



FACULTAD DE INGENIERÍA

Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

EVALUACIÓN DE UN MODELO ANALÍTICO BIDIMENSIONAL DE CORRIENTES DE MAREA SEMIDIURNA PARA ESTIMAR POTENCIA DE ENERGÍA

José Ignacio Ribba Esteva

Septiembre 2015

**EVALUACIÓN DE UN MODELO ANALÍTICO BIDIMENSIONAL DE CORRIENTES DE MAREA
SEMIDIURNA PARA ESTIMAR POTENCIA DE ENERGÍA**

José Ignacio Ribba Esteva

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

Mario Cáceres Muñoz
Profesor guía

Catalina Aguirre Galaz
Docente

Patricio Winckler Grez
Docente

DECLARACIÓN

Este trabajo, o alguna de sus partes, no ha sido presentado anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.

La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo quisiera agradecer a mis Padres por darme la oportunidad de estudiar una carrera profesional y apoyarme en todo. Al Pipe, Cata, Matti, Luca, Gabo, Andreita y Seba por acompañarme y estar ahí siempre. A mi preciosa favorita Niza por aguantarme, aconsejarme, amarme, cuidarme, alentarme y muchos 'me' más en las buenas y en las malas, de lo que ha sido nuestro proyecto juntos y a Sonic por brindarnos un 'puff puff' cada vez que lo queremos tomar. Al Chalito y la Cami por compartir bonitos momentos, preparar ricas pizzas y apoyarme. A mis grandes amigos de infancia Andrea y Miguel por alentarme a finalizar esta etapa y apoyarme cuando lo he necesitado. A mi querida 'Tita' Marcia y gran amigo Rodrigo por tenderme la mano cuando más lo necesité. A Karina y Benja por todo el apoyo que me han brindado en todo momento. A mis grandes compas y amigos de Oceánica con quienes compartí tremendas vivencias: Franco, Pablo, Ro, Kiko y muchos otros que con cariño guardo en recuerdos.

Quiero agradecer al profesor Mario por la paciencia y excelente disposición que siempre tuvo para lograr terminar esta etapa, a la profesora Catalina por disponer de su tiempo a pesar de que se encuentra en una etapa importante de su vida fuera de la UV, y al profesor Patricio por ser fuente de inspiración para muchos en la carrera, siempre con buena disposición y ayudando en todo momento.

Los datos de ADCP remolcado de Canal Desertores fueron obtenidos en una campaña de corrientes institucional del año 2001 para satisfacer demanda de la carta náutica, realizado por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) a través del Centro Nacional de Datos Oceanográficos (CENDHOC).

Los datos del Estero Pitipalena fueron proporcionados por el proyecto FNDR de la Decimoprimer región de Aysén, código BIP 30010880-0 "Análisis del Comportamiento de la Marea Roja en dos localidades de la provincia de Aysén, Puerto Melinka y Puerto Raúl Marín Balmaceda", proyecto en el cual el profesor Mario Cáceres se desempeñaba como co-investigador.

Los datos de ADCP de Canal Jerónimo fueron gentilmente proporcionados por el SHOA en el marco de un acuerdo de cooperación para estudios de energía por corrientes de marea.

Los datos de ADCP del Canal Chacao fueron proporcionados por el profesor Mario Cáceres como parte de la base de datos usada en Cáceres *et al.*, 2003; y los datos del Canal Fitzroy fueron gentilmente proporcionados por el Instituto de Fomento Pesquero en el marco de un acuerdo de cooperación.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS SITIOS ESCOGIDOS	3
1.1.1 CANAL DESERTORES	4
1.1.2 CANAL CHACAO	5
1.1.3 CANAL JERÓNIMO	6
1.1.4 CANAL FITZROY	7
1.1.5 CANAL DEL ESTERO PITIPALENA	8
2 FUNDAMENTO TEÓRICO	9
2.1 CIRCULACIÓN EN SISTEMAS ESTUARINOS	9
2.2 GENERALIDADES EN LA DIMENSIÓN LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL EN LOS ESTUARIOS	9
2.3 MODELOS ANALÍTICOS EN DIMENSIÓN TRANSVERSAL	10
2.4 CORRIENTES DE MAREA Y ENERGÍA	18
2.4.1 CORRIENTES DE MAREA	18
2.4.2 APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LAS CORRIENTES DE MAREA	18
3 OBJETIVOS	20
3.1 OBJETIVO GENERAL	20
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
4 METODOLOGÍA	21
4.1 MEDICIONES CON ADCP MÓVIL Y BATIMETRÍA	21
4.1.1 CANAL DESERTORES	22
4.1.2 CANAL CHACAO	23
4.1.3 CANAL JERÓNIMO	24
4.1.4 FITZROY	25
4.1.5 PITIPALENA	26
4.2 APLICACIÓN DEL MODELO	28
4.2.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO EN MEDICIONES TRANSVERSALES	28
4.2.2 SECCIONES CON MEDICIONES TRANSVERSALES	28
4.2.2.1 Desertores	31
4.2.2.2 Chacao	31
4.2.2.3 Jerónimo	32
4.2.2.4 Fitzroy	33
4.2.3 CASO PITIPALENA CON MEDICIÓN LONGITUDINAL	34
4.3 POTENCIA DE ENERGÍA Y ANÁLISIS PARA LA EXTRACCIÓN	37
5 RESULTADOS	37
5.1 CANAL DESERTORES	37
5.1.1 COMPARACIÓN OBSERVACIONES-MODELO SECCIÓN 1 (S1)	37
5.1.2 PARÁMETROS ESTADÍSTICOS SECCIÓN 1	39
5.1.3 COMPARACIÓN OBSERVACIONES-MODELO SECCIÓN 2 (S2)	39

5.1.4	PARÁMETROS ESTADÍSTICOS SECCIÓN 2.....	41
5.2	CANAL CHACAO	42
5.2.1	COMPARACIÓN OBSERVACIONES Y MODELO	42
5.2.2	PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	44
5.3	CANAL FITZROY	45
5.3.1	COMPARACIÓN OBSERVACIONES Y MODELO M_2	45
5.3.2	PARÁMETROS ESTADÍSTICOS M_2	45
5.3.3	COMPARACIÓN OBSERVACIONES Y MODELO K_1	47
5.3.4	PARÁMETROS ESTADÍSTICOS K_1	47
5.4	CANAL JERÓNIMO.....	49
5.4.1	COMPARACIÓN OBSERVACIONES Y MODELO	49
5.4.2	PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	51
5.5	CANAL PITIPALENA.....	51
5.5.1	CIRCULACIÓN DEL MODELO	51
5.6	POTENCIA DEL FLUJO EN LAS SECCIONES.....	56
5.6.1	POTENCIA CANAL DESERTORES	57
5.6.2	POTENCIA CANAL CHACAO.....	58
5.6.3	POTENCIA EN CANAL FITZROY.....	59
5.6.4	POTENCIA EN CANAL JERÓNIMO	60
5.6.5	POTENCIA EN CANAL PITIPALENA	61
6	DISCUSIÓN	62
6.1	ANTECEDENTES	62
6.2	ASPECTOS DEL ANÁLISIS.....	62
7	CONCLUSIÓN	67
8	REFERENCIAS.....	68
9	APÉNDICE.....	71
9.1	DISPOSITIVOS DE EXTRACCIÓN.....	71
9.1.1	TURBINA DE EJE TRANSVERSAL-HORIZONTAL (THAWT)	72
9.1.2	VIBRACIÓN INDUCIDA POR VÓRTICES (VIVACE).....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Lugares de estudio en zonas sur y austral de Chile	3
Figura 2: Mapa satelital de canal desertores	4
Figura 3: Mapa satelital de canal Chacao	5
Figura 4: Mapa satelital de canal Jerónimo	6
Figura 5: Mapa satelital de canal Fitzroy	7
Figura 6: Vista satelital del fiordo Pitipalena	8
Figura 7: Procesos hidrodinámicos y batimetría afectando la distribución transversal de velocidades en un canal.....	10
Figura 8: Esquema de variables en el modelo de Wong	11
Figura 9: Patrón de flujo descrito por modelo de Wong.....	13
Figura 10: Esquema de variables en el modelo de Huijts.....	15
Figura 11: Comparación entre (a) modelo y (b) observaciones del flujo semidiurno en un transecto del estuario de James River.....	17
Figura 12: Comparación marea-viento de densidad de potencia disponible	19
Figura 13: Canal Desertores (panel izquierdo), ubicación de los transectos 1 y 3 con orientación este-oeste (p. derecho sup.) y perfil batimétrico de las secciones 1 y 3 (p. derecho inf.). Números con asteriscos son las numeraciones de los transectos.	22
Figura 14: Canal Chacao (b), ubicación del transecto de medición con isobatas cada 20 m (c) y perfil batimétrico de la sección (a).....	23
Figura 15: Canal Jerónimo (panel izquierdo), ubicación del transecto de medición (p. derecho inf.) y perfil batimétrico de la sección (p. derecho sup.). Puntos sobre la batimetría en panel izquierdo son la posición de las sondas de profundidad.....	24
Figura 16: Canal Fitzroy (panel izquierdo), ubicación del transecto de medición (p. derecho sup.) y perfil batimétrico de la sección (panel derecho inf.). Números con asterisco son la numeración de los transectos.	25
Figura 17: Transectos de correntometría con ADCP en el fiordo Pitipalena	26
Figura 18: Grilla batimétrica y secciones transversales del canal Pitipalena.....	27
Figura 19: Contornos de correlación R y RMSE en corridas del modelo dentro de rangos de variación de A_z y U_m , del perfil central del lado norte de Canal Chacao. Los intervalos de R son 0.2 para $R < 0.9$ y de 0.02 para $R > 0.9$	29
Figura 20: Velocidades del modelo y velocidades referenciales promedio de cada perfil (U_{mp})	30
Figura 21: Perfiles de datos en Desertores.....	31
Figura 22: Perfiles de datos en C. Chacao	31
Figura 23: Perfiles de medición Jerónimo.....	32
Figura 24: Perfiles de medición Fitzroy.....	33
Figura 25: Sección longitudinal y transversales en Pitipalena	34
Figura 26: Perfiles verticales de modelación sobre la sección longitudinal de canal Pitipalena (panel superior). (a) Sección 1; (b) Sección 2; (c) Sección 3; (d) Sección 4; (e) Sección 5 ...	35

Figura 27: (a) Observaciones de la amplitud de la corriente de marea M_2 en canal Desertores S1. (b) Variabilidad transversal de R , A_z y RMS en la sección. (c) Solución analítica en Desertores S1. Línea segmentada es el dominio de las observaciones.	38
Figura 28: Comparación de perfiles de corriente con alta y baja correlación (R) en Desertores S1.....	39
Figura 29: (a) Observaciones de la amplitud de la corriente de marea M_2 en canal Desertores S2. (b) Variabilidad transversal de R , A_z y RMS en la sección. (c) Solución analítica en Desertores S2. Línea segmentada es el dominio de las observaciones.	40
Figura 30: Comparación de perfiles de corriente con alta y baja correlación (R) en Desertores S2.....	41
Figura 31: (a) Observaciones de la amplitud de la corriente de marea M_2 en C. Chacao (b) Variabilidad transversal de R , A_z y RMSE en la sección. (c) Solución analítica en C. Chacao.	43
Figura 32: Comparación de perfiles de corriente con alta y baja correlación (R) en Canal Chacao.....	44
Figura 33: Comparación de perfiles de corriente M_2 con alta y baja correlación (R) en Canal Fitzroy	45
Figura 34: (a) Observaciones de la amplitud de la corriente de marea M_2 en C. Fitzroy (b) Variabilidad transversal de R , A_z y RMSE en la sección. (c) Solución analítica en C. Fitzroy.	46
Figura 35: Comparación de perfiles de corriente K_1 con alta y baja correlación (R) en Canal Fitzroy	47
Figura 36: (a) Observaciones de la amplitud de la corriente de marea K_1 en C. Fitzroy (b) Variabilidad transversal de R , A_z y RMSE en la sección. (c) Solución analítica en C. Fitzroy.	48
Figura 37: (a) Observaciones de la amplitud de la corriente de marea K_1 en C. Jerónimo (b) Variabilidad transversal de R , A_z y RMSE en la sección. (c) Solución analítica en C. Jerónimo.	50
Figura 38: Comparación de perfiles de corriente M_2 con alta y baja correlación (R) en Canal Fitzroy	51
Figura 39: Solución analítica de la amplitud de la corriente de marea M_2 en las secciones de canal Pitipalena.....	53
Figura 40: Comparación de perfiles de corriente M_2 en canal Pitipalena en los cinco transectos: a) Sección 1, b) Sección 2, c) Sección 3, d) Sección 4 y e) Sección 5.	55
Figura 41: (a) Potencia verticalmente promediada en C. Desertores. (b) Distribución de potencia en S1 (c) Distribución de potencia en S2	57
Figura 42: (a) Potencia verticalmente promediada en C. Chacao. (b) Distribución de potencia en la sección	58
Figura 43: (a) Potencia verticalmente promediada en C. Fitzroy. (b) Distribución de potencia en sección M_2+K_1	59
Figura 44: (a) Potencia media en la vertical C. Jerónimo. (b) Distribución de potencia en la sección	60

