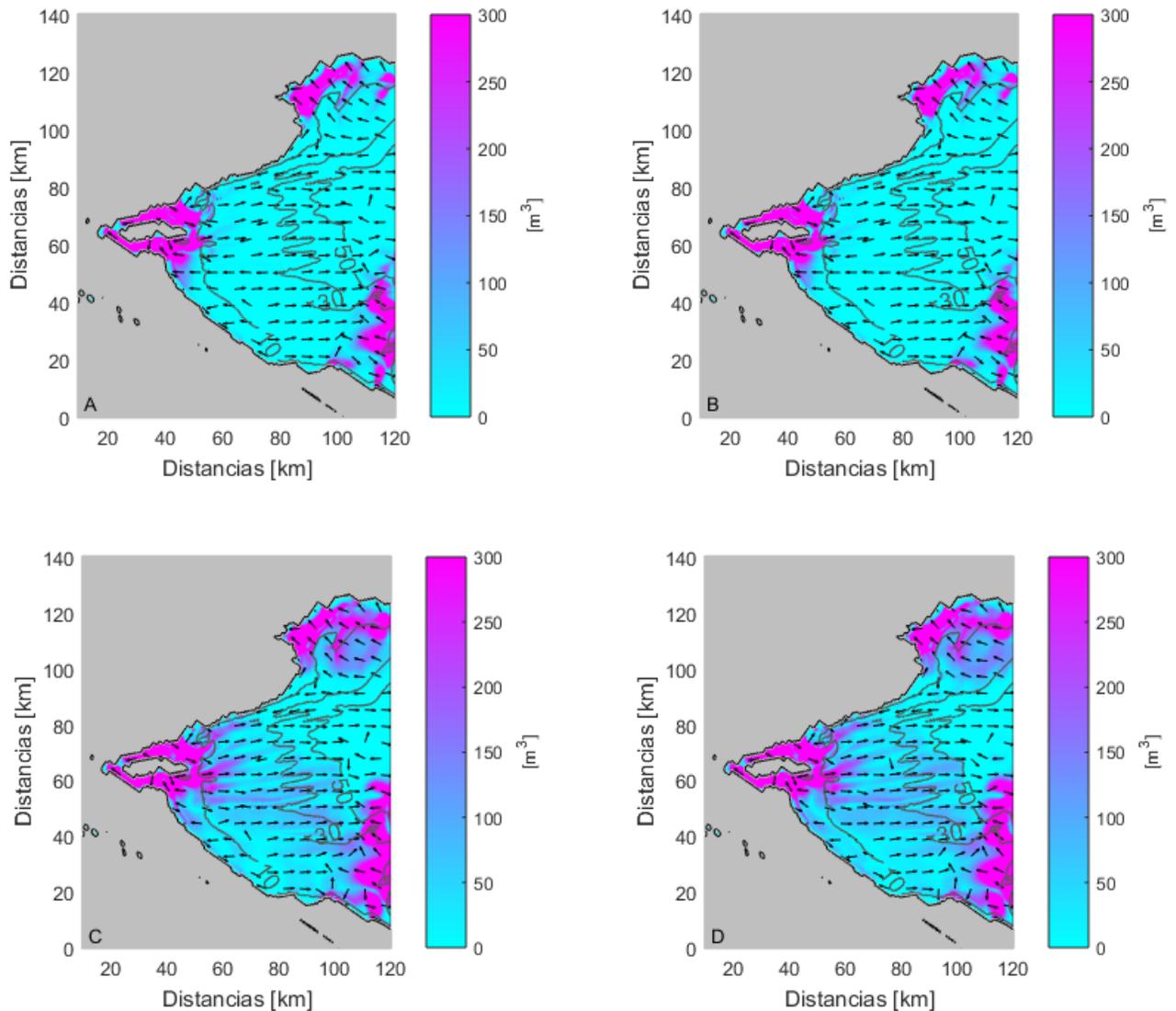


Figura 28. Transporte de sedimento en el Alto Golfo de California en un ciclo de marea (15 días). A) se muestra el transporte de sedimento para partículas con un diámetro de 2.39ϕ , B) 1.83ϕ , C) 1.15ϕ y D) 0.1ϕ . Los vectores de dirección están normalizados y la magnitud se encuentra representada por la escala de colores. Se muestran uno de cada 70 vectores.

