

CAPÍTULO 2 - ANTECEDENTES

2.1 Área de estudio

2.1.1 Descripción Geográfica

La región de los Golfos Norpatagónicos se encuentra ubicada en la región nororiental de la provincia del Chubut entre las latitudes de 43° 30' y 41° 30' S y comprende los Golfos Nuevo (GN), San José (GSJ) y San Matías (GSM) (Fig.2-1a). El GSM es el más extenso y con mayor conexión con la plataforma exterior. El GSJ es el más pequeño y poco profundo (~40m) y se halla conectado al GSM por una boca muy estrecha (~6.8 km) y profunda. El GN tiene una forma semicircular y también se conecta a la plataforma exterior por una boca relativamente estrecha (~16 km). Las profundidades máximas del GSM y GN, del orden de los 180m, exceden a las de la plataforma continental adyacente (Fig. 2-1b)

2.1.2. Características físicas

2.1.2.1. Masas de agua.

Las masas de agua que se observan sobre la plataforma continental argentina deben analizarse en función de las características de las aguas que ingresan desde áreas adyacentes, de las modificaciones debidas al intercambio de propiedades y energía con la atmósfera, y la descarga continental. En el sector Norte del Golfo San Matías y en la zona de El Rincón (fuera del litoral costero) existen máximos relativos de salinidad y temperatura. Scasso y Piola (1988) analizaron las condiciones de las masas de agua del Golfo San Matías y el forzante atmosférico para el área y concluyeron que la presencia del máximo relativo de salinidad se debe al exceso local de la evaporación. Este exceso de evaporación sobre la precipitación en el interior del Golfo (100 cm/año) duplica los valores calculados para la plataforma adyacente debido a la mayor temperatura del agua superficial del Golfo. La anomalía térmica del Golfo sería consecuencia del mayor tiempo de residencia del agua en su interior. La alta salinidad en la zona de El Rincón podría deberse a la existencia de un mayor exceso de evaporación local sumado al efecto de una

circulación más restringida en el área y/o por la descarga sobre la plataforma de aguas con mayor contenido salino formadas en el Golfo San Matías. Una fuente secundaria de alta salinidad se encuentra también en el Golfo Nuevo donde se observan salinidades mayores a 34. La plataforma exterior se halla ocupada por aguas subantárticas que penetran por del extremo Norte del Pasaje de Drake y la Corriente de Malvinas y son modificadas por dilución con aguas de menor salinidad que penetran por el Estrecho de Magallanes y el Estrecho de Le Maire (Guerrero y Piola, 1997, Bianchi et al, 2005).

2.1.2.2. Mareas.

La Plataforma Patagónica (PP) es una región de importante actividad mareal y constituye uno de los regímenes de marea más energéticos del mundo (Glorioso y Flather, 1997). La onda de marea presenta una variabilidad espacial considerable, tanto en fase como en amplitud. Esta última decrece exponencialmente de Sur a Norte y de Este a Oeste, y su rango de valores está entre 4.5 m en Río Coig (51°S) a menos de 0.25 m en la costa Sur de Uruguay (Panella et al, 1991). Las dimensiones de la PP son muy favorables para la resonancia de la marea semidiurna pues su ancho es comparable a un cuarto de su longitud de onda (Piola y Rivas, 1997).

Glorioso y Flather (1995, 1997) utilizaron resultados de un modelo barotrópico para concluir que en su parte interna la región patagónica es ampliamente dominada por componentes armónicos semidiurnos mientras que la variabilidad del nivel del mar en el océano abierto tiene contribuciones igualmente significativas tanto de componentes diurnas como de semidiurnas. Palma *et. al* (2004) indican una dominancia de las componentes semidiurnas en la porción Sur de la plataforma, particularmente sobre regiones menos profundas. Las corrientes de marea asociadas con las componentes diurnas son más débiles a excepción de regiones de plataforma externa y el talud. Los mismos autores señalan que el balance de energía indica un total de disipación (110 GW ($1\text{ GW} = 10^9\text{ Watts}$) al Sur de 40°S . Simionato *et al.* (2004), determinan que la componente M_2 es la más importante para la región de la Plataforma Argentina en coincidencia con los autores mencionados y que la componente M_4 puede ser importante alcanzando valores de

0.1 m en la mayoría de golfos y Bahías en la costa Patagónica. El cálculo de la disipación de energía en el dominio de estudio es algo mayor, alcanzando 228 GW.

2.1.2.3. Flujos en la superficie del océano.

La región de estudio está básicamente dominada por dos centros anticiclónicos subtropicales de alta presión, uno en el Pacífico y otro en el Atlántico, cuya ubicación media se encuentra en las proximidades del paralelo 30°S. La ubicación e intensidad de los centros fluctúa en el transcurso el año, moviéndose más al Norte e intensificándose durante el invierno (Piccolo, 1998). En ciertas ocasiones, durante ese mismo período, el centro anticiclónico del Atlántico Sur se reactiva por la llegada de anticiclones fríos migratorios que se originan en la región subantártica y se estacionan al Sur de Brasil y Uruguay. La característica más sobresaliente en la climatología de la Plataforma patagónica es la presencia de intensos vientos del Oeste durante todo el año con magnitudes medias que rondan los 0.15 Pa. En promedio, la tensión superficial del viento se reduce hacia al Norte de 41°S (~0.05 Pa) y la dirección presenta variaciones estacionales significativas, asociadas al desplazamiento mencionado del anticiclón del Atlántico Sur (Höflich, 1984). En la actualidad existen diversas fuentes que representan la climatología de vientos sobre área de estudio. Sin embargo se observan sustanciales diferencias en el campo de tensiones resultante de cada base de datos y no es posible aún definir cuál de estas climatologías representa mejor las condiciones anuales y medias de la región. Las características generales de estas climatologías serán discutidas con detalle en el Capítulo 5.

Según Rivas y Frank Langer (1996), el campo de temperatura de la Plataforma Continental Argentina es fuertemente influenciada por el flujo de calor atmosférico, ya que la variabilidad anual es mayor que el de otras escalas temporales y el comportamiento dentro de la Plataforma puede ser aproximado como un valor medio más una señal cosenoidal de frecuencia anual. Rivas (1995) estima una media anual de 38 (+/-) 5 W/m², con máximos a mediados de Diciembre de 189 W/m² y mínimos a mediados de Junio de 113 W/m². Krepper y Bianchi (1982) estiman que en la zona del GSM es donde se manifiestan las mayores temperaturas y amplitudes térmicas del Mar Epicontinental Argentino (desde los 35°S hasta los 55°S).