Figura 45: Potencia verticalmente promediada, interpolada horizontalmente a partir de los cinco transectos del C. Pitipalena	61
Figura 46: Solución analítica lado norte de C. Chacao. (a) Valor constante de $A_z=0.085 \text{ m}^2/\text{s}$ y $U=2.8 \text{ m/s}$ para toda la sección y (b) A_z variable en la horizontal.....	64
Figura 47: (a) Turbina axial horizontal y vertical, (b) hidroplanos, (c) turbinas de eje transversal-horizontal (THAWT, por sus siglas en inglés) y las (d) vibración inducida por vórtices (VIVACE).	72
Figura 48: Funcionamiento de una turbina THAWT.....	73
Figura 49: Funcionamiento de una turbina VIVACE	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resumen de características de las secciones y parámetros en caso transversal	30
Tabla 2: Resumen parámetros Pitipalena.....	36
Tabla 3: Resultados de análisis estadístico y coeficiente de viscosidad turbulento en C. Pitipalena	54
Tabla 4: Promedios transversales de R y RMSE en los canales en estudio	63
Tabla 5: Parámetros típicos y números no dimensionales en canales de estudio	65
Tabla 6: Valores de potencia media, máxima y mínima por sección	66
Tabla 7: Configuración del dispositivo VIVACE a distintas escalas de extracción	74
Tabla 8: Configuración a escala mega del elemento VIVACE.....	75

RESUMEN

El presente estudio tiene por objetivo evaluar el modelo analítico de Huijts *et al.* (2006), que simula la distribución de la amplitud de la corriente de marea M_2 en secciones transversales de cinco canales del sur de Chile, con el fin de cuantificar la potencia del flujo disponible en estos sitios. Las distribuciones de corrientes fueron evaluadas en cada canal utilizando mediciones de ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) móvil en cuatro transectos transversales de canales (Chacao, Desertores, Fitzroy y Jerónimo) y uno longitudinal (canal Pitipalena). Además, se efectuaron pruebas con la componente K_1 en canal Fitzroy.

Para ejecutar el modelo se requirieron como entrada un coeficiente de viscosidad turbulento (A_z) y la amplitud de corriente del armónico (U). Para estimar los valores de A_z en los sistemas seleccionados, se estableció un rango del parámetro A_z en cada sección, en función de la profundidad y la velocidad del flujo, y se seleccionaron dentro de ese rango los valores que entregaban los mejores ajustes de correlación (R) y RMS con el modelo. Se obtuvo así, un coeficiente de viscosidad turbulento variable en el espacio transversal. Al conocer el comportamiento transversal de la corriente se obtuvo la potencia del flujo disponible en el área de la sección con una ecuación que relaciona la densidad del agua y la velocidad de la misma, presentando así la caracterización del recurso energético en las secciones.

Los resultados del modelo en las secciones transversales (Chacao, Desertores, Jerónimo y Fitzroy) mostraron una alta correlación y mínimos errores en comparación con los datos observados, lo que permitió explorar con confianza la distribución transversal modelada en Pitipalena, a partir de un transecto longitudinal. En este sitio se modeló a partir de un perfil vertical en la región central del canal. Se discuten en el texto las bondades y limitaciones del modelo.

1 INTRODUCCIÓN

La necesidad de generar energías limpias se vuelve cada día más importante en nuestro país, debido al incremento global de los gases de efecto invernadero y al crecimiento de la demanda de recursos energéticos. Para su desarrollo se hace necesario encontrar soluciones que consideren energías renovables y no contaminantes, considerando que las principales fuentes energéticas que hoy proveen al país caen dentro de esta categoría o atentan contra el medio ambiente. Actualmente y según el Centro de Energías Renovables (CER), del Ministerio de Energía, en el mes de noviembre de 2014, sólo el 9,6% de la capacidad energética instalada en Chile corresponde a Energías Renovables No Convencionales (ERNC) de las cuales ninguna es generada por mareas. El número de proyectos de índole energético convencional que no se han podido implementar ha ido en aumento según el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) por no cumplir los requerimientos ambientales necesarios para la puesta en obra. Esto se suma a la creciente oposición ciudadana a diversos proyectos por atentar a la calidad de vida de las personas en el corto y largo plazo, como ocurre en algunas regiones de nuestro país p. ej. Ventanas.

La región de fiordos y canales del sur de Chile se caracteriza por poseer una amplia diversidad de canales con velocidades que los hace atractivos para la generación de energía por corrientes de marea, existiendo algunos de ellos, como el Canal Chacao y la Primera Angostura, en los que las velocidades de las corrientes superan los 3 m/s durante un porcentaje considerable del ciclo mareal (Garrad-Hassan, 2009). La reciente aparición de instrumentos de generación de energía con corrientes típicas de 1 m/s (Bernitsas *et al.*, 2008), han ampliado las posibilidades de aprovechamiento de energía de bajas magnitudes, ya que la disponibilidad de estos sitios es considerablemente mayor que los de alta velocidad en esta región. Además, se han desarrollado dispositivos que mejoran la eficiencia de captación en diversos modos. En la Universidad de Oxford ya se han probado prototipos que permiten una captación eficiente en todo el ancho de sección de un canal (McAdam *et al.*, 2009; McAdam R. , 2011; Kepler Energy, 2014), lo que resalta la importancia de la dimensión transversal en canales para obtener la mayor extracción de energía disponible. El estudio de la variabilidad de la hidrodinámica en esta dimensión está adquiriendo cada vez mayor atención (Wong, 1994; Cáceres *et al.*, 2002; 2003; Valle-Levinson *et al.*, 2003) y se ha observado que los patrones de distribución lateral de las corrientes a lo largo de un canal o fiordo, pueden presentar una alta diversidad dependiendo de la combinación de los agentes forzantes del movimiento y de la batimetría, entre otros.

La hidrodinámica costera presenta, en general, una mayor complejidad que la observada en las regiones oceánicas, debido a la interacción de una mayor diversidad de forzantes externos. Mientras en el océano los agentes dominantes suelen estar relacionados con los gradientes de presión, el efecto de Coriolis y el efecto de arrastre del viento, en las zonas costeras y estuarinas se deben agregar los efectos friccionales, advectivos y de ondas internas, entre otros. Esto hace que para la comprensión de los fenómenos se utilicen herramientas de modelación de la hidrodinámica, capaces de integrar varios forzantes y generar patrones de distribución de las corrientes. La aplicación de estos modelos también se hace después de aplicar escalamiento de los términos de la ecuación de movimiento, que llevan a simplificaciones y suposiciones físicas que hacen más sencilla su aplicación. En el caso de los modelos analíticos, basados en las ecuaciones que gobiernan la hidrodinámica, es posible estudiar con mayor detalle la sensibilidad de los sistemas entre los parámetros

que los rigen. Al igual que en otros sistemas estuarinos, los fiordos del sur de Chile exhiben un clásico comportamiento hidrodinámico dominado por competencia entre los gradientes de presión por aportes de agua dulce, acción de la marea y estrés del viento (Fierro, Bravo, & Castillo, 2000; Valdenegro & Silva, 2003; Castillo & Valenzuela, 2006). Los modelos analíticos que se han desarrollado para estudiar el comportamiento transversal de las corrientes han sido aplicados principalmente en estuarios costeros someros, donde la profundidad máxima no supera los 15 m (Friedrichs & Hamrick, 1996; Huijts, 2010; Zitman & Schuttelaars, 2012; Arnott *et al.*, 2012; Basdurak & Valle-Levinson, 2013).

En el presente estudio se evalúa el comportamiento de un modelo analítico de corrientes de marea semidiurna en secciones a lo ancho de cuatro canales profundos (> 15 m) del sur de Chile, con el propósito de determinar su potencial de energía disponible. La evaluación se realiza en un canal de altas magnitudes (Canal Chacao) y en cuatro canales de magnitudes medias o bajas (Canal Desertores, Canal Jerónimo, Canal Fitzroy y Canal Pitipalena).

1.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS SITIOS ESCOGIDOS

La ubicación de los sitios seleccionados para el presente estudio se indica en la Fig. 1, cuya elaboración se realizó sobre Cartas de Navegación Electrónicas (CNE's) del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA).

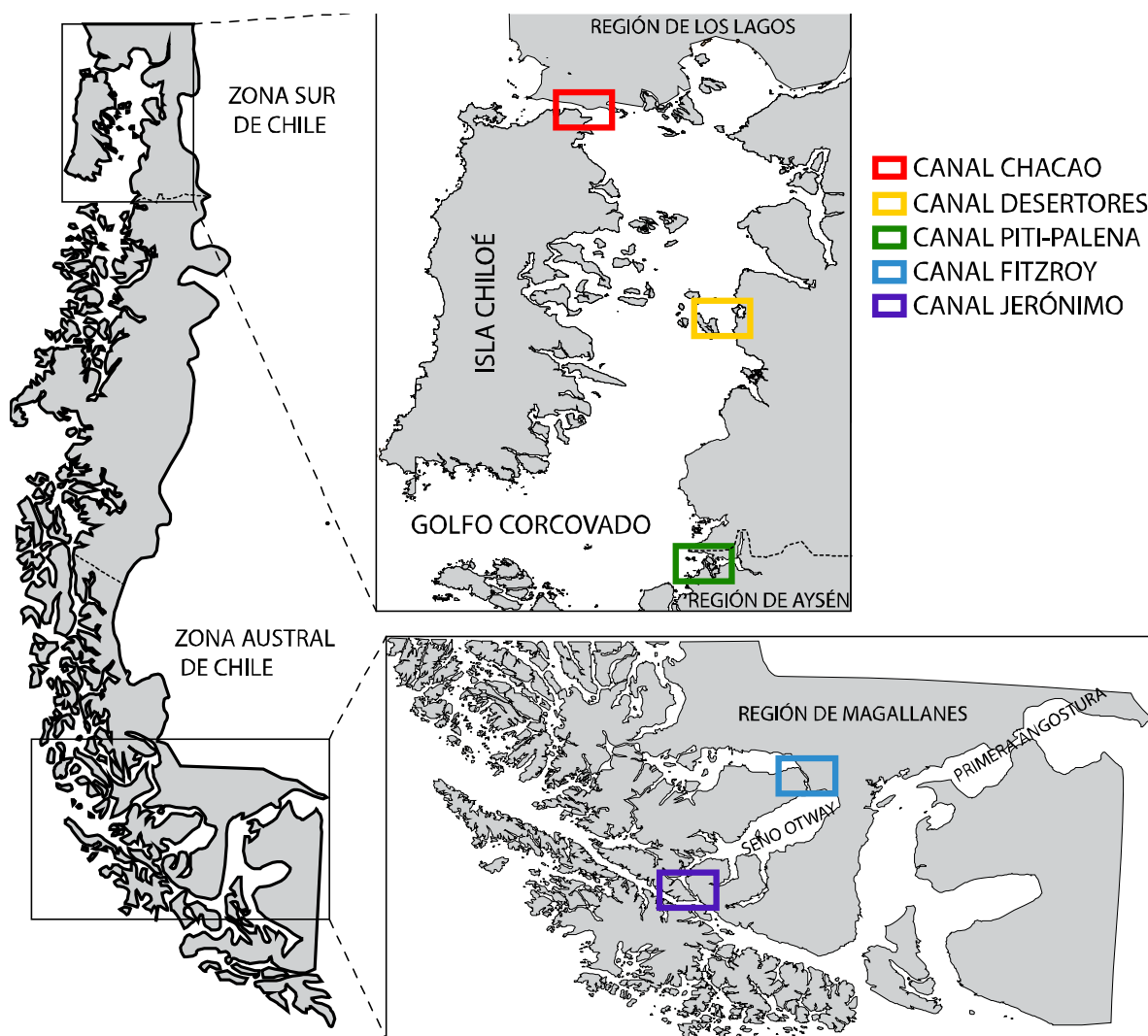


Figura 1: Lugares de estudio en zonas sur y austral de Chile

Fuente: Elaboración propia sobre CNE N° CL100007 y CL100008.