Con la finalidad de apreciar con más detalle la capacidad de transporte de sedimento se muestra el mapa ampliado de capacidad transporte de sedimento por tracción de marea para el tamaño de grano 0.1ϕ (figura 29). Por ejemplo, a ambos lados de la isla Montague se observan patrones divergentes de transporte de sedimento, lo cual asegura la permanencia de ambos canales. En Bahía Adaír el transporte es en dirección a la costa y en el suroeste del AGC, hacia la costa de Baja California, el transporte de mayor magnitud es preferentemente hacia el norte, mismo que converge con un transporte hacia el sur de menor magnitud. Esta convergencia podría ser la causa de

acumulación de sedimento que hace que la isóbata de 30 m se haya desplazado hacia el sur. En el resto del AGC, en donde se localizan los canales típicos del relieve del fondo, entre las isóbatas de 10 y 50 m, el transporte es dominante hacia el sur, aunque de menor magnitud.

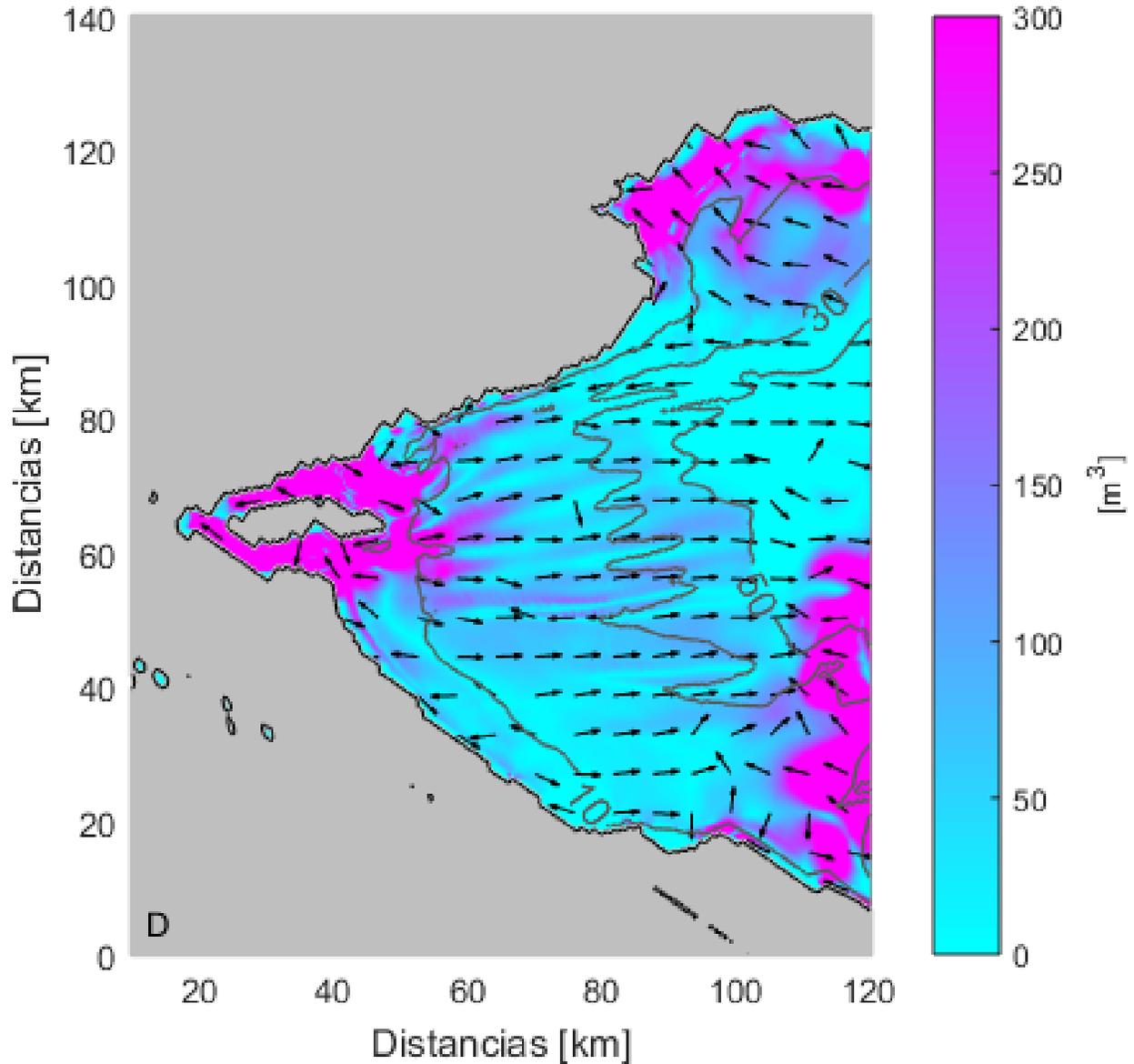


Figura 29. Capacidad de transporte de sedimento por tracción de marea en el Alto Golfo de California en un ciclo de marea (15 días) para el tamaño de grano 0.1ϕ . Los vectores están normalizados y la magnitud se encuentra representada por la escala de colores. Se muestran uno de cada 70 vectores.

Capítulo 4. Discusión y conclusiones

Los resultados de este trabajo se ilustran de manera abreviada en la figura 31, con la finalidad de facilitar la visualización de éstos durante las discusiones.