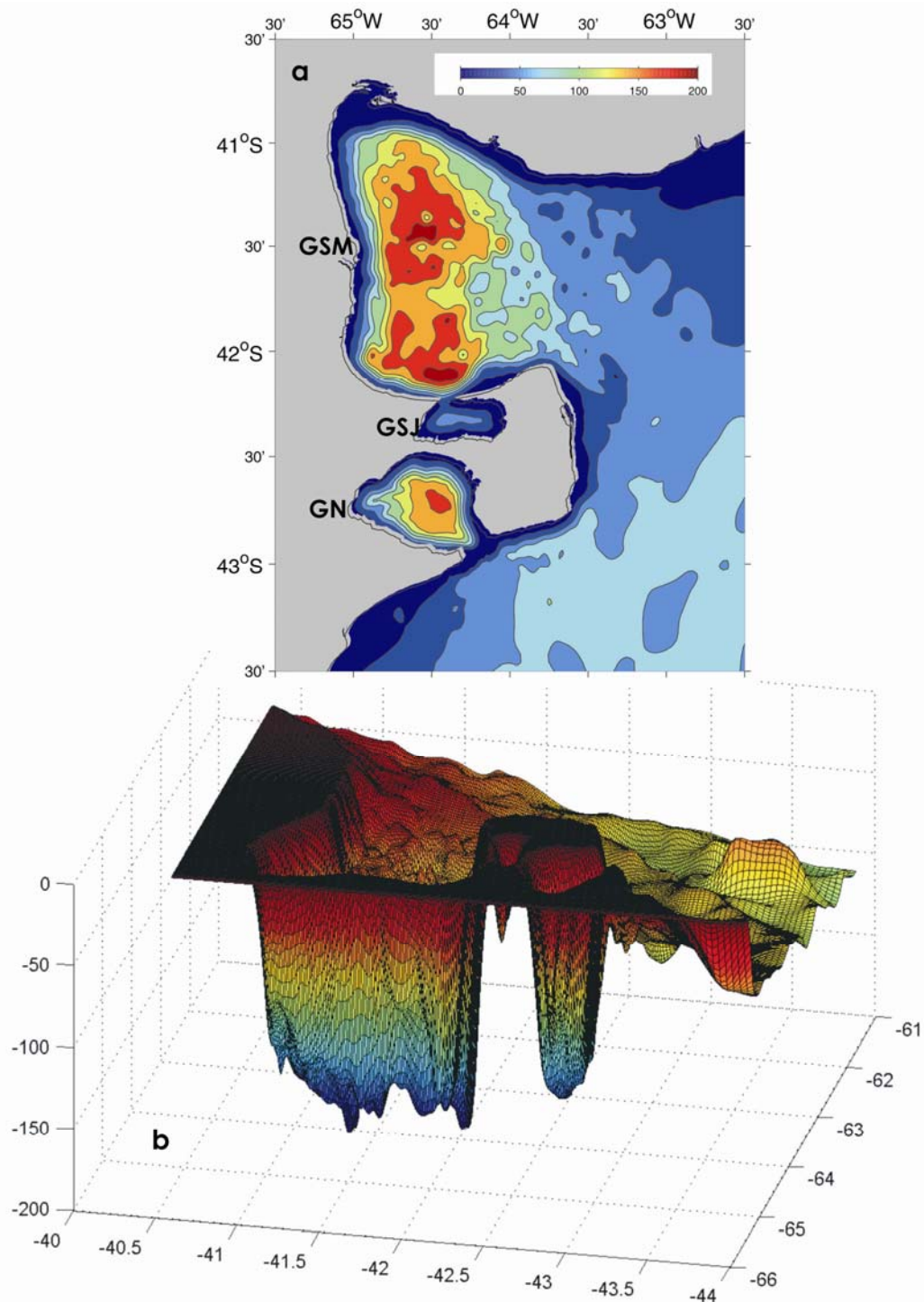


Fig.2-1. Características geográficas y batimetría de los golfos Norpatagónicos. a) vista en planta. b) vista tridimensional de la batimetría de la región.

2.1.3. Aspectos de la biodiversidad de la región

El Área Natural Protegida Península Valdés es el reservorio de flora y fauna costera más importante de la Patagonia declarada Patrimonio Natural Mundial por la

UNESCO en 1999, y a través del turismo impulsa la revalorización y conservación de los recursos naturales. En los golfos GN y GSJ pertenecientes a las costas de Península Valdés la Ballena Franca Austral acude cada año para cumplir su ciclo reproductivo entre los meses de mayo y diciembre. También existen en abundancia colonias de lobos marinos, conviviendo con una rica avifauna, mientras que la tierra está poblada por ñandúes (avestruz americano), maras (liebre patagónica) y guanacos. La reserva Isla de los Pájaros protege miles de aves marinas (cormoranes, gaviota cocinera, garza bruja y garza blanca). Por otro lado, Punta Pirámide posee un gran apostadero de lobos marinos, mientras que Punta Delgada es refugio de lobos y elefantes marinos. En el área de Caleta Valdés, una estrecha lengua de tierra que separa el mar abierto de una laguna marina, se congregan pingüinos magallánicos, lobos y elefantes marinos, además de guanacos, maras y ñandúes llegados con la marea baja a sus islas interiores. En Punta Norte se ubica el mayor apostadero continental del mundo de elefantes marinos del Sur.

La explotación de los recursos pesqueros (tanto comercial como artesanal) es una de las actividades más importantes en la región y ha captado la atención y el apoyo económico de organizaciones internacionales vinculadas a la conservación y al cuidado del medio ambiente, como por ejemplo, el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF), el Consejo de Administración Marina (MSC, por sus siglas en inglés) y el Fondo Pesquero Responsable (SFF-RLF). En el año 2003, el Instituto de Biología Marina y Pesquera Almirante Storni, la Dirección de Pesca de Río Negro y la Fundación Vida Silvestre Argentina (FVSA), comenzaron a trabajar en el desarrollo de planes de manejo sustentable y procesos de certificación de la pesquería de merluza y la pesquería multi-específica de invertebrados (viera, mejillón, almeja y pulpo). El conocimiento de la circulación en áreas costeras es uno de los aspectos más importantes, principalmente para comprender la dinámica de reclutamiento y conectividad en metapoblaciones marinas (Kritzer and Sale, 2006). Los ciclos de vida de muchas especies de peces y mariscos que habitan en ambientes costeros están fuertemente ligados a los procesos hidrodinámicos, principalmente durante los estadios de reproducción-dispersión (Sinclair, 1988).