1.1.1 CANAL DESERTORES

Se sitúa en la décima región de los Lagos, en una posición media de $42^{\circ}44'S$ y $72^{\circ}53'W$, entre el lado oriental del islote Nihuel y de la isla Talcán y la costa continental que se extiende desde punta Refugio hasta la punta Vilcún, ubicado entre el golfo de Ancud por el norte y el golfo Corcovado en el sur, en el mar interior de Chiloé. Es un canal profundo, de aproximadamente 15 km de largo, 4 km de ancho y sondas no inferiores a 50 m. La onda de marea se propaga hacia el norte con corrientes intensas de 1 a 2 m/s y rangos de altura de ~4 m (SHOA, 1990).

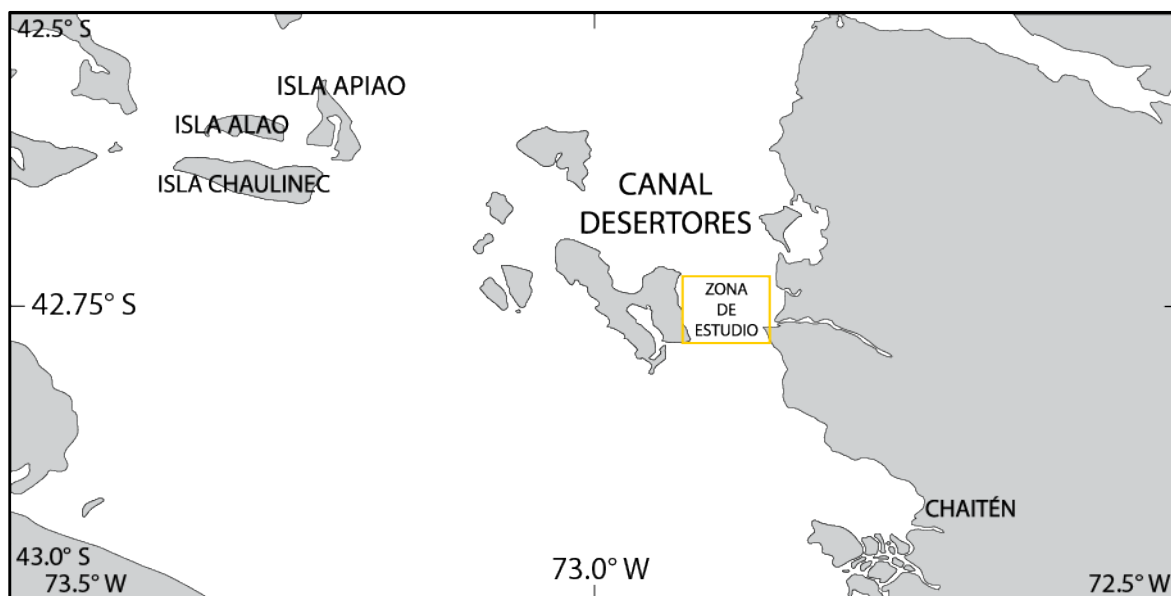


Figura 2: Mapa satelital de canal desertores
Fuente: Elaboración propia sobre CNE N° CL100007.

1.1.2 CANAL CHACAO

Es el principal candidato en estudios de cuantificación energética debido a su cercanía con estaciones del sistema interconectado central y por las elevadas magnitudes de las corrientes que lo cruzan (típicamente > 2 m/s). Se ubica en la décima región de los Lagos, en una posición media de $41^{\circ}47'S$ y $73^{\circ}31'W$. Separa el continente americano de la costa norte de la isla de Chiloé uniendo el golfo Coronados con el golfo de Ancud. La entrada oriental está entre punta Coronel y la punta Tres Cruces, mientras que la entrada oeste está entre punta Chocoy y la punta Guapacho. El largo total del canal es de aproximadamente 26 km y su ancho varía desde 1.8 km hasta 4.63 km en la zona más ancha.

Las mareas y corrientes en Canal Chacao se producen con extrema intensidad. En sicigias las aguas presentan el aspecto de un río correntoso y la amplitud de marea oscila de 3 a 5 m en la Roca Remolinos, con corrientes de 1.5-4.6 m/s (SHOA, 1990).



Figura 3: Mapa satelital de canal Chacao
Fuente: Elaboración propia sobre CNE N° CL100007.

1.1.3 CANAL JERÓNIMO

El Canal Jerónimo se encuentra ubicado en la Región Duodécima o de Magallanes y Antártica Chilena en una posición media de 53.38°S y 72.48°W , a 110 km de Punta Arenas, aproximadamente. Se abre en la costa norte del Estrecho de Magallanes, entre las puntas San Jerónimo por el Oeste, y Arauz por el Este. Corre inicialmente en dirección al NO hasta el cabo Forty Five, por 15 kilómetros y un ancho entre 925 m y 2 km, luego tuerce al NE por 22 km y una anchura que varía entre los 2.4-3.5 km para desembocar en el Seno Otway. El segmento del canal utilizado para este estudio se ubica en la orientación hacia el NO.

Las mareas en canal Jerónimo son de notable regularidad, con una amplitud que llega a 1.4 m; mientras que las corrientes, varían con la posición lunar y el viento reinante, alcanzando velocidades de hasta 3.5 m/s en la llenante y 2.5 m/s en la vaciante (SHOA, 2000).

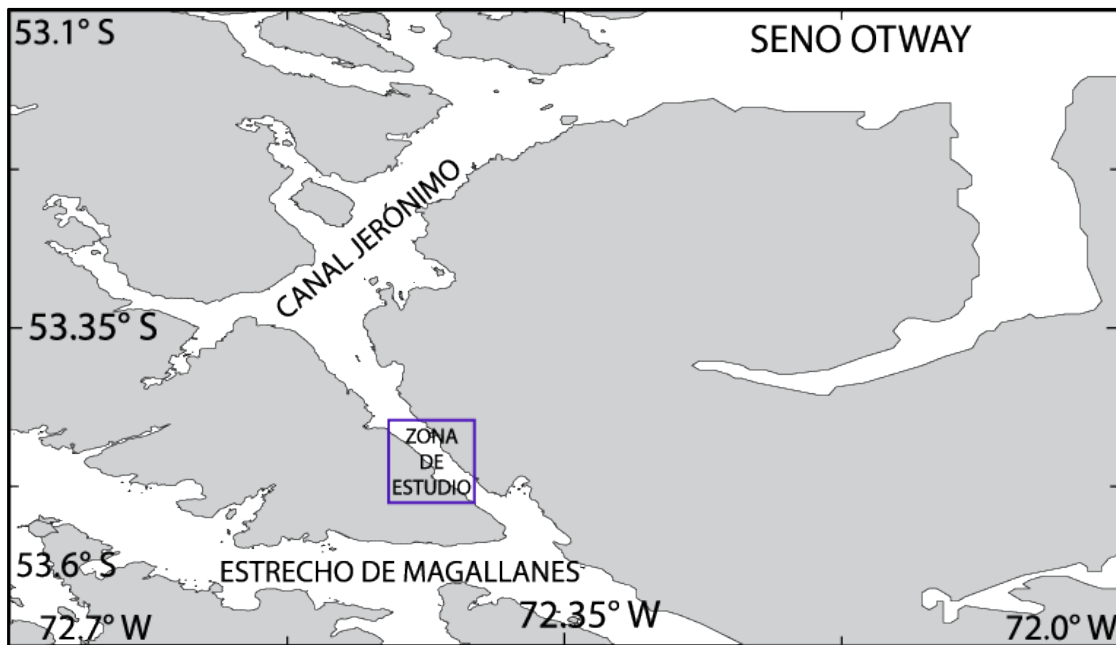


Figura 4: Mapa satelital de canal Jerónimo
Fuente: Elaboración propia sobre CNE N° CL100008.

1.1.4 CANAL FITZROY

Ubicado en la Región Duodécima o de Magallanes y Antártica Chilena, en una posición media de $52^{\circ}43'S$ y $71^{\circ}23'W$, comunica los senos Otway y Skyring, abriéndose entre las puntas Hall y Jorge. Tiene un largo de 19.3 km aproximadamente y un ancho de 0.4~1.5 km. La corrientes presentes en el canal alcanzan velocidades medias de 2 m/s. (SHOA, 2000).



Figura 5: Mapa satelital de canal Fitzroy
Fuente: Elaboración propia sobre CNE N° CL100008.

1.1.5 CANAL DEL ESTERO PITIPALENA

El fiordo Pitipalena está ubicado en la Región Undécima o Aysén del General Carlos Ibañez del Campo, en una posición media de 43°47'S y 72°56' W. Mide 22 km de largo y forma parte de un complejo sistema de fiordos y canales en el Sur de Chile. Su batimetría se profundiza fiordo adentro. La boca del fiordo es un canal de 6.5 km de largo con diversas constricciones y profundidades que alcanzan los 30 m en algunos sectores. La amplitud de la corriente en el sector del canal alcanza 1 m/s (SHOA, 1990).

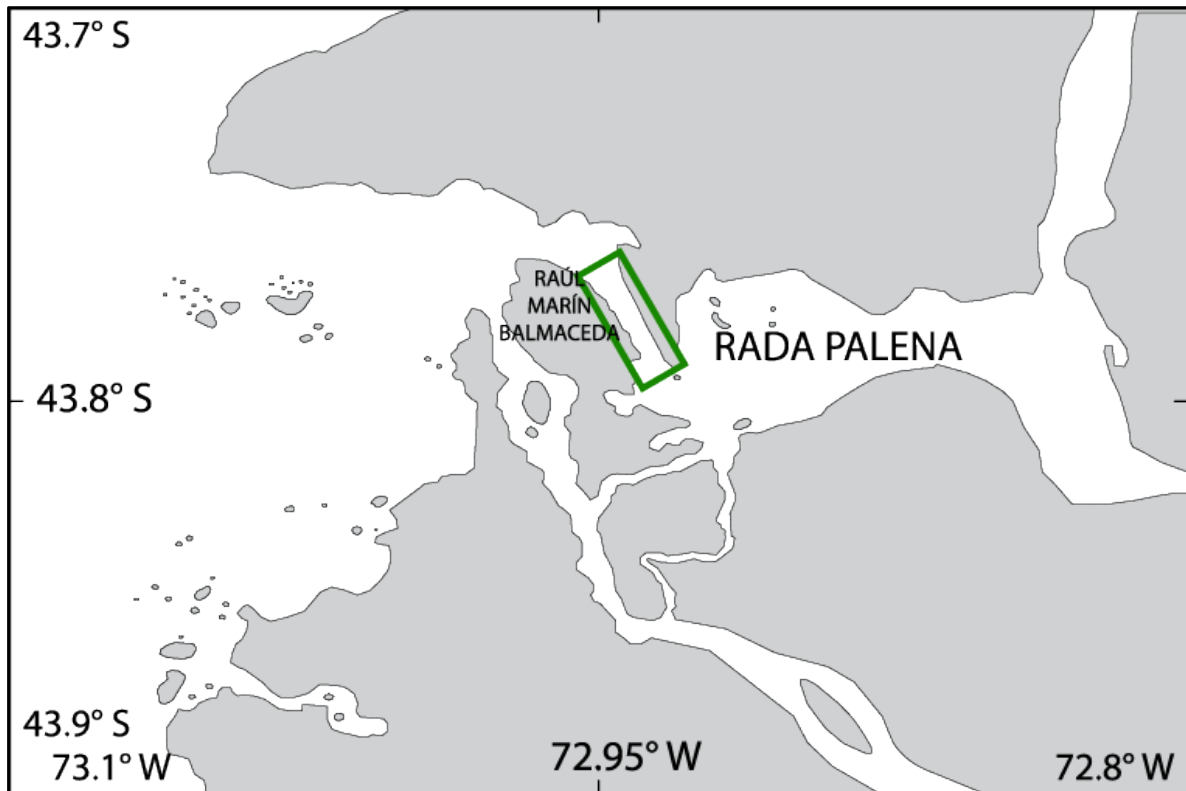


Figura 6: Vista satelital del fiordo Pitipalena
Fuente: Elaboración propia sobre CNE N° CL100007.

2 FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 CIRCULACIÓN EN SISTEMAS ESTUARINOS

La clásica definición de estuario de Cameron y Pritchard (1963) indica que un estuario es un “cuerpo de agua costero semi-cerrado que posee libre comunicación con el océano, generando una dilución del agua salada con el agua dulce proveniente de fuentes como aguas lluvia o ciclos de deshielo continental”. Así, un estuario se ubica en la zona de transición entre la fuente de agua dulce terrestre y el océano adyacente, pudiendo alcanzar distintos grados de dilución en esta región.

En los sistemas estuarinos las velocidades del flujo exhiben un típico patrón vertical de dos capas, donde la capa superficial de agua más dulce se dirige hacia océano y la capa subsuperficial de agua oceánica va hacia el interior del estuario. Este patrón puede verse modificado en zonas de constricciones y umbrales batimétricos, donde las aceleraciones de las corrientes llevarán a un aumento de los términos friccionales y advectivos en la ecuación de movimiento, generando un balance a lo largo entre fricción y advección. En dichos sistemas, los flujos de salida se ubicarán en las zonas profundas de la sección transversal y los de entrada en las regiones someras (Cáceres *et al.*, 2003).