Un distintivo importante del AGC es el rango de marea (de 8 a 10 m) que induce corrientes de hasta 0.6 m/s con excursiones de partículas de agua de hasta 15 km en un día mareal durante las mareas vivas (figura 30), lo que prácticamente convierte al AGC en una “máquina de lavar o lavadero”, donde la mezcla turbulenta es suficiente para homogenizar las propiedades del agua tanto en su extensión horizontal como en la vertical. Es de esperar que la alta tasa de evaporación produzca aguas más densas que consecuentemente pudieran inducir corrientes de gravedad, sin embargo, es también de esperar que, debido a la mezcla por marea, la circulación dominante es la circulación residual inducida por las corrientes de marea. Bajo esta hipótesis, el patrón de circulación residual y los tiempos de residencia ilustrados en la figura 31C-D, respectivamente, podrían explicar la presencia de agua con mayor salinidad cerca de la costa de Baja California debido a la recirculación que mantiene cautiva al agua del lado de Baja California. En contraste, el agua que entra al AGC por la costa de Sonora tiene menor tiempo de residencia y está “ventilando” continuamente la región comprendida entre las isóbatas de 30 y 50 m, donde a su vez se encuentra la mayor abundancia de organismos bentónicos posiblemente por una mayor concentración de oxígeno disuelto, sin embargo, esta hipótesis no se puede demostrar por el momento debido a que no se cuenta con el análisis de oxígeno de las muestras de agua obtenidas durante la campaña oceanográfica.