Desde el punto de vista de la biodiversidad, la región presenta una rica composición de especies, ya que en estas latitudes del Mar Argentino se verifica la existencia de la zona de transición entre dos Provincias Biogeográficas: la Argentina y la

Magallánica (Menni, 1983; Scarabino, 1977). Por ello, en aguas del GSM es frecuente encontrar la presencia de especies comunes a estos dos grandes complejos faunísticos. Esta riqueza de organismos determina también una variada composición de especies en las capturas, promoviendo la existencia de un complejo pesquero de carácter multiespecífico. La principal especie explotada en el GSM es la merluza *Merluccius hubbsi* que constituye en promedio aproximadamente el 80% de las capturas anuales desembarcadas en el puerto de San Antonio Oeste (González *et al.*, 2004). Durante la historia de la pesquería se han instrumentado una serie de medidas de manejo destinadas a optimizar el aprovechamiento del recurso (González, 2003; González *et al.*, 2004), para los cuales es fundamental el conocimiento de la hidrodinámica del ecosistema. En relación a la explotación pesquera, trabajos científicos muestran una alta correlación entre la distribución espacial de pesca de la merluza dentro del GSM y las áreas frontales previamente detectadas (Ocampo-Reinaldo *et al.* 2008). Recientemente Amoroso *et al.*, 2010, estudiaron la relación existente entre el GSJ y el GSM, con el fin de determinar la conectividad y variación espacial de propiedades dentro del GSJ. El recurso pesquero más importante en el GSJ es la metapoblación de la vieyra Tehuelche (*Aequipecten tehuelchus*; Ciocco *et al.*, 2006; Orensanz *et al.*, 2006). A pesar de su pequeña extensión, el GSJ fue el principal productor de mariscos por más de tres décadas (Amoroso *et al.*, 2010).

2.2 Estudios previos.

2.2.1 Observacionales

Los datos observacionales sobre la circulación pueden ser obtenidos mediante medición directa, inferidos de propiedades físico-químicas o a través de análisis de imágenes satelitales.

2.2.1.1 Corrientes.

Las mediciones directas en el área de estudio son escasas y con una frecuencia de medición que es insuficiente para análisis a escala de circulación regional. Lanfredi y Capurro, en Noviembre y Diciembre de 1966 realizaron mediciones de 1 a 2 días de duración en tres puntos ubicados entre 38°-39°S y 56°-57°W e indican que la

circulación en la plataforma continental se manifiesta con direcciones e intensidades variables de acuerdo con el ciclo de mareas, con un promedio que varía entre 0.1 y 0.16 m/s hacia el NE (Piola y Rivas, 1997). Los registros indican poca variación de intensidad y dirección de la corriente con la profundidad. Según los mismos autores, las observaciones directas de corrientes efectuadas, por tratarse de registros costeros y/o de muy corta duración, no permiten extraer conclusiones sobre la circulación media.

Rivas (1997) analizó mediciones de corrientes en la Plataforma Continental Argentina en 3 estaciones cercanas a Península Valdés en el período de mediados de Septiembre del 1991 a principios de Agosto de 1992 (Fig. 2-2). Sus conclusiones indican que el flujo medio es paralelo a las líneas isobatas, con dirección N-NE en las estaciones mas alejadas de la costa y NE-E en la cercana a la boca del GN, incrementándose en intensidad hacia el talud y con variaciones en profundidad en zonas donde la estratificación es importante. El autor determina que debido a que el esfuerzo de viento medio es débil, este contribuye poco a la circulación media observada y los principales factores son el campo de densidades y corrientes residuales de marea cercanas a la costa. Las mayores variaciones de energía las observa en períodos mayores a 10 días, los cuales no pueden asignarse a forzantes climatológicos y por lo tanto pueden estar relacionados a la interacción de procesos de mesoescala y la Corriente de Malvinas. El autor determina además que más del 80% de la fluctuación de energía cinética es debida las componentes semidiurnas de marea, acentuándose hacia la costa, mientras que hacia el talud se acentúa la importancia de las componentes diurnas.

Framiñan *et al.* (1991) realizaron una campaña oceanográfica en el GSM en Diciembre de 1987, con el fin de fondear un arreglo de correntómetros y termógrafos en el sector noroeste del golfo en $41^{\circ} 02.9' S$ y $64^{\circ} 50.6' W$ donde la profundidad alcanza 125m (Fig. 2-2). El instrumental permaneció instalado hasta Junio de 1988 y se realizaron mediciones de corrientes horizontales a 25, 65 y 105 m de profundidad. Las observaciones indican velocidades medias de 14 cm/s en la dirección NNO (348°) a 25 m de profundidad, posteriormente a 65 m indica una velocidad menor de 3 cm/s con dirección NO (295°) y por último la estación más profunda a 105 m, indica una velocidad de corriente de 1,7 cm/s con dirección NO (315°).

Moreira *et al.* (2008) analizaron series de tiempo en 3 estaciones dentro del GSM recolectadas en el período de 5 meses durante el año 2006. En Las Grutas desde el 4 de Julio al 11 de Noviembre del año 2005, posteriormente en el año 2006 una dentro del GSJ en Playa Bengoa entre el 20 de Mayo al 24 de Junio (35 días), otra en Punta Colorada desde el 4 de Julio al 30 de Agosto (58 días) y finalmente San Antonio Este (SAE) desde 16 de Noviembre al 10 de Diciembre (25 días) (Fig. 2-2). Las conclusiones indican que la serie de datos en Playa Bengoa muestra corrientes con una alta variabilidad temporal en su dirección, con débiles magnitudes (máximas de 26,4 cm/s en las velocidades zonales “u” y 15,6 cm/s en las velocidades meridionales “v”), mientras que las series de mayor intensidad en las corrientes de Punta Colorada (máximas de 37,5 cm/s en “u” y 54,2 cm/s en “v”) y Las Grutas (máximas 57,5 cm/s en “u” y 54,8 cm/s en “v”) muestran corrientes en una orientación de N-NO a S-SE y la serie de SAE en dirección NE a SO con máximos de 23,8 cm/s en “u” y 44,3 cm/s en “v”. Los autores calcularon las elipses de marea para la componente M_2 obteniendo valores de amplitud de 18,8 cm/s en Punta Colorada, de 28,2 cm/s en Las Grutas y de 60,4 cm/s en SAE. Los mismos autores señalan que las corrientes de marea representan más de un 70% de la varianza en cada estación y están dominadas por las componentes semidiurnas mientras que la componente M_4 representa un 5% de la M_2 en las estaciones analizadas.