2.2 GENERALIDADES EN LA DIMENSIÓN LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL EN LOS ESTUARIOS

Como ya se mencionó, un estuario es un sistema semi-cerrado donde las aguas dulces de diversas fuentes se mezclan con las del océano. Los principales forzantes externos de la hidrodinámica en estuarios son la marea, el flujo de río y el viento. La interacción de estos agentes, unida al efecto de la morfología costera y la topografía submarina, determinan el campo de corrientes presente en los estuarios. En aquellos sistemas donde el aporte de agua dulce proveniente del drenaje terrestre está ausente o es insignificante, se acostumbra denominarlos con el nombre genérico de “canales”. En este caso, la marea toma un rol dominante en la hidrodinámica del canal. Usualmente se asume que la hidrodinámica de los fiordos posee un balance de momentum longitudinal en el que el gradiente de presión es balanceado por la fricción y un balance lateral geostrófico, entre las aceleraciones de Coriolis y las aceleraciones por gradientes de presión (Dyer, 1997).

El interés por los estudios de la dimensión transversal en estuarios apareció con los trabajos de Fischer, 1972; Wong, 1994; Kasai *et al.*, 2000; Valle-Levinson *et al.*, 2003; Huijts *et al.*, 2006; Huijts, 2010; Cáceres *et al.*, 2010, entre otros.

Los esfuerzos internos de los flujos son una consecuencia de diversos factores como vientos, gradientes de densidad, mezclas turbulentas y la batimetría, entre otros (Fig. 7). La variación de estos esfuerzos por efecto del fondo, influenciado por los cambios en la batimetría de los canales, incide directamente en la variabilidad transversal de los flujos (Friedrichs & Hamrick, 1996; Arnott *et al.*, 2012; Basdurak & Valle-Levinson, 2013). Normalmente estos esfuerzos se representan en términos de un coeficiente de viscosidad turbulenta, A_z (longitud²/tiempo), cuyos valores son dependientes de la intensidad del flujo y de los cizalles que puedan ocurrir por efecto de los factores mencionados anteriormente. A_z

varía de manera significativa en espacio y tiempo por efecto de las forzantes, sin embargo, para simplificar los estudios suelen considerarse aproximaciones constantes de este coeficiente, dado que en la práctica es difícil de asignar un valor apropiado para A_z sin resolver ecuaciones en función del tiempo que incluyan esquemas turbulentos avanzados.

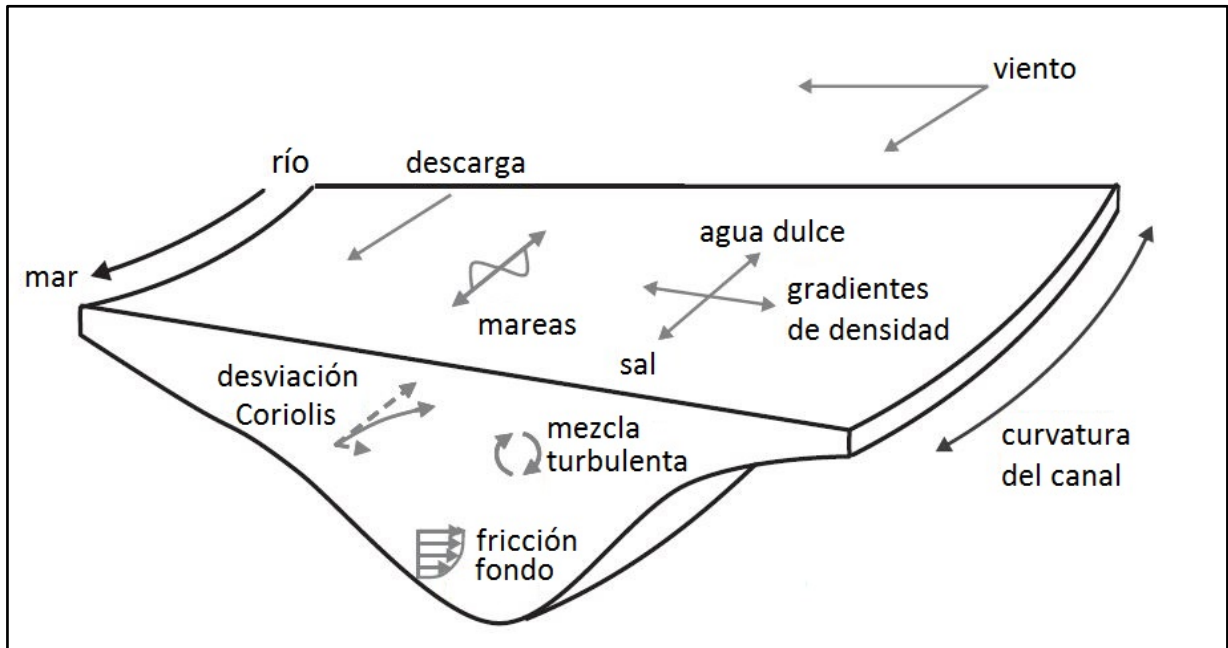


Figura 7: Procesos hidrodinámicos y batimetría afectando la distribución transversal de velocidades en un canal

Fuente: Huijts, 2010.

En ambientes altamente energéticos, los patrones de circulación mareal en los estuarios se ven afectados por efectos friccionales y advectivos. En ambientes friccionales (Arnott *et al.*, 2012) los flujos netos de ingreso se producen en las zonas profundas de los canales y los de salida son por los sectores más someros. El comportamiento advectivo, también ocurre en canales, presenta una hidrodinámica de intercambio del tipo Bernoulli; donde los flujos incrementan su velocidad por efectos de constricción batimétrica o por gradientes de densidad que surgen como consecuencia de la interacción de los flujos durante la llenante-vacante (Basdurak & Valle-Levinson, 2013).

2.3 MODELOS ANALÍTICOS EN DIMENSIÓN TRANSVERSAL

Los modelos hidrodinámicos son aproximaciones teóricas de la realidad que buscan mejorar la comprensión acerca de los mecanismos de funcionamiento de un sistema, permitiendo identificar los elementos más relevantes del forzamiento de la hidrodinámica y realizar predicciones lo más acertadas posible. Los modelos más utilizados son los analíticos y numéricos. Los analíticos tienen la ventaja de que permiten entender de manera fundamental los mecanismos físicos en torno al estudio que se busca desarrollar. Las ecuaciones que gobiernan el problema se simplifican y desarrollan de manera semi-analítica concentrándose en un problema particular (p. ej. entender la variabilidad transversal de los flujos a través de

un canal) y con una configuración particular (p. ej. predominancia de la circulación inducida por gravedad en relación a la inducida por gradientes de densidad). Las mayores ventajas de una solución analítica es que los efectos de mecanismos forzantes individuales pueden ser aislados y estudiados de manera sistemática, ya que el costo computacional de aplicar la solución es bajo. Sin embargo, se debe tener precaución, ya que para conformar una solución analítica, se debe tener pleno conocimiento del fenómeno y de las simplificaciones que se realizan a las ecuaciones que lo gobiernan.

Los modelos numéricos permiten resolver las ecuaciones y realizar predicciones con gran aproximación en espacio y tiempo, a través de diferencias finitas, elementos finitos y volúmenes finitos. No obstante, la precisión se basa en la cantidad y calidad de los datos de entrada que recibe el modelo. Además, el elevado número de operaciones y recursos computacionales limitan su aplicabilidad.

Son diversos los estudios que han explorado la solución de la distribución de corrientes en la dimensión transversal, desarrollando modelos analíticos que han ido evolucionando e involucrando cada vez más una mayor cantidad de forzantes o variables en el análisis (Wong, 1994; Friedrichs & Hamrick, 1996; Kasai *et al.*, 2000; Valle-Levinson *et al.*, 2003; Valle-Levinson, 2008; Huijts *et al.*, 2006; Huijts, 2010; Huijts *et al.*, 2011).

Wong (1994) fue uno de los primeros que estudió mediante soluciones analíticas sencillas, la naturaleza de la variabilidad transversal de las velocidades residuales en la Bahía Delaware, costa Este de los Estados Unidos. Para esto utilizó datos de ADCP y CTD como fuente de validación, observando la distribución transversal de las corrientes en distintas geometrías del perfil de fondo. En el modelo incluyó la circulación gravitacional, la circulación inducida por efectos de viento local y la circulación inducida por forzantes atmosféricas en la boca del estuario, y considerando el gradiente de densidades longitudinales como impulsor de corriente. El modelo de Wong (1994) considera un balance de momentum longitudinal simple para la circulación gravitacional, de acuerdo al esquema de la Fig. 8:

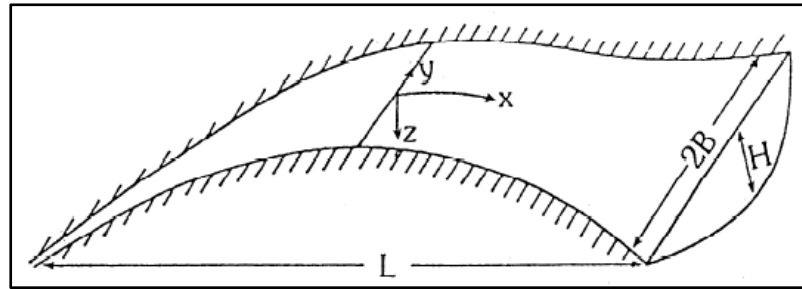


Figura 8: Esquema de variables en el modelo de Wong

Fuente: Wong, 1994

$$0 = \frac{-1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + A_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

La ecuación anterior representa el balance entre el gradiente de presión a lo largo del estuario promediado en la horizontal, y el esfuerzo de corte vertical asociado con la circulación gravitacional, donde ρ_0 es la densidad promediada, p la presión, A_z es la

viscosidad turbulenta que se asume constante, u es la componente longitudinal de la circulación gravitacional, x es positiva a lo largo del canal y z es positivo con la profundidad hasta el fondo. El gradiente de presión horizontal se puede dividir en barotrópico (primer término en el lado derecho de la ecuación 2) y baroclínico (segundo término en el lado derecho de la ecuación 2) como:

$$\frac{-1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} = g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} z \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (2)$$

Donde η es la elevación promediada de la superficie, y $\partial \rho / \partial x$ es el gradiente de densidad promediado en la horizontal, el que por simplicidad se asume independiente de la profundidad. Con (2) se puede diferenciar (1) respecto a z y obtener:

$$0 = \frac{-g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + A_z \frac{\partial^3 u}{\partial z^3} \quad (3)$$

Siempre que el gradiente horizontal de densidad $\partial \rho / \partial x$ sea conocido, la distribución de u puede ser resuelta con tres condiciones de borde. En un estuario donde la variabilidad transversal se puede despreciar, como en uno de sección rectangular, se pueden utilizar las condiciones de borde como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial z} &= 0 & \text{en} & & z=0 \\ u &= 0 & \text{en} & & z=H \\ \int_0^H u dz &= 0 \end{aligned}$$

Lo que indica que no hay fricción por viento en la superficie, no considera deslizamientos en el fondo y se representa la ecuación de continuidad con la suposición de que la descarga de río es ínfima en comparación con la circulación gravitacional.

La solución de (3) fue obtenida por Officer (1976), quedando

$$u(z) = \frac{g}{\rho_0 A_z} \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{H^3}{48} [8(Z/H)^3 - 9(Z/H)^2 + 1]$$

Wong (1994) observó que en una sección triangular, el flujo residual de entrada se concentraba en la zona más profunda y estrecha, mientras que en la de fondo plano, el flujo de ingreso se distribuyó ampliamente en la capa inferior siguiendo el patrón de circulación clásica de los estuarios (Fig. 9). Cabe destacar que la estructura transversal de las corrientes del modelo refleja la influencia del efecto gravitacional, con dos flujos saliendo por los costados y el flujo entrante a través del canal profundo en el medio. El patrón, incluyendo el orden de magnitud de las corrientes, fue cualitativamente consistente con las observaciones.