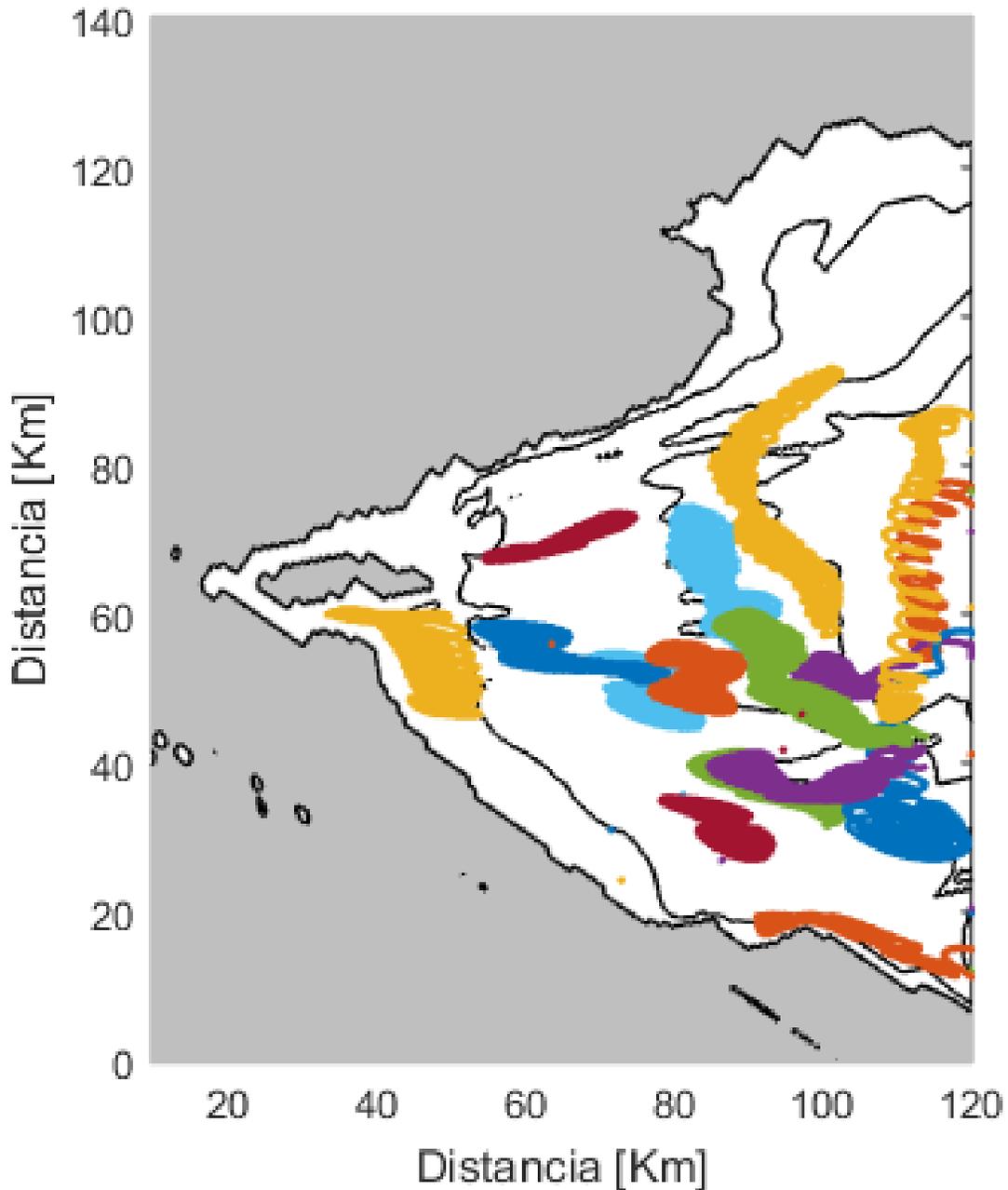


Figura 30. Trayectoria de partículas pasivas inducidas por velocidades instantáneas en 15 días.

La capacidad de transporte de sedimento por tracción de marea indica que en general el flujo de sedimento entre las isóbatas de 10 y 50 m es hacia el sur en la región en donde se encuentran localizados los valles y crestas típicos del relieve del fondo del AGC, como si la tracción de la marea fuese “extendiendo” la masa de sedimento hacia el sur, dándole la forma característica de los “dedos” como los que se aprecian

en la forma del contorno de la isóbata de 30 m. Esta capacidad de transporte de sedimento, sin las grandes cantidades de aporte de sedimento del Río Colorado, se ha transformado un proceso de erosión que podría estar retrayendo a la isóbata de 30 m. Cabe mencionar que aun cuando el modelo de transporte de sedimento predice la capacidad de tracción de los granos de sedimento “grueso” ($< 3 \phi$), éstos están inmersos en una masa de sedimento más fino cuya cohesión tiende a impedir que sean transportados individualmente, sin embargo, una vez que la corriente supera el umbral para iniciar el movimiento de los granos de arena, también tiene la capacidad de resuspender al sedimento fino, en particular durante las mareas vivas, para que éste sea transportado en suspensión por las corrientes residuales. Esta hipótesis permite a su vez explicar la abundancia de sedimento más grueso en el área ventilada por la corriente que entra del lado de Sonora, en donde se encuentra la mayor abundancia de organismos bentónicos entre las isóbatas de 30 y 50 m, debido a que el sedimento fino es transportado hacia afuera de esa área por las corrientes residuales. A su vez, la corriente residual que fluye a lo largo del eje central del AGC, proveniente de los canales de la isla Montague, estaría transportando sedimento en suspensión hacia afuera del AGC. Cabe mencionar que aun cuando no hay aporte directo de sedimento del Río Colorado, los canales de marea a los lados de la isla Montague y al norte de ésta, continúan aportando sedimento fino al AGC debido a que durante las pleamares se desprenden grandes bloques de sedimento por la erosión de los cantiles de las planicies de marea que contienen depósitos sedimentarios del Río Colorado (comunicación personal, Modesto Ortiz, 2019).

Los resultados de este trabajo describen de manera preliminar la granulometría y distribución y abundancia de organismos bentónicos en el AGC, sin embargo, es necesario establecer un monitoreo sistemático por al menos algunos años para detectar posibles procesos de erosión del fondo marino y para caracterizar el ambiente bentónico con la finalidad de poder detectar la influencia de la pesca de arrastre y la respuesta al cambio climático que se avecina.