2.2.1.2. Circulación general.

A excepción de los trabajos de Piola y Scasso (1988) y Rivas y Beier (1990) que infieren la circulación del GN y GSM mediante el análisis de mediciones de temperatura y salinidad, prácticamente todo el conocimiento actual sobre la circulación en los Golfos Patagónicos surge de modelos numéricos, siendo muy limitada la contribución efectuada por las mediciones directas de corrientes.

En el GSM Piola y Scasso (1988) lograron obtener una primera aproximación de la circulación media a principios de abril de 1977, suponiendo equilibrio geostrófico y que la termoclina estaría bien definida por la topografía de la isoterma de 14°C. En las inmediaciones de 41° 50`S durante gran parte del año se observa un frente termohalino orientado en dirección aproximada E-O. Al Norte de 41° 40`S observan una circulación cerrada de sentido ciclónico (horario) con un radio del orden de 35

km (Fig. 2-2). Esta región está asociada a la zona de mayor temperatura y salinidad observada al Norte de la estructura frontal (Fig. 2-2). En el sudeste aparece un segundo giro ciclónico aparentemente separado del descrito anteriormente por una región en la que la termoclina alcanza profundidades máximas (~80 m). Este giro está asociado a las aguas relativamente frías que ocupan la región al Sur del frente. Los autores indican que la falta de observaciones impide determinar la profundidad de la isoterma de 14° en el Sudoeste del GSM (Fig. 2-2).

En los golfos GN, GSM, y GSJ, especialmente en este último, la geometría de la boca restringe el intercambio con el mar abierto y la influencia del forzante atmosférico es mayor (Rivas y Beier, 1990). Por otro lado, estos autores indican que debido a que la media anual de los flujos superficiales de sal y calor son distintos de cero es necesario un intercambio horizontal de calor y sal para balancear el forzante atmosférico, dependiendo la salinidad y temperatura tanto de los flujos atmosféricos como de los procesos de advección horizontal a través de las bocas.

Mientras el flujo superficial de calor cambia el sentido a lo largo del año, produciendo incremento o descenso de la temperatura en diferentes épocas, el flujo de agua dulce es siempre hacia la atmósfera dado que la evaporación supera a la precipitación (Scasso y Piola, 1988). Estas características del flujo atmosférico y la limitada renovación de sus aguas producen una mayor amplitud térmica anual en los golfos que en el mar abierto (Krepper y Bianchi, 1982; Scasso y Piola, 1988) y máximos relativos de salinidad en el interior (Brandhorst y Castello, 1971; Carreto *et al.*, 1974; Scasso y Piola, 1988).

Estudios de los ciclos anuales del GN y GSJ (Rivas and Ripa, 1986; Rivas, 1990) los cuales incluyen seis y cuatro cruceros respectivamente a través de un año completo, muestran que el forzante atmosférico y los intercambios con el océano abierto están en igualdad de importancia para la evolución anual de los golfos. El GSM presenta algunas particularidades tales como, mayor amplitud anual térmica detectada por Krepper y Bianchi (1982) y un máximo de salinidad también documentado por Scasso y Piola (1988).

La circulación en el GSJ fue estudiada por Rivas (1990), quien atribuye una fuerte incidencia de los intercambio de calor y masa con el aire debido a la relación

geométrica que posee el golfo de área superficial y profundidad media y a la reducida inercia térmica. El autor concluye también que los flujos de intercambio con el GSM varían a lo largo del año, siendo en invierno y otoño ingreso de agua por la superficie mientras que en el resto del año ingresa agua más densa por la boca. También indica que la zona está caracterizada por vientos intensos y grandes amplitudes de marea, por lo tanto la columna de agua permanece mezclada casi todo el año con débil estructura vertical en meses de verano. Recientemente, trabajos con datos inferidos de sensores remotos muestran que el GSJ está dividido meridionalmente en dos dominios (Fig. 2-2) con aguas de diferentes características termohalinas (Amoroso, 2004, Gagliardini *et al.*, 2004, Amoroso *et al.*, 2010).

Lucas *et al.* (2005) analizaron los regímenes costeros oceanográficos de la Plataforma Argentina mediante el análisis de 3690 perfiles de CTD (temperatura, conductividad y profundidad), vientos medios en las estaciones costeras y descarga de ríos. Los autores determinan que la temperatura es función de la profundidad de la columna de agua y la latitud con una gran variación en la vertical. Los mismos autores infieren, utilizando la densidad, a través del parámetro de estabilidad de Simpson (Simpson, 1981) zonas de aguas bien mezcladas y estratificadas. Encuentran que al Sur de 41° S existe una zona divisoria de ambos regimenes en la boca del GSM y en la zona de Península Valdés extendiéndose hacia el Norte siguiendo la isobata de 50 m. A través de la salinidad determinan un máximo de salinidad en el GSM entre 33.7 y 34.2 y un mínimo relativo de 30.3 – 33.3 en la zona del Rincón. Las aguas del GSM egresan del giro interior y son advectadas hacia el N-NE paralelas a las isobatas hasta la costa Este del estuario del Rincón, aquí se mantiene el máximo de salinidad debido al efecto de evaporación neta y tiempo de residencia. Para la zona del GSM y el Rincón indican una evaporación neta durante 10 meses (-36.3 cm) con un máximo en otoño el cual coincide con el máximo de salinidad en la región. Los autores indican que las aguas del GSM se extienden principalmente entre la costa y la isobata de 50 m y posee la mayor variación estacional en relación a su extensión y distribución, influenciando principalmente la zona de El Rincón en la estación de invierno y decayendo en primavera y verano permitiendo la influencia del agua menos densa del Rincón en la costa.