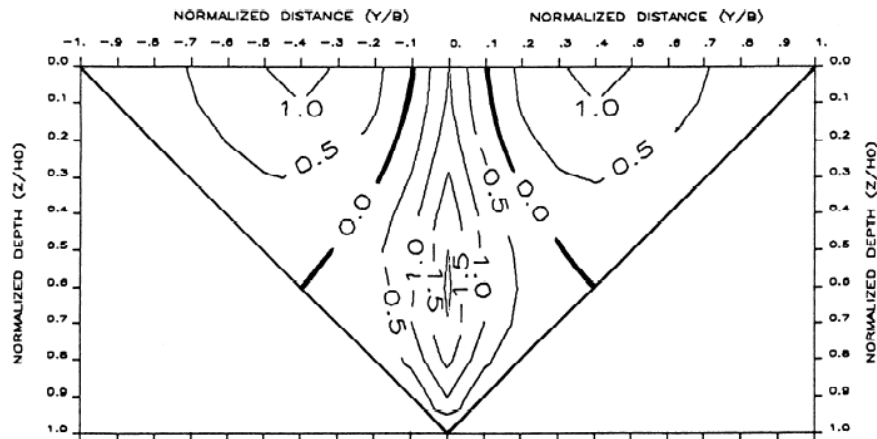


Figura 9: Patrón de flujo descrito por modelo de Wong
Fuente: Wong, 1994.

Posteriormente, estas observaciones fueron ampliadas considerando que hay otros fenómenos que son significativos en cuencas amplias, tomando en cuenta que muchos estuarios en latitudes altas y regiones con influencia de agua dulce (ROFIs por sus siglas en inglés) en latitudes medias, poseen anchos de decenas de kilómetros (Kasai *et al.*, 2000). Fue entonces que Kasai *et al.* (2000), Valle-Levinson *et al.* (2003) y Huijts *et al.* (2006) incorporaron los gradientes horizontales de densidad y la forzante de Coriolis en el modelo analítico.

Los resultados del modelo de Kasai *et al.* (2000), mostraron que el patrón de flujo depende en gran medida del número de Ekman. El número de Ekman (Ek) compara las fuerzas viscosas con la fuerza de Coriolis y se define por:

$$Ek = \frac{A_z U}{f H^2} = \frac{A_z}{f H^2}$$

Donde f es el parámetro de Coriolis ($f = 2\Omega \sin(\lambda)$), Ω = Velocidad angular, λ = Latitud) y H es la longitud característica (habitualmente en la vertical), por lo que para el caso, representa la profundidad típica.

Con un número grande ($Ek > 1$) el sistema se rige por circulación gravitacional, y por lo tanto los gradientes de densidad horizontales gobiernan el flujo. De esta forma los flujos de entrada penetran la superficie a través de profundas depresiones, si la topografía del fondo varía en dirección transversal al canal. Con valores intermedios de Ekman ($Ek \sim 0.1$) el flujo de ingreso se concentra en la capa inferior en la que la viscosidad juega un rol importante, mientras que el flujo de la capa superior se encuentra determinado por el equilibrio geostrófico. El aporte por flujo geostrófico se vuelve significativo de manera que los gradientes de densidad a través del canal son importantes cuando Ekman es pequeño ($Ek < 0.01$).

Con posterioridad, el ancho de las cuencas, la fricción y la rotación de la tierra se investigaron como función de los números no dimensionales de Ekman (Ek) y Kelvin (Ke) (Valle-Levinson A., 2008). El número adimensional Ke compara el ancho de las cuencas con el número de Richardson (R_i), el que a su vez caracteriza la estabilidad de los flujos. Valle-Levinson (2008) utilizó una solución semi-analítica para determinar las condiciones en las que el flujo de intercambio inducido por densidad se encontraba cizallado (gradientes de densidad) vertical u horizontalmente. Las soluciones fueron obtenidas a través de diversas batimetrías que variaban lateralmente. A partir de ello se encontró que el flujo de intercambio presenta gradientes de densidad horizontales en condiciones de elevada fricción ($Ek > 1$), independiente del ancho de la cuenca (Ke). El patrón transversal muestra que el flujo de ingreso se produce en el centro del canal ocupando toda la columna de agua, mientras que el de salida ocurre por los costados del mismo. Este comportamiento también se presenta en condiciones de baja fricción ($Ek \sim 0$) y cuencas amplias ($Ke > 2$). En ese caso, sin embargo, el flujo de salida se concentra en el lado izquierdo (mirando hacia la cuenca en el Hemisferio Norte) de la sección transversal, mientras que el flujo de entrada aparece por el lado derecho. Además, con fricciones débiles, el patrón de intercambio exhibe gradientes verticales, con flujo de salida en la superficie y de entrada por debajo, a medida que el ancho de la cuenca disminuye ($Ke < 1$). Con valores de fricción moderada ($0.01 < Ek < 0.1$), el patrón de intercambio presenta ambos comportamientos, con gradientes verticales y horizontales para todos los anchos.

La distribución de velocidades en secciones transversales es afectada por procesos hidrodinámicos y la batimetría. La forzante hidrodinámica dominante en estuarios mareales es justamente la marea, cuya componente armónica de mayor significancia corresponde, en el mayor de los casos, a la lunar principal semidiurna M_2 .

Uno de los últimos trabajos realizados fue llevado a cabo por Huijts *et al.* (2006), quienes desarrollaron una solución analítica que resuelve, entre otras cosas, la amplitud de corriente de la M_2 en secciones transversales, como parte del estudio de la distribución de velocidad y sedimentos en suspensión de estuarios mareales en secciones transversales a lo largo de un canal, resultantes del gradiente horizontal de densidades, viento, curvatura del canal, descarga de ríos, rotación de la tierra y rectificación mareal.

Los resultados de este trabajo fueron comparados con mediciones de campo de un estudio intensivo realizado en octubre de 2002, llevado a cabo en la zona superior de la bahía Chesapeake, en Maryland, EE.UU. Datos de velocidad y de densidad se obtuvieron durante un ciclo de mareas completo (Fugate *et al.*, 2007).

En el presente estudio se aplica la solución del modelo de Huijts *et al.* (2006) para estudiar las corrientes, de acuerdo al esquema de variables presentado en la Fig 10:

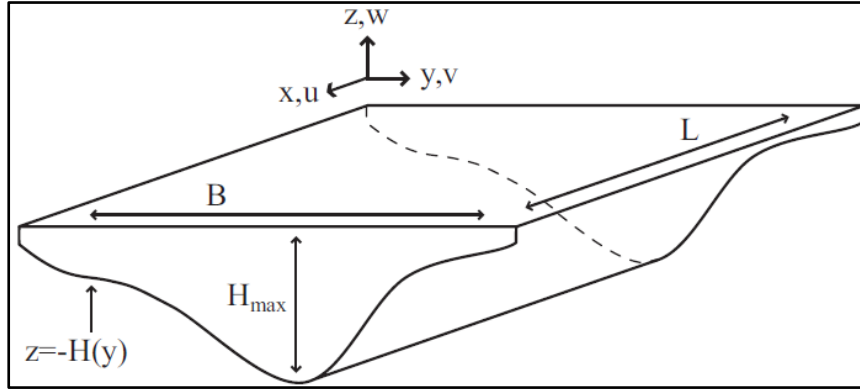


Figura 10: Esquema de variables en el modelo de Huijts

Fuente: Huijts *et al.*, 2006

La descripción del sistema en la dimensión longitudinal es uniforme, por lo que es esencialmente bidimensional con coordenadas horizontales y verticales, como en los de Wong (1994) y Valle-Levinson *et al.* (2003). Debido a que la longitud del sistema en la dimensión x es menor que la longitud de onda de marea, las variaciones en la superficie se desprecian, pero los gradientes de presión son retenidos en el modelo.

El modelo se basa en las ecuaciones tridimensionales de aguas someras en estuarios con condiciones uniformes (Vreugdenhil, 1994; Schramkowski & De Swart, 2002):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f v = \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} z - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right),$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} - f u = \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} z - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right),$$

$$\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0.$$

Donde u , v y w representan las componentes de velocidad longitudinal, lateral y vertical, respectivamente, t es el tiempo, f es el parámetro de Coriolis, g es la aceleración de gravedad, y ρ_0 es la densidad constante de referencia. Los términos $\partial \rho / \partial x$ y $\partial \rho / \partial y$ corresponden a los gradientes de densidad longitudinal y lateral. En sistemas que exhiben un flujo con mezcla parcial o buena mezcla, estos últimos términos pueden ser despreciados. Las dos componentes de los gradientes de la superficie $\partial \eta / \partial x$ y $\partial \eta / \partial y$, están determinados por la dinámica interna del sistema, y A_z es el coeficiente de viscosidad vertical turbulenta.

En la dimensión horizontal se desprecian los efectos friccionales asumiendo que el flujo principal promedio es nulo, $\bar{v} = 0$ en $y = 0, B$, siguiendo lo indicado por Schramkowski *et al.*, 2002. Así, los términos de fricción lateral no son considerados en el modelo.

En la superficie se asume movimiento libre de esfuerzo. Usando la aproximación de superficie rígida, se concentra el enfoque en la dinámica interna del flujo:

$$A_z \frac{\partial u}{\partial z} = A_z \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \quad w = 0 \text{ en } z = 0$$

En el fondo se asume que no hay deslizamiento y es impermeable:

$$u = v = w = 0 \text{ en } z = -H \quad (4)$$

En los bordes se asume que no existe transporte lateral de agua

$$\int_{-H}^0 v dz = 0 \text{ para todo } y. \quad (5)$$

Una descarga de marea semidiurna con amplitud $Q = AU$ y frecuencia ω está determinada por:

$$\frac{1}{A} \int_0^B \int_{-H}^0 u dz dy = U \cos(\omega t) \quad (6)$$

Donde A es el área de la sección y B es el ancho del estuario. Esto entrega el componente de velocidad media a lo largo del canal en una sección transversal específica.

A través de un análisis escalado, se introduce un pequeño parámetro (ϵ) comparando la escala típica para velocidades laterales V y la amplitud de la corriente de marea promediada U , además se identificaron parámetros adimensionales que caracterizan el sistema. Las soluciones del sistema de ecuaciones escalado fueron construidas a través de series de potencia de orden ϵ . Sustituyendo estas expansiones en el sistema de ecuaciones escalado y juntando términos con igual potencia de ϵ , se obtuvo un sistema de ecuaciones de orden dominante (ϵ^0 -términos) y un sistema de ecuaciones de orden superior (SEOS) (ϵ^1 -términos).

La ecuación de orden dominante obtenida es la siguiente:

$$\frac{\partial u_0}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta_0}{\partial x} + A_z \frac{\partial^2 u_0}{\partial z^2}, \quad (7)$$

$$f u_0 = -g \frac{\partial \eta_0}{\partial y} + A_z \frac{\partial^2 v_0}{\partial z^2}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial v_0}{\partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial z} = 0. \quad (9)$$

Las ecuaciones (7) y (8) presentan el balance de momentum en sentido longitudinal y transversal, respectivamente. Aquí la componente del flujo satisface las condiciones de no deslizamiento, ni flujo normal en el fondo, superficie libre de esfuerzo, sin transporte lateral de agua y forzado por M_2 , por lo que el balance de momentum en sentido longitudinal resulta

entonces como consecuencia del balance entre las aceleraciones locales (primer término en el lado izquierdo de la ecuación (7)) y el gradiente superficial (primer término en lado derecho de la misma ecuación), siendo amortiguado por la fricción turbulenta (último término de la ecuación mencionada). La ecuación (9) representa la continuidad, que asume uniformidad a lo largo del canal.

Mediante la aplicación de métodos de análisis de perturbación (Huijts, 2010, apéndice 2B), se obtienen soluciones analíticas del flujo de orden dominante para la componente longitudinal (10) y transversal (11), las que corresponden a:

$$\hat{u}_0 = \frac{ig}{\omega} \frac{\partial \hat{\eta}_0}{\partial x} \left[1 - \frac{\cosh(\alpha z)}{\cosh(\alpha H)} \right], \quad (10)$$

$$\hat{v}_0 = \frac{fg}{\omega^2} \frac{\partial \hat{\eta}_0}{\partial x} \left[1 - \frac{\cosh(\alpha z)}{\cosh(\alpha H)} + \frac{1}{2} ((\alpha z)^2 - (\alpha H)^2) \right] + \frac{g}{2i\omega} \frac{\partial \hat{\eta}_0}{\partial y} ((\alpha z)^2 - (\alpha H)^2), \quad (11)$$

Donde $\alpha = \sqrt{i\omega/A_z}$ e $i^2 = -1$. Las condiciones (5) y (6) fueron utilizadas para resolver los gradientes superficiales, quedando:

$$\frac{\partial \hat{\eta}_0}{\partial x} = \frac{U\omega A}{ig} \left[\int_0^B \frac{1}{\alpha} \{ \alpha H - \tanh(\alpha H) \} dy \right]^{-1}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial \hat{\eta}_0}{\partial y} = \frac{if}{\omega} \frac{\partial \hat{\eta}_0}{\partial x} \left[3 \frac{\alpha H - \tanh(\alpha H)}{(\alpha H)^3} - 1 \right]. \quad (13)$$

Una aplicación del modelo en James River Estuary (Huijts, 2010) reproduce las características principales de la amplitud de la corriente de marea semidiurna observada (Fig. 11). Aparecen amplitudes mayores en el canal y los contornos de velocidad responden a los efectos friccionales de la batimetría.