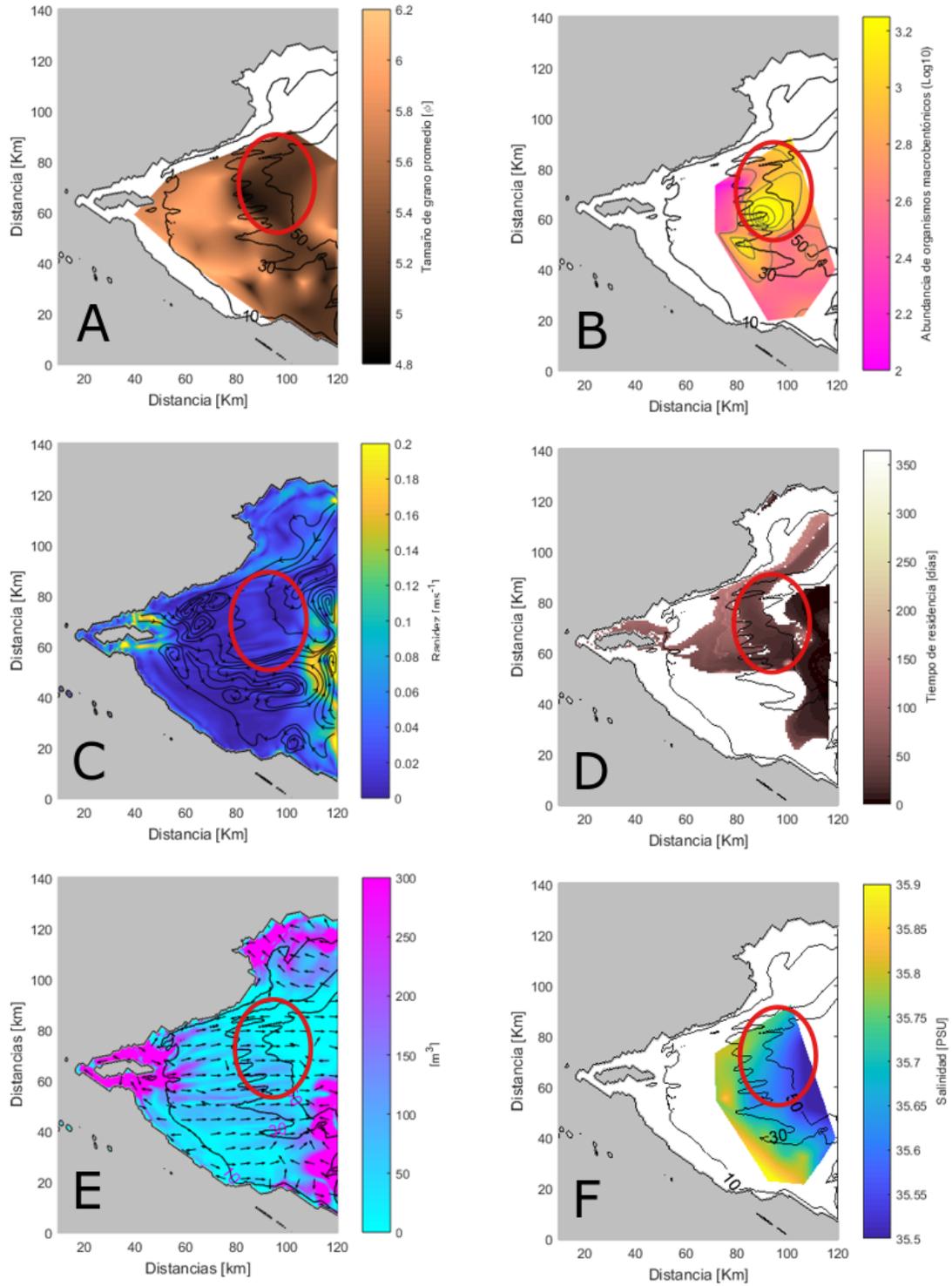


Figura 31. A)Tamaño de grano promedio, B)Abundancia de organismos, C)CRIM, D)Tiempo de residencia, E)Transporte de sedimento y D)Salinidad.