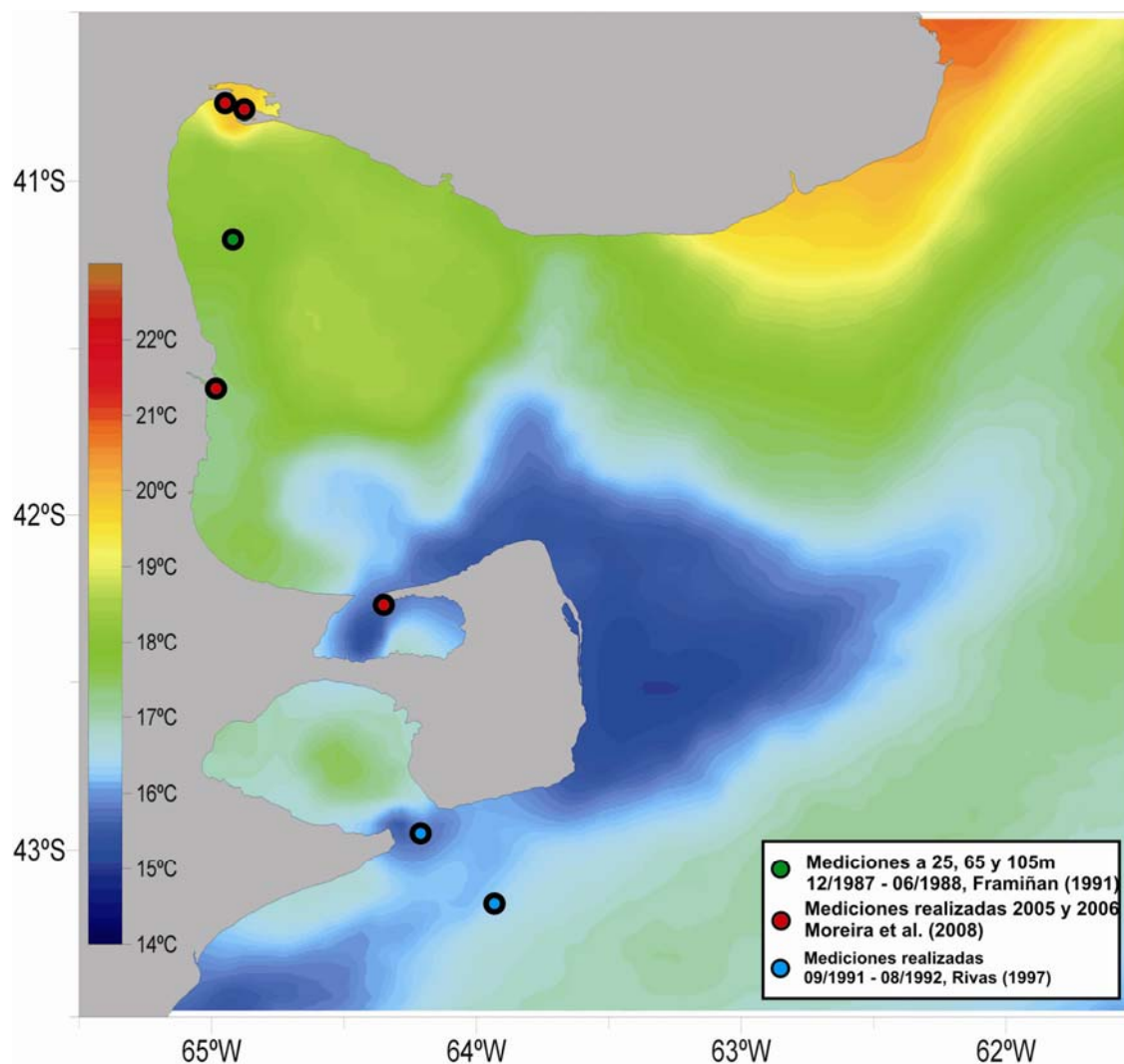


Figura 2-2. Temperatura superficial en Enero (Sensor MODIS/Aqua, Pisoni, 2009 comunicación personal). Los círculos indican los lugares donde hay series de mediciones de corrientes disponibles.

2.2.1.3. Frentes

Los frentes están caracterizados por una intensificación de los gradientes horizontales de diversas variables, entre las que podemos citar la temperatura, densidad, salinidad, variables biológicas, velocidades, etc. Debido a la alta disipación mareal y mezcla vertical producida por la intensa interacción de la marea con la topografía submarina, la zona de los golfos Norpatagónicos es propensa a la producción de frentes los cuales podrían tener una gran implicancia en el ecosistema del lugar (Acha et al, 2004). Siendo zonas que favorecen fuertemente la producción primaria y secundaria, es claro que están también directamente relacionados a las áreas principales de explotación pesquera. Otros ejemplos similares se pueden observar en el Mar del Norte (Daan *et al.*, 1990), y en la costa

Este de Norteamérica et al. (principalmente el área de Georges Bank, Lynch et al., 1996).

En la zona de estudio se han identificado varios frentes, mediante sensores remotos y observaciones directas. Glorioso y Simpson (1994) calcularon la disipación de energía de marea relacionada con la fricción de fondo y la vincularon con el parámetro de estratificación. De este modo, identificaron la existencia de sistemas frontales al Norte de Península Valdés. Estos autores determinaron máximos de disipación al Noreste de PV de 50 W/m^2 . Imágenes satelitales recientes de temperatura superficial muestran un gran contraste en verano entre aguas más frías cercanas a la PV y las aguas más cálidas de la plataforma (Fig. 2-2). En esta región se han encontrado evidencias de la relación entre esta dinámica y las estrategias reproductivas de las dos especies importantes en la zona (Anchoa, *Engraulis anchoita* y Merluza argentina, *Merluccius hubbsi*) debido a que tanto las zonas de criadero como de desove se encuentran cerca de ese lugar (Bakun and Parrish, 1991; Ehrlich et al., 1998). También grandes concentraciones de Vieyras (*Claims Patagonica*) se encuentran aparentemente relacionadas con la formación del frente de Valdés (Orensanz et al., 1991).

Sabatini y Martos (2002) investigaron los patrones espaciales e hidrográficos de las comunidades de mesozooplankton en el área frontal de Península Valdés mediante mediciones con CTD en el año 1995 y 1998. Estos autores determinan que los patrones de abundancia de mesozooplankton están ligados a la heterogeneidad ambiental que presenta el sistema frontal, existiendo marcadas diferencias en la composición y estructura de las comunidades a lo largo del mismo.

Recientemente Romero et al. (2006) analizaron la productividad primaria de la zona cercana a PV mediante la variable clorofila "a" en superficie utilizando observaciones del sensor remoto SeaWiFS, encontrando una alta concentración en cercanías del FPV (Fig. 2-3a). Asociado a la formación de los frentes, también se ha detectado la ocurrencia de las denominadas "mareas rojas" (Carreto et al., 1986). Este fenómeno ha sido detectado en otras regiones del planeta, como ser en la plataforma Noroeste Europea (Le Fébre, 1986), Noreste de EEUU (Anderson, 1997) y en la costa de Sudáfrica (Pitcher et al., 1998). Carreto investigó e identificó, en

relación al frente de Valdés, diferentes grados de intensidad tóxica en los dinoflagelados *Alexandrium Tamarense*.