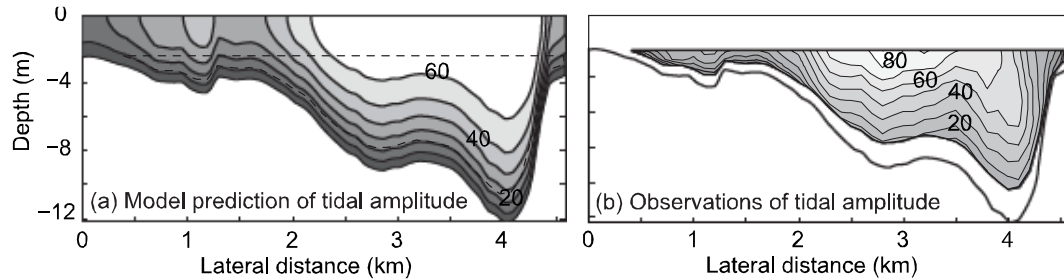


Figura 11: Comparación entre (a) modelo y (b) observaciones del flujo semidiurno en un transecto del estuario de James River

Fuente: Huijts, 2010.

2.4 CORRIENTES DE MAREA Y ENERGIA

2.4.1 CORRIENTES DE MAREA

Las corrientes de marea corresponden al movimiento horizontal del agua causado por las interacciones gravitacionales entre el Sol, la Luna y la Tierra. La velocidad de estas es débil en altamar, pero en las zonas costeras aumentan su intensidad y sus variaciones en dirección, según sea la configuración de la línea de costa. Sus magnitudes pueden llegar a ser considerables en zonas de estrechos y constricciones costeras. Un ejemplo de ello es la Primera Angostura del Estrecho de Magallanes, con una media de 4 m/s (Castillo & Valenzuela, 2006).

Mientras en la zona costera los movimientos son generalmente elípticos y rotatorios, en zonas de dirección restringida, como en ríos, estrechos, canales y fiordos, las corrientes son reversibles (Castillo y Valenzuela, 2006). El hecho de que sean reversibles genera un momento de cambio de dirección donde la magnitud de la corriente es cero, conocido como estoa. En sitios con fuerte interacción con la batimetría y otros agentes externos como viento y descarga de agua dulce, las componentes armónicas de aguas someras de las corrientes de marea crecerán en importancia relativa debido a perturbaciones no-lineales, fricción lateral o de fondo (Cáceres *et al.*, 2003), o por variaciones en el campo local del viento (Cáceres *et al.*, 2002).

2.4.2 APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LAS CORRIENTES DE MAREA

Los movimientos de ascenso y descenso del nivel del mar en zonas de circulación restringida, como en fiordos y canales, generan aceleraciones en el movimiento horizontal asociado a gran cantidad de energía cinética y potencial (Gorlov, 2001).

La energía potencial (E_p) se produce por el trabajo de mover grandes masas de agua en la dimensión vertical, generando desniveles en la superficie del mar. En la costa se facilita la visualización de este fenómeno mediante lo que se conoce como pleamar y bajamar, correspondiente al incremento y disminución del nivel medio del mar, respectivamente. Esta energía puede ser calculada como:

$$E_p = g\rho A \int z dz = 0.5g\rho Ah^2$$

Donde g es la aceleración de gravedad, ρ es la densidad de agua de mar, A es la sección de mar considerada, z es la distancia en la vertical desde la superficie y h es la amplitud de la marea. Tomando un promedio $(g\rho) = 10.15 \text{ kNm}^{-3}$ para el agua de mar, es posible obtener la energía por metro cuadrado de superficie oceánica, en un ciclo de marea (Gorlov, 2009), de la forma:

$$\begin{aligned} E_p &= 1.4h^2, & \text{watt - hora} \\ E_p &= 5.04h^2, & \text{kilojoule} \end{aligned}$$

Como consecuencia de este movimiento, se produce energía cinética en el flujo. La Energía Cinética (E_c) de la masa de agua m , es la capacidad de realizar trabajo de acuerdo a la velocidad V en que se desplaza. Definida como:

$$E_c = 0.5mV^2$$

Por lo cual, la energía total es la suma de las componentes potencial y cinética. Sin embargo, la cantidad de energía disponible para extracción dista bastante del total de cada sitio, ya que está condicionada, entre otros factores, a la eficiencia del elemento extractor, la cantidad de elementos que se utilicen, a las pérdidas de energía por turbulencias o a interacciones que puedan ocurrir con el flujo durante su desplazamiento.

La potencia (P) que puede generar un fluido depende directamente de su densidad y de la velocidad a la que se mueve. La densidad de potencia de un caudal másico (Watt/m^2) está dada por:

$$\left(\frac{P}{A}\right)_{water} = \frac{1}{2} * \rho * U^3 \quad (11) \quad (14)$$

Donde A es el área (m^2) de la sección de flujo interceptado por el dispositivo, ρ es la densidad del agua de mar (kg/m^3) y U es la velocidad de la corriente (m/s). Con esta expresión es posible comparar la energía disponible en dos fluidos: agua y viento. Es evidente que la energía generada por viento a cierta velocidad es sólo una fracción de lo que puede generar la misma cantidad de agua a igual velocidad. El flujo másico de agua de mar en un área unitaria, dispone de 1000 veces (aprox.) más energía de la que dispone el mismo flujo de aire, lo que es explicado por la diferencia de densidad entre ambos (Fig. 12).

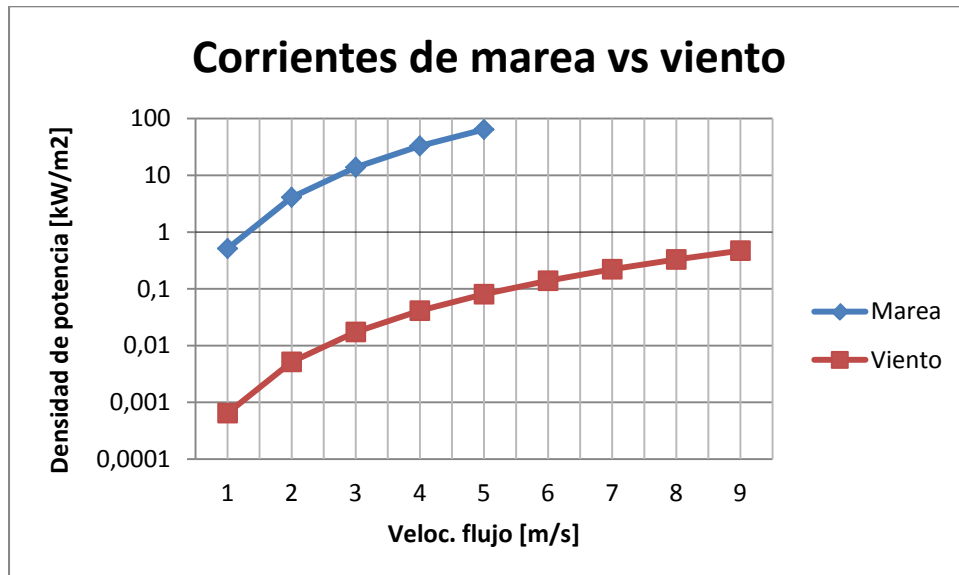


Figura 12: Comparación marea-viento de densidad de potencia disponible
Fuente: Elaboración propia.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento de un modelo analítico de corrientes de marea semidiurna que resuelve las velocidades de las corrientes en secciones transversales, para determinar la potencia energética disponible en canales del sur de Chile.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Procesar datos de ADCP móvil disponibles en los sitios de estudio.
2. Correr el modelo analítico para M_2 en cuatro secciones transversales de los canales en estudio que poseen datos de ADCP móvil a lo ancho del canal.
3. Efectuar correlaciones entre los datos observados y los modelados.
4. Aplicar y evaluar el modelo en un canal con datos de ADCP móvil a lo largo del canal (C. Pitipalena).
5. Estimar la potencia de energía de la componente M_2 en las secciones transversales.

4 METODOLOGÍA

4.1 MEDICIONES CON ADCP MÓVIL Y BATIMETRÍA

Se presenta el detalle de las mediciones con ADCP móvil en los cinco sitios de estudio y el origen de la información batimétrica para fines de modelación utilizada en cada caso.

En todos los sitios se utilizó un perfilador acústico de corrientes Doppler (ADCP) en el modo móvil, donde el instrumento se instaló mirando hacia abajo en un catamarán de 2 a 3 m de largo, el cual era remolcado en forma continua desde el costado de una embarcación por 12 a 24 horas. El desplazamiento de la embarcación se efectuó sobre un circuito previamente diseñado para cada sitio a una velocidad máxima de 2,5 m/s. Esta configuración permite medir corrientes durante el desplazamiento, y al recorrer en forma repetida el circuito, se obtienen datos de corrientes a lo ancho o a lo largo de los canales en los distintos tiempos del ciclo de marea.

En los canales Chacao, Desertores, Jerónimo y Pitipalena se utilizó un equipo ADCP Workhorse RDI de 307,2 kHz, mientras que el Canal Fitzroy se utilizó un equipo LinkQuest de 300 kHz. El ADCP transmitía los datos en tiempo real a través de un cable de comunicaciones conectado a un computador a bordo de la embarcación. El alcance máximo de este equipo es de 130 m de profundidad y la primera celda vertical con datos útiles se ubica aproximadamente a 1,7 m bajo el nivel del agua. Los datos de posición geográfica obtenidos con un equipo GPS instalado en la embarcación, también fueron transmitidos en tiempo real al mismo computador, con lo que se obtuvieron la latitud y la longitud de cada uno de los perfiles verticales de velocidad obtenidos con el ADCP. Se ajustaron los tamaños de celda verticales de muestreo de acuerdo a las profundidades que se recorrieron en cada sitio, las que son indicadas para cada uno de ellos.

Los datos de compás del ADCP fueron corregidos siguiendo el método de Joyce (1989) y Trump y Maromorino (1997); y los datos erróneos de velocidades fueron removidos siguiendo el procedimiento explicado por Valle-Levinson y Atkinson (1999). La señal semidiurna de la marea, representada por la constituyente M_2 con un período de 12.42 horas, fue separada de la señal submareal de los componentes del flujo observado usando análisis de regresión sinusoidal de mínimos cuadrados (Lwiza *et al.*, 1991). Solo en el caso del canal Fitzroy se separó, además, la componente K_1 con un periodo de 23.93 hrs.

4.1.1 CANAL DESERTORES

Se realizaron 15 repeticiones del circuito rectangular de la Fig. 13, totalizando 24 horas de observaciones a partir de las 10:08 hrs. del 3 de abril del 2004, durante la primera cuadratura del mes. Se utilizó un catamarán de 3 m de largo y 1.5 m de ancho aproximadamente, el cual fue remolcado por el AGOR 60 "Vidal Gormaz". Se obtuvieron perfiles verticales de corrientes promediados cada 4 s y el tamaño de las celdas verticales de velocidad fue de 4 m. La adquisición de datos se realizó en el marco de un crucero institucional realizado por el SHOA para la obtención de datos de corrientes para la carta náutica. Se utilizaron los datos de profundidad máxima de los perfiles de ADCP como entrada al modelo en los transectos 1 y 3, ambos con orientación este-oeste, y las velocidades de la amplitud de la corriente M_2 en esta sección para evaluar la salida del modelo.