Literatura citada

- Alvarez, L. G., Suárez-Vidal, F., Mendoza-Borunda, R., y González-Escobar, M. (2009). Bathymetry and active geological structures in the Upper Gulf of California. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, **61**(1): 129–141.
- Bagnold, R. (1963). Mechanics of marine sedimentation. *The sea*, **3**: 507–528.
- Bertness, M. D., Gaines, S. D., y Hay, M. E. (2001). *Marine community ecology*. Sinauer Associates Sunderland, MA.
- Blott, S. J. y Pye, K. (2001). Gradistat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth surface processes and Landforms*, **26**(11): 1237–1248.
- Bray, N. (1988). Thermohaline circulation in the gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **93**(C5): 4993–5020.
- Brusca, R. C., Álvarez-Borrego, S., Hastings, P. A., y Findley, L. T. (2017). Colorado River flow and biological productivity in the Northern Gulf of California, Mexico. *Earth-Science Reviews*, **164**(January): 1–30.
- Carriquiry, J. y Sánchez, A. (1999). Sedimentation in the Colorado River delta and Upper Gulf of California after nearly a century of discharge loss. *Marine Geology*, **158**(1-4): 125–145.
- Carriquiry, J. D., Sánchez, A., y Camacho-Ibar, V. F. (2001). Sedimentation in the northern Gulf of California after cessation of the Colorado River discharge. *Sedimentary Geology*, **144**(1-2): 37–62.
- Dauwe, B., Herman, P., y Heip, C. (1998). Community structure and bioturbation potential of macrofauna at four north sea stations with contrasting food supply. *Marine Ecology Progress Series*, **173**: 67–83.
- Erisman, B., Mascareñas-Osorio, I., López-Ságastegui, C., Moreno-Báez, M., Jiménez-Esquivel, V., y Aburto-Oropeza, O. (2015). A comparison of fishing activities between two coastal communities within a biosphere reserve in the upper gulf of California. *Fisheries Research*, **164**: 254–265.
- Fauchald, K. (1977). The polychaete worms. definitions and keys to the orders, families and genera. *Natural History Museum of Los Angeles County, Science Series*.
- Folk, R. L. y Ward, W. C. (1957). Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Research*, **27**(1): 3–26.
- Goto, C., Ogawa, Y., Shuto, N., y Imamura, F. (1997). Iugg/ioc time project: Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme. *Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, manuals and guides*, **35**.
- Guy, H. P., Simons, D. B., y Richardson, E. V. (1966). *Summary of alluvial channel data from flume experiments, 1956-61*, Vol. 462. US Government Printing Office.
- Hernández-Azcúnaga, L., Carbajal, N., y Montaña-Ley, Y. (2014). Bedload Transport of Sediments and Morphodynamics in the Northern Gulf of California. *Journal of Coastal Research*, **294**(2): 228–236.

- Lavín, M., Godínez, V., y Álvarez, L. (1998). Inverse-estuarine features of the upper gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **47**(6): 769–795.
- Marinone, S. G., Ulloa, M. J., Parés-Sierra, A., Lavín, M. F., y Cudney-Bueno, R. (2008). Connectivity in the northern Gulf of California from particle tracking in a three-dimensional numerical model. *Journal of Marine Systems*, **71**(1-2): 149–158.
- Montes, J. M., Lavín, M. F., y Parés-Sierra, A. F. (2015). Seasonal Heat and Salt Balance in the Upper Gulf of California. *Journal of Coastal Research*, **320**(4): 853–862.
- Morales Pérez, R. y Gutiérrez de Velasco, G. (1989). Marea en el golfo de California. *Geofísica internacional*, **28**(1).
- Necoechea Zamora, M. Y., Ocampo Torres, A. I., Rivera Lemus, Erick, R., Godínez Sandoval, V. M., y Modesto, O. F. (2018). Invertebrados bentónicos, abundancia, distribución y frecuencia durante la colecta de la campaña oceanográfica: “vaquita 0716” julio y agosto de 2016. Reporte técnico, CICESE.
- Ortiz, M., Huerta-Tamayo, L., y Hinojosa, A. (2003). Transporte De Sedimento Por Tracción De Marea En El Estero De Punta Banda, Baja California, México. *Geobios*, **23**(2): 283–294.
- Sternberg, R. W. (1972). Predicting initial motion and bedload transport of sediment particles in the shallow marine environment. *Shelf sediment transport: Process and Pattern*.
- van Rijn, L. C., Walstra, D.-J. R., y van Ormondt, M. (2007). Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. IV: Application of Morphodynamic Model. *Journal of Hydraulic Engineering*, **133**(7): 776–793.