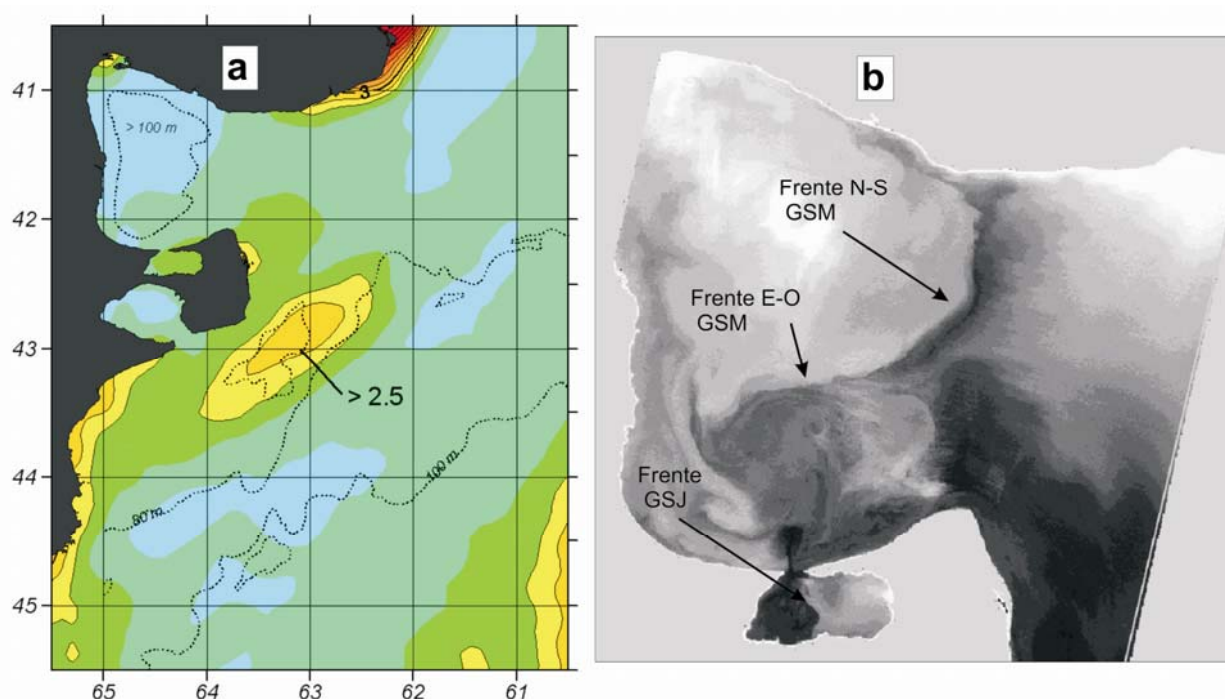


Figura 2-3. Imágenes satelitales del Frente de Valdés. a) Clorofila "a" superficial, mediante el sensor SeaWiFS y b) Temperatura Superficial del mar (60 m de resolución) del sensor LANDSAT ETM7+ en el mes de Diciembre 2001. (a, modificado de Romero et al., 2006 y b modificado de Gagliardini et al., 2004)

En los últimos años se ha mejorado el análisis de frentes utilizando la teledetección, es decir inferir patrones a partir de imágenes satelitales obtenidas de sensores remotos. Esta herramienta se basa en detectar radiación electromagnética emitida o reflejada por los diferentes objetos terrestres observados. De acuerdo a las características físicas de cada elemento se puede identificar lo que se denominan firmas espectrales, las cuales se utilizan en el procesamiento y análisis de los valores medidos para representarlos en imágenes de fácil visualización. Gagliardini y Rivas (2004) estudiaron los frentes y su estacionalidad dentro del GSM mediante el análisis de imágenes LANDSAT-TM y ETM+ desde 1997 hasta 2003. Estos autores verifican mediante dos sensores diferentes la variación de temperatura superficial en el GSM, corroborando la hipótesis de las dos zonas bien marcadas dentro del GSM por Carreto *et al.* (1974) (Fig. 2-3b). Más recientemente, Amoroso (2004) y Amoroso *et al.*, 2010 han utilizado esta técnica para el estudio del GSJ y su interacción con el GSM, detectando a su vez un frente térmico meridional en el interior del GSJ (Fig. 2-

3b). La alta concentración de nutrientes (Charpy, Charpy-Roubaud, y Pizarro, 1980) y la productividad del GSJ, es comparable a la producida por zonas de surgimiento (upwelling) (Charpy y Charpy-Roubaud, 1980) y se atribuye a la penetración de aguas ricas en nutrientes de la plataforma adyacente (Charpy y Charpy-Roubaud, 1980).

2.2.2. Modelos Numéricos.

Debido a la complejidad de la circulación en los golfos norpatagónicos se hace difícil y costosa la relevación de datos con una aceptable resolución espacial y temporal. Esto motivó a que comenzaran a implementarse modelos numéricos de la dinámica existente con el fin de contar con una herramienta de conocimiento y predicción de la circulación.

2.2.2.1. Circulación en la Plataforma exterior.

Los trabajos de simulaciones numéricas de la Plataforma Argentina permitieron, junto a las observaciones, obtener las características principales de la circulación, como así también determinar mecanismos que gobiernan dicha dinámica y determinar nuevas líneas de investigación. Los primeros modelos numéricos basados en datos hidrográficos (Zyryanov y Severov, 1979; Lusquiños y Schrott, 1983; Forbes y Garraffo, 1988) indican un transporte hacia el NE en la Plataforma, del orden de $1,5 \text{ Sv}$ ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$), principalmente en el Norte. Según Rivas, (1995) y Rivas y Frank Langer (1996) en la plataforma se produce un flujo en dirección N-NE con velocidades medias en la vertical que no superan los 0.1 m/s , incrementándose la magnitud hacia el Norte y hacia el talud. El campo de velocidades fue calculado geostróficamente a partir, del campo de temperatura y que satisface la conservación de calor y masa. Las variaciones estacionales del flujo muestran mayor intensidad en verano y otoño y menos intensidad en invierno y primavera.

Glorioso y Flather (1995), muestran también resultados del flujo general en dirección N-NE, calculados con un modelo barotrópico no lineal que fija la elevación de la superficie libre en los bordes abiertos del dominio. El modelo está forzado con ocho componentes principales de marea y vientos de Hellerman y Rosenstein (1983). El

resultado se muestra afectado por la topografía, siendo que se intensifica hacia el Norte mientras la plataforma se reduce. Este modelo logra capturar celdas de recirculación anticiclónicas en la zona de Bahía Grande y el Golfo San Jorge. Recientemente, modelos barotrópicos de mayor resolución espacial sugieren que la circulación media anual en la Plataforma Continental Argentina cuando está forzada por vientos y marea responde con un flujo en dirección N-NE al Sur de 40°S, pero superado este límite el flujo es hacia el S-SO (Palma et al, 2004a, 2004b). Estas simulaciones afirman la hipótesis de la formación de giros anticiclónicos en Bahía Grande y Golfo San Jorge y adicionan un giro ciclónico en el Golfo San Matías.