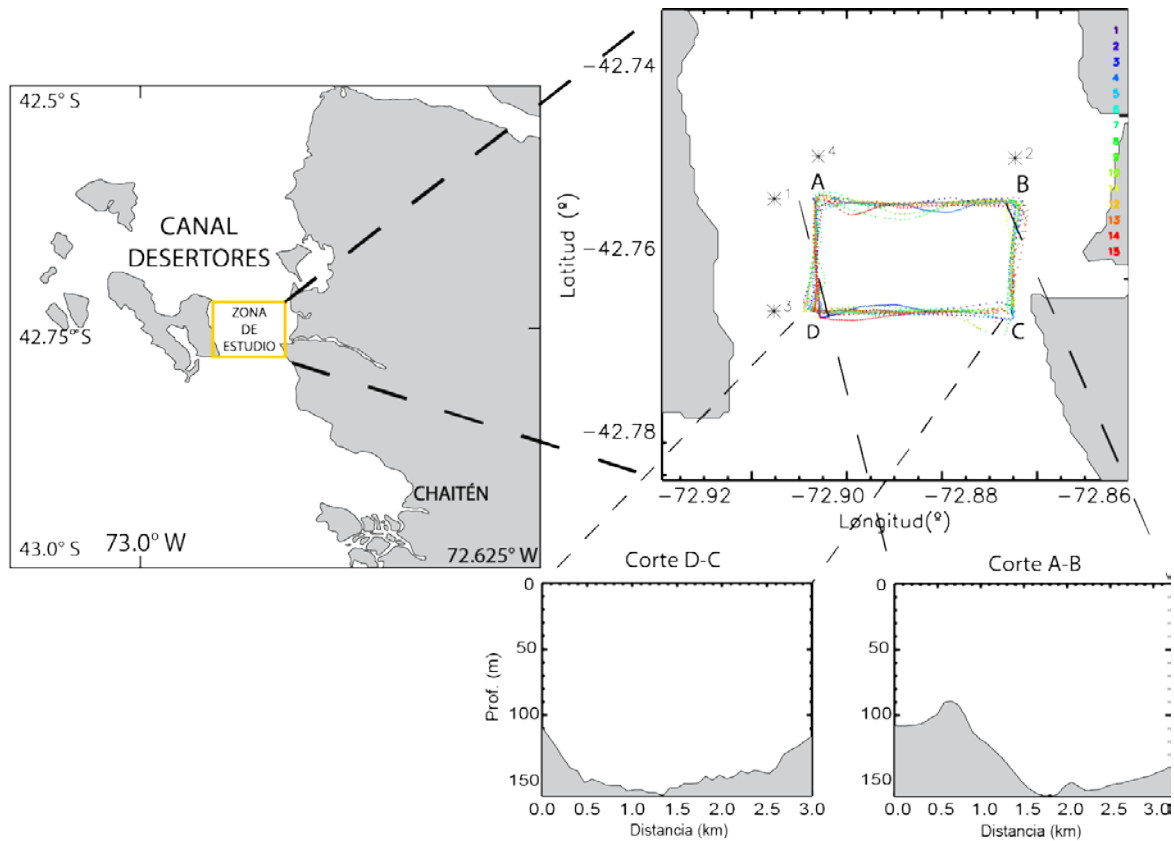


Figura 13: Canal Desertores (panel izquierdo), ubicación de los transectos 1 y 3 con orientación este-oeste (p. derecho sup.) y perfil batimétrico de las secciones 1 y 3 (p. derecho inf.). Números con asteriscos son las numeraciones de los transectos.

Fuente: Elaboración propia

4.1.2 CANAL CHACAO

Se efectuaron mediciones sobre un transecto que cruza transversalmente el canal en su región más angosta, sobre la Roca Remolinos, como lo muestra la Fig. 14. El transecto de 2.2 km fue recorrido 25 veces durante 12.5 horas el 7 de octubre de 1998, 3 días después de la cuadratura secundaria. El ADCP se montó en un catamarán de 1.2 m de largo y los perfiles fueron promediados cada 30 s y el tamaño de las celdas verticales de velocidad fue de 2 m. Los perfiles fueron obtenidos como parte de un estudio de observaciones transversales de la estructura del flujo en un canal energético influenciado por las mareas (Cáceres *et al.*, 2003). Los datos de profundidad máxima de los perfiles de ADCP en esta sección se utilizaron como entrada al modelo, y las velocidades de la amplitud de la corriente M_2 en esta sección para evaluar la salida del modelo.

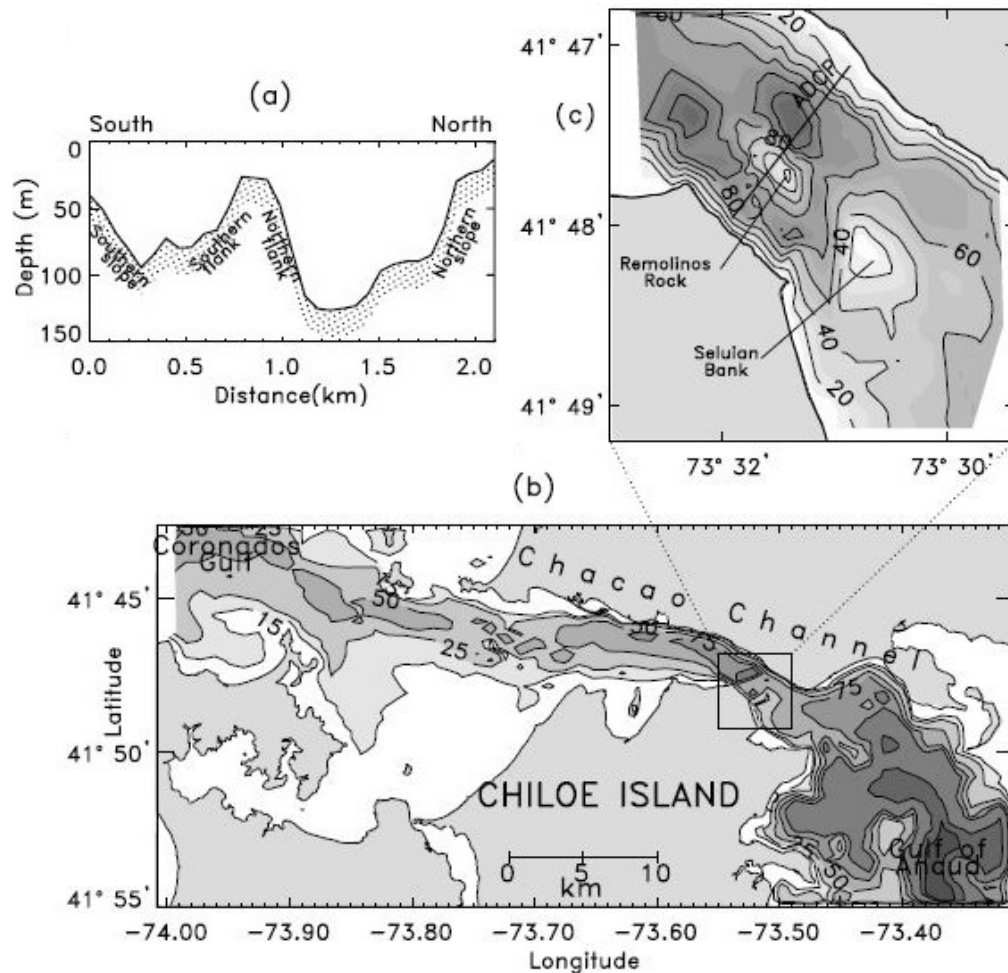


Figura 14: Canal Chacao (b), ubicación del transecto de medición con isobatas cada 20 m (c) y perfil batimétrico de la sección (a).

Fuente: Cáceres *et al.*, 2003.

4.1.3 CANAL JERÓNIMO

Se realizaron 206 repeticiones del transecto transversal a la orientación del canal mostrado en la Fig. 15, totalizando 24 horas de observaciones a partir de las 16:50 hrs. del 29 de noviembre del 2006, durante la cuadratura secundaria del mes. Se utilizó un catamarán de 1.5 m de largo aproximadamente, el cual fue remolcado por una embarcación local. Se obtuvieron perfiles verticales de corriente promediados cada 30 s y el tamaño de las celdas verticales de velocidad fue de 4 m. La adquisición de datos se realizó en el marco de un crucero institucional realizado por el SHOA para la obtención de datos de corrientes para la carta náutica. Se utilizaron los datos de profundidad máxima de los perfiles de ADCP como entrada de batimetría al modelo, y las velocidades de la amplitud de la corriente M_2 en esta sección para evaluar la salida del modelo. Durante este experimento se obtuvieron datos de velocidades sólo hasta una profundidad máxima de 40 m debido a fuertes cabeceos y balanceos de la embarcación, y también por frecuente desvío del rumbo.

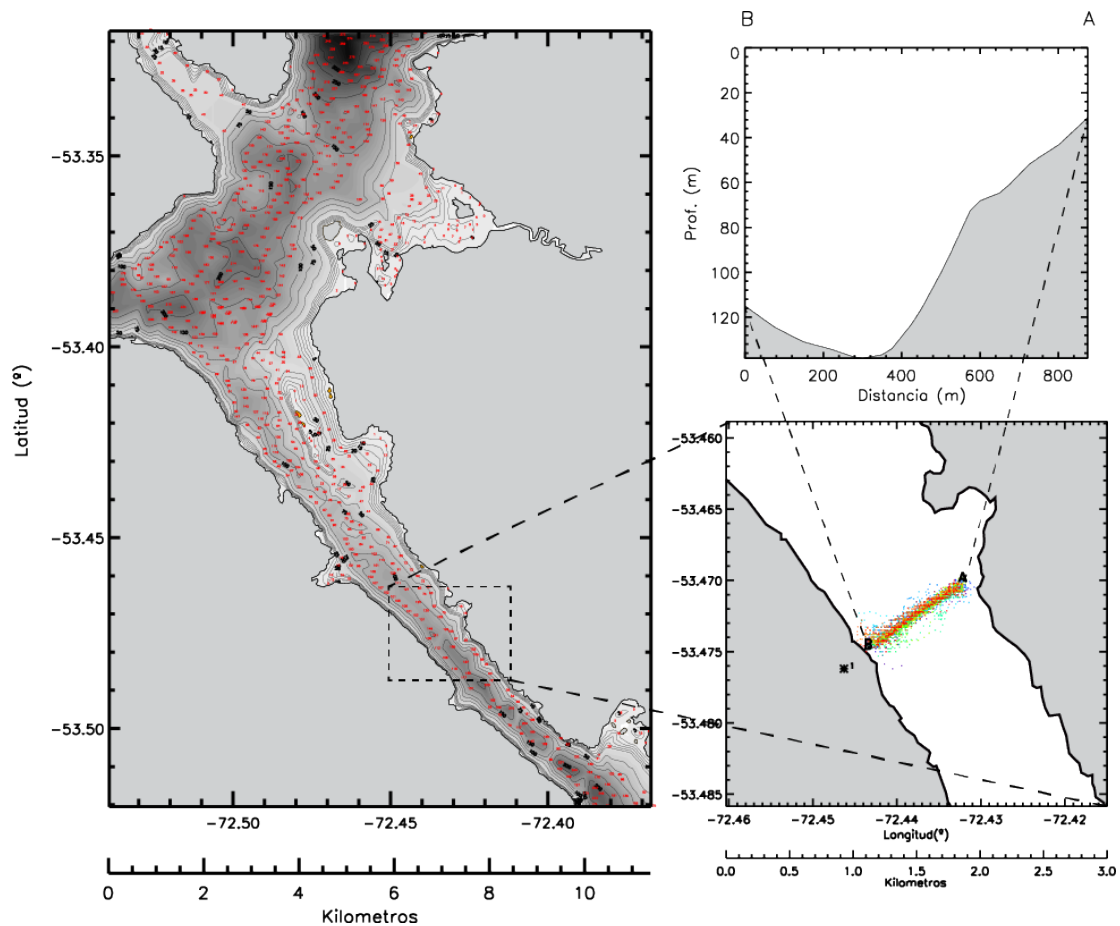


Figura 15: Canal Jerónimo (panel izquierdo), ubicación del transecto de medición (p. derecho inf.) y perfil batimétrico de la sección (p. derecho sup.). Puntos sobre la batimetría en panel izquierdo son la posición de las sondas de profundidad.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.4 FITZROY

Se realizaron 19 repeticiones del circuito mostrado en la Fig. 16, totalizando 24 horas de observaciones a partir de las 10:50 horas. del 17 de febrero del 2012, durante la primera cuadratura del mes. Se utilizaron sólo los datos del transecto 1, transversal a la orientación del canal en el sector norte del circuito. Se instaló el ADCP montado en un brazo metálico ubicado verticalmente en el costado de la L/M “Janito”.

Se obtuvieron perfiles verticales de corrientes promediados cada 30 s y el tamaño de las celdas verticales de velocidad fue de 1 m. La adquisición de datos se realizó en el marco de un proyecto de prospección de datos oceanográficos auspiciado por el Instituto de Fomento Pesquero sede Puerto Montt. Se utilizaron los datos de profundidad máxima de los perfiles de ADCP como entrada de batimetría al modelo. En esta sección se estimaron las velocidades de la amplitudes de la corriente M_2 y K_1 , para evaluar la salida del modelo.