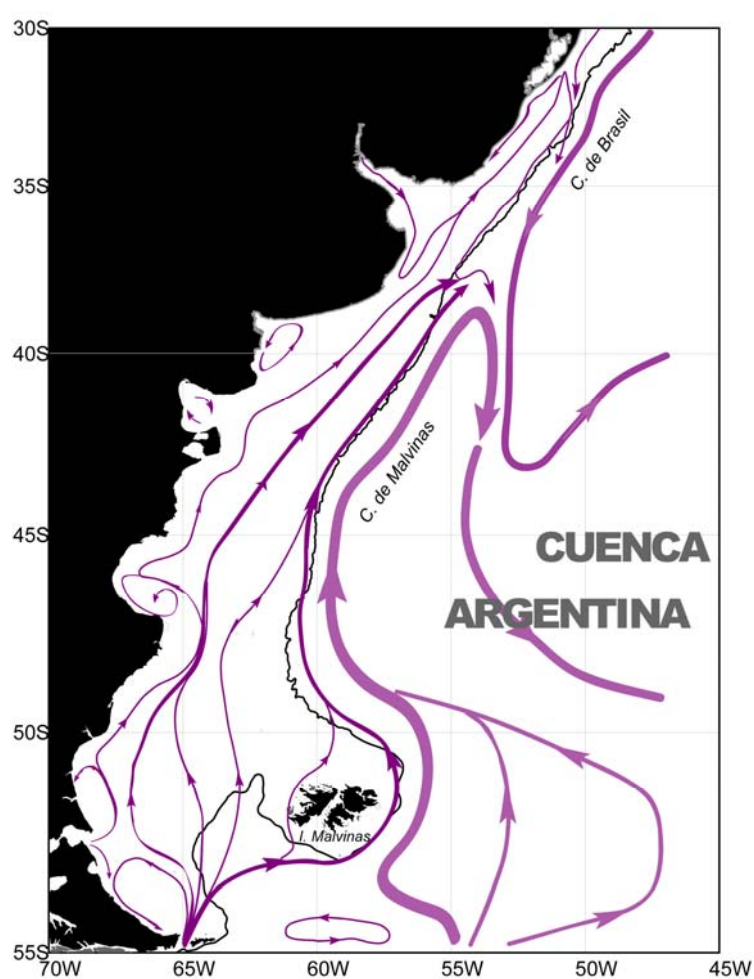


Figura 2-4. Circulación esquemática en la Plataforma Continental Argentina (modificado de Palma et al., 2008)

Los últimos trabajos sobre la Plataforma revelan algunos aspectos adicionales de la circulación no reportados previamente (Palma et al, 2008). En la zona Sur de la Patagonia, la circulación general se orienta hacia el NNE, aumentando su intensidad en la plataforma intermedia, producto de los vientos desde el Oeste y del aporte de

agua menos salina del estrecho de Magallanes y Le Maire y la mezcla mareal. Al Norte de 50°S, la circulación y la variabilidad en la plataforma media y exterior es controlada principalmente por los gradientes de presión generados por la Corriente de Malvinas. Con la inclusión de la corriente de borde se incrementa varias veces el transporte a lo largo de la plataforma con respecto al generado por vientos y mareas. Los resultados encontrados por el modelo están en buena concordancia con las escasas mediciones directas disponibles y algunos patrones inferidos a partir de observaciones hidrográficas. Un esquema de la circulación en la plataforma patagónica, compilado en base a los estudios previos se muestra en la fig. 2-4.

2.2.2.2. Circulación en los golfos

Barros y Krepper (1977) realizan una primera simulación de la circulación media del GN para el mes de Octubre con un modelo lineal de una sola capa (geostrófico) el cual se resuelve sobre una grilla computacional por el método de diferencias finitas centradas. Los autores realizaron varios experimentos en el dominio del GN modificando las condiciones de borde y forzantes. En el primer experimento se analiza la respuesta de un GN cerrado de profundidad constante forzado con un viento uniforme. Otros experimentos consideran batimetría variable, efectos del rotor del viento y conexiones con el océano exterior. Los resultados indican que la circulación resultante del modelo es apreciablemente sensible a la variación de la topografía cuando se pasa del experimento de profundidad constante al de batimetría real. No se aprecia una significativa diferencia en las características de la circulación al introducir un campo de vientos con rotor. Los cambios importantes al modificar el forzante de viento se producen en las zonas de aguas poco profundas. La circulación correspondiente al mes de análisis aparece restringida a la parte central y Este del golfo con dos vórtices de circulación anticiclónica (antihoraria). El caso del golfo conectado con el océano no muestra significativas modificaciones en la circulación interior, por lo cual los autores concluyen que sería factible trabajar sobre el golfo como cuenco cerrado.

Posteriormente, Rivas (1989) utilizó un modelo bidimensional lineal para estudiar el efecto de la intensidad y dirección del forzante de viento sobre las corrientes originadas en el GN. Los forzantes utilizados fueron la acción indirecta de la marea (incluida mediante el incremento de la fricción de fondo) y meteorológicos (vientos

en dos direcciones normales entre sí). El modelo utiliza diferencias finitas, y tiene una resolución espacial cercana a 4 km. El autor simuló tres experimentos durante 22 h, uno con vientos del Oeste otro con vientos del Sur espacialmente homogéneos y un tercero (simulado por 2 días aprox.) con vientos variables cada una hora también espacialmente homogéneos. El experimento con vientos de Oeste responde con una circulación media que divide meridionalmente al golfo en dos grandes giros: uno anticiclónico ubicado sobre la costa Oeste y Sur y otro ciclónico sobre la costa Norte y zona más profunda. El experimento con vientos del Sur resulta en una circulación que divide el golfo zonalmente, sobre la costa Occidental un giro menos definido de sentido horario y sobre la mitad Oriental un giro de circulación antihoraria. Los resultados indican que las rápidas variaciones de profundidad normales al viento no permiten el equilibrio entre el gradiente de elevación y el viento, tomando mayor importancia la fuerza de Coriolis y generando flujos en la dirección del viento y paralelos a las costas que retornan por la zona central donde las variaciones de profundidad son más suaves. Los flujos geostrofos tienden a permanecer paralelos a las isobatas aún cuando el viento cambia de dirección.

El primer modelo numérico de la región del GSM fue elaborado por Akaprahamyan (1991) quien aplicó el modelo oceánico Bryan-Cox de diferencias finitas (Bryan, 1969; Cox, 1985). La resolución espacial del modelo es de aproximadamente 15 km en la horizontal y siete capas verticales y utiliza una condición en la superficie libre denominada de tapa rígida, con lo cual no es posible simular la propagación de ondas superficiales (por ejemplo la marea). Se realizaron simulaciones barotrópicas (densidad constante) mensuales forzadas con vientos constantes analíticos y con vientos climatológicos de Hellerman y Rosenstein (1983) y una simulación baroclínica de corto alcance (~100 días) inicializada con datos de salinidad y temperatura de invierno de las campañas NORPAT I. Los resultados del modelo barotrópico muestran que existen dos sistemas de circulación dentro del GSM forzados por los vientos predominantes del Oeste. Uno de ellos está compuesto por una giro antihorario al SO del Golfo y otro de circulación horaria, cercano a la boca del mismo, que realiza el intercambio de agua con la plataforma adyacente. El agua ingresaría de esta manera por el S y saldría por el N. Los experimentos con vientos estacionales muestran que el intercambio del Golfo con la plataforma es más intenso en invierno-otoño que en primavera-verano. Aunque los campos de temperatura y

salinidad refuerzan la circulación inducida por el viento, este patrón no parece modificarse significativamente. En el intercambio descrito el golfo recibiría aguas más frías y menos salinas por el S y exportaría agua más cálida y salina por el N. Debe recalarse, sin embargo, que la única simulación realizada corresponde a una situación de invierno, donde la columna de agua se halla bien mezclada.

Glorioso y Simpson (1994) investigaron la componente M_2 de la marea en la zona Norte de la Patagonia Argentina mediante la aplicación de un modelo numérico barotrópico de aguas poco profundas (bidimensional). La grilla computacional tiene una resolución de 7.5 km y el modelo se simuló por 4 días aproximadamente. Los resultados muestran que la distribución del parámetro de Simpson – Hunter predice la ubicación de dos zonas frontales en la región. Una en cercanías de Península Valdés y otra cercana a Bahía Blanca. La disipación de la energía de marea por efecto de la fricción de fondo se halla altamente concentrada al Noreste de Península Valdés. Los resultados también muestran una depresión neta de la elevación al Noreste de PV donde la dinámica es controlada por el balance entre la aceleración centrífuga y el gradiente de presión barotrópico. El modelo representa, aunque con muy poca resolución, dos giros de recirculación (dipolos) en las corrientes residuales eulerianas al Norte de PV.

Mazio *et al.* (2004) investigaron mediante un modelo numérico barotrópico bi-dimensional la hidrodinámica de marea en el GN y plataforma adyacente. El modelo está forzado con seis componentes principales de marea (M_2 , S_2 , N_2 , K_1 , O_1 y M_4) y utiliza un esquema implícito de diferencias finitas para resolver las ecuaciones primitivas sobre la grilla computacional. La resolución espacial utilizada es de 2.75 km. x 2.75 km. El modelo se inicializa en reposo con velocidades normales a la costa nulas y elevaciones de marea en cada paso de tiempo en el borde abierto. Encontraron que la principal componente de la marea que gobierna la dinámica es la semidiurna M_2 (90% de la energía de marea). Los resultados de amplitudes y fases de la componente M_2 comparan bien con observaciones en Puerto Madryn. El modelo no incluye efectos baroclínicos y el forzante de viento en superficie. Los autores tampoco describen ningún tipo de patrón de circulación media en el golfo a través de las corrientes residuales de marea a pesar de la buena resolución espacial del modelo.

Finalmente, Moreira (2008) empleó el modelo HamSOM (Hamburg Shelf Ocean Model, Backhaus, 1985) para estudiar la propagación y energía de las mareas en los Golfos Norpatagónicos. El modelo es tridimensional barotrópico, utiliza coordenadas cartesianas y se resuelve mediante el método de diferencias finitas. Se realizaron tres experimentos con grillas anidadas de dominios diferentes para obtener en la zona de los golfos norpatagónicos una resolución espacial cercana a 1 km. La grilla de dominio mayor se utilizó para forzar en los bordes abiertos a la sucesora y así a la siguiente. La batimetría es realista tomada de la digitalización de las cartas náuticas del Servicio de Hidrografía Naval. El modelo emplea 10 niveles horizontales y se forzó con ocho componentes principales de marea (M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 y Q_1) en los bordes abiertos. La simulación se inicia en estado de reposo y se mantiene por 14 meses. Los resultados indican un régimen de mareas en la Plataforma Patagónica esencialmente semidiurno y dominado por la componente principal M_2 . La marea se propaga a lo largo de la Plataforma Patagónica como una onda de Kelvin e ingresa a los golfos desde el Sur, con una importante amplificación en el interior de los mismos. La amplitud alcanza valores mayores a 3 m en la porción occidental del GSM y en el GSJ, en el GN supera los 1.8 m. Las simulaciones captan adecuadamente la intensidad y dirección de las corrientes y muestran que son máximas en las bocas de los golfos (duplican o triplican las del interior). En el GSM las elipses de marea indican un aumento a lo largo de la costa en dirección noroeste, alcanzando en San Antonio Este valores mayores a 0.6 m/s. La disipación de energía por fricción de fondo en la región de los golfos es de 15 GW, que representa un 17 % del total de la Plataforma Patagónica. El flujo de energía proviene del Sur y viaja paralelo a la costa e ingresa por el Sur al GSM y sale por la parte Norte de la boca, no así en los otros golfos donde los flujos de energía se ven restringidos al acceso. Cabe aclarar que en el trabajo, el autor no hace un análisis ni descripción de los patrones de circulación media generados por las corrientes residuales.

Los trabajos mencionados, aunque han contribuido ciertamente a acrecentar el conocimiento sobre la circulación en la región, en general carecen de la suficiente resolución espacio-temporal o no incluyen todos los forzantes necesarios para establecer un esquema realista que incluya giros internos en los golfos, estacionalidad y formación de frentes térmicos, dinámica en las bocas de los golfos y eventos en aguas poco profundas. Hasta ahora los modelos utilizados han sido

mayormente bidimensionales dejando incógnitas sin resolver acerca de la tridimensionalidad y distribución vertical de campos de velocidad, importancia de la estratificación o respuesta dinámica a variaciones atmosféricas como fluctuaciones en el flujos de calor o intensidad y magnitud del viento.