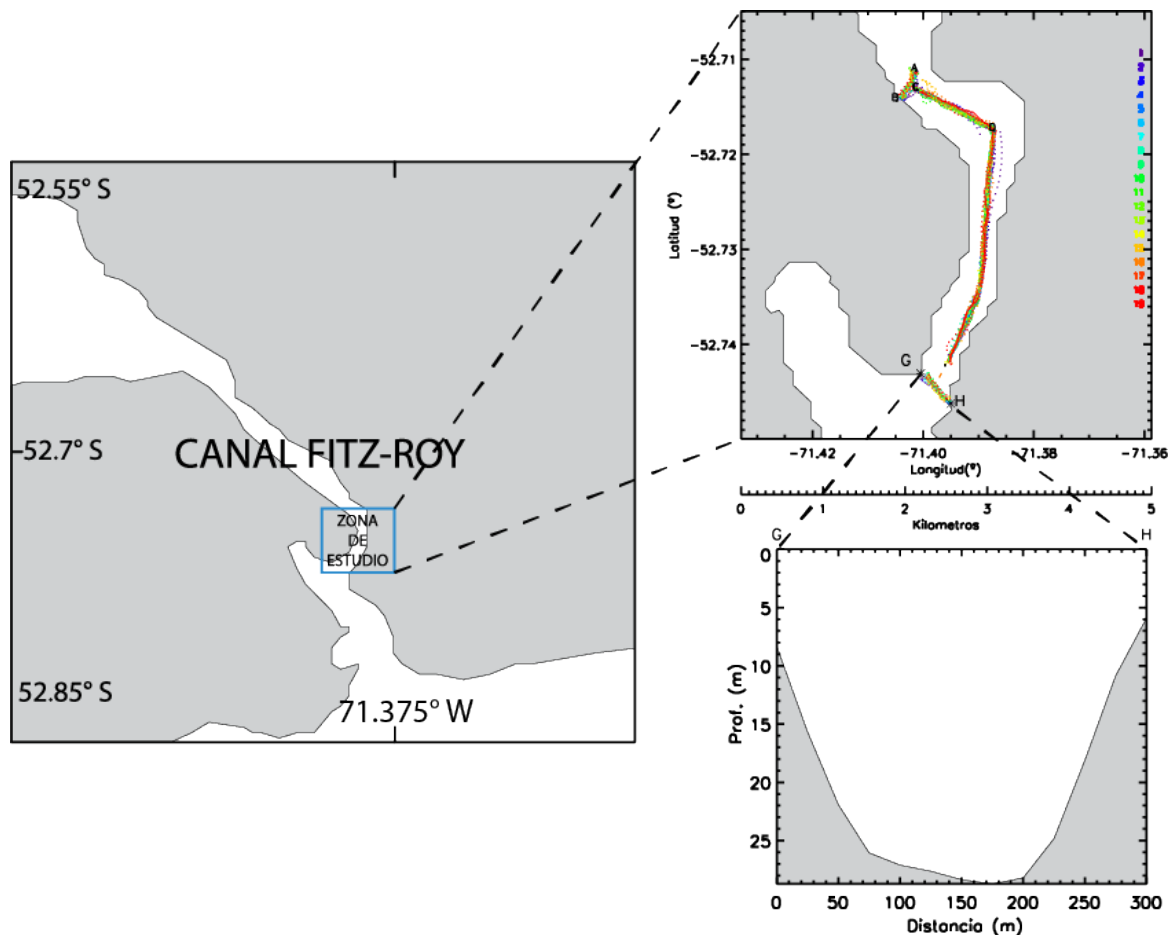


Figura 16: Canal Fitzroy (panel izquierdo), ubicación del transecto de medición (p. derecho sup.) y perfil batimétrico de la sección (panel derecho inf.). Números con asterisco son la numeración de los transectos.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.5 PITIPALENA

Se realizaron 11 repeticiones del circuito mostrado en la Fig. 17, totalizando 24.5 horas de observaciones a partir de las 18:51 horas. del 4 de diciembre del 2005, durante la primera sicigia del mes. Se utilizó un catamarán de 1.2 m de largo, el cual fue remolcado por la LM "Jairo II". Se obtuvieron perfiles verticales de corrientes promediados cada 30 s y el tamaño de las celdas verticales de velocidad fue de 2 m. La adquisición de datos se realizó en el marco de un proyecto FNDR (Fondo Nacional de Desarrollo Regional).

El análisis se concentró en el canal de acceso al estero, en el segmento longitudinal indicado entre 1 y 2 de la Fig. 17. Sobre este segmento se seleccionaron cinco transectos transversales para explorar la respuesta del modelo al contar solo con un perfil vertical de velocidades en la región central del canal. Se utilizaron los datos de velocidades de la amplitud de la corriente M_2 en los perfiles verticales correspondientes a la posición de las cinco secciones para evaluar la salida del modelo.

La batimetría de las secciones transversales fue determinada a partir de la implementación batimétrica del canal mencionado, utilizando la Carta Hidrográfica Electrónica del SHOA N° 7470, Bahía Tictoc a Rada Palena, cuya escala es de 1:50.000. Además, se utilizaron los datos de las profundidades máximas alcanzadas con el ADCP durante la campaña de correntometría. La totalidad de los puntos de sondajes considerados se muestran en la Fig. 17.

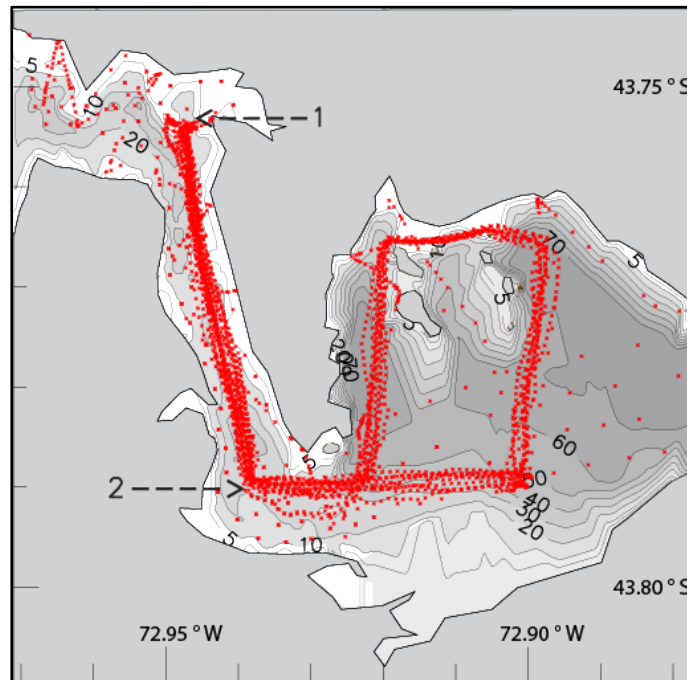


Figura 17: Transectos de correntometría con ADCP en el fiordo Pitipalena

Fuente: Elaboración propia.

Algunos datos de profundidad medido con el ADCP se superpusieron a los de la carta electrónica, por lo que se limpió utilizando el software Global Mapper v12. Con la información batimétrica, se generó una malla de resolución 20x20 m y con ella se seleccionaron cinco

transectos transversales. Utilizando el software Global Mapper v12 se extrajeron los perfiles batimétricos de las secciones de la grilla (Fig. 18).

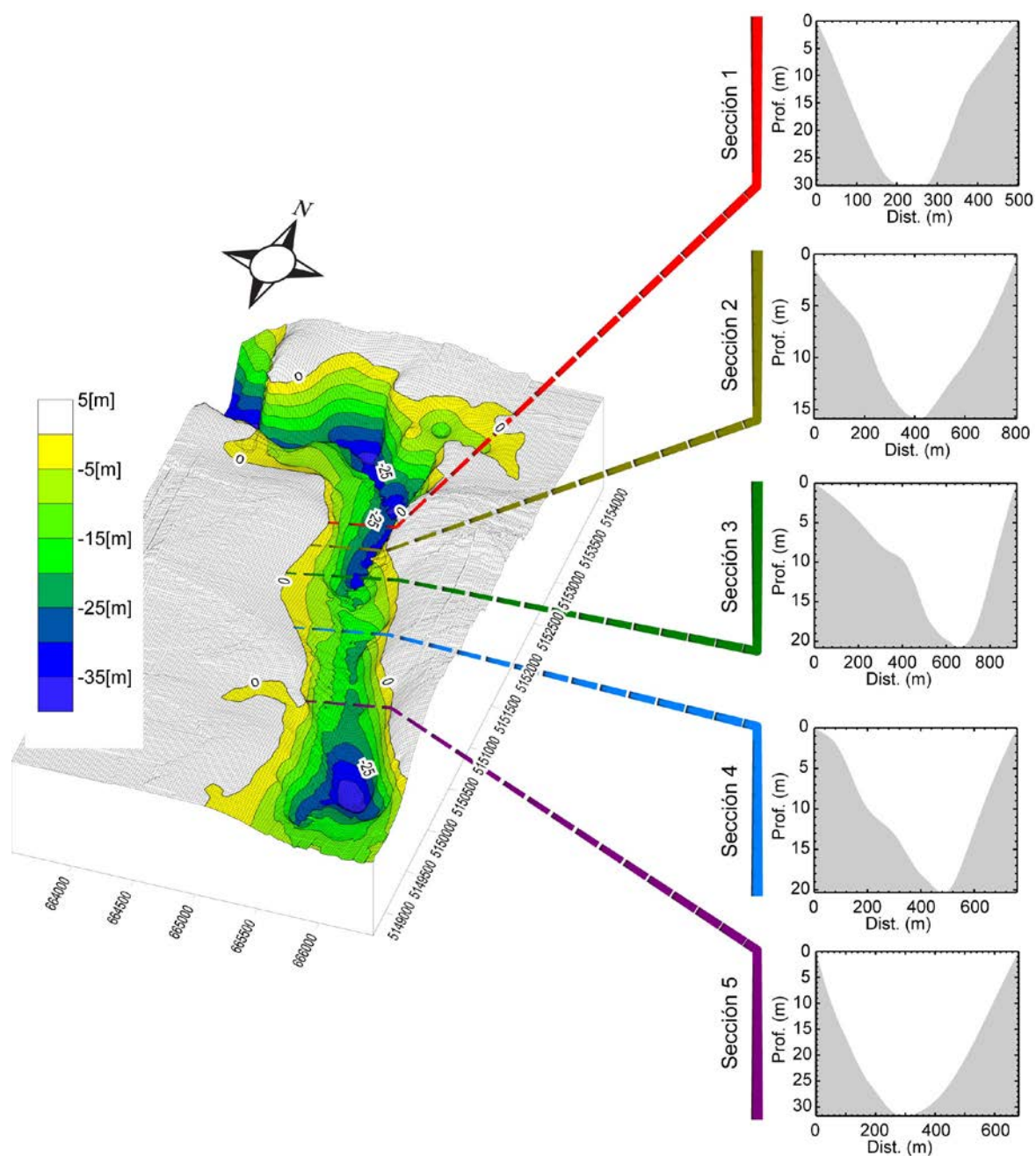


Figura 18: Grilla batimétrica y secciones transversales del canal Pitipalena

Fuente: Elaboración propia.

4.2 APLICACIÓN DEL MODELO

De acuerdo a lo indicado, se contó con mediciones en secciones transversales en cuatro canales (Chacao, Desertores, Jerónimo y Fitzroy) y longitudinal en canal Pitipalena, por lo que el método de simulación de las corrientes de marea fue aplicado con distinto criterio en ambas dimensiones. La solución analítica (10) fue resuelta en IDL (Interactive Data Language) utilizando distintas configuraciones de los parámetros forzantes.

4.2.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO EN MEDICIONES TRANSVERSALES

Se aplicó un análisis de correlación Pearson (R), para establecer el grado de relación lineal entre el modelo y las observaciones. Además se realizó la prueba del error medio cuadrático (RMSE) y el sesgo (BIAS) para verificar las diferencias entre las mediciones y las predicciones del modelo en cada perfil, y saber si las magnitudes de las corrientes están siendo subestimadas o sobreestimadas.

Para el análisis se aisló cada perfil de corriente modelado y observado. De cada configuración de forzantes se retuvieron aquellos resultados cuyos valores de correlación lineal eran mayores a 0.6 (permitiendo valores menores sólo en excepciones presentadas más adelante) para establecer una correlación fuerte y directa entre las mediciones y las predicciones, de este modo el modelo es capaz de explicar que al menos el 60% de los valores sigue la tendencia de las mediciones, por lo que si la velocidad de las corrientes observadas crece de fondo a superficie bajo una condición determinada, así también lo hace el modelo bajo la misma condición. Se considera que el valor de 0,6 establecido representa un umbral inferior de datos aceptable para la validez del método (Evans, 1996). Se estableció como escenario ideal, que el error medio cuadrático no superara el 10% de los mayores valores de corriente medidos en cada canal, por ejemplo, si el valor máximo fue de 2 m/s, el umbral superior de RMSE quedó en 20 cm/s. Luego se calculó el sesgo de la muestra para establecer si el comportamiento del modelo fue subestimar o sobreestimar las velocidades de las corrientes.

Finalmente se emplearon los perfiles que mejores resultados estadístico arrojaron para reestructurar la forma original de la sección transversal modelada, obteniendo un valor de A_z variable transversalmente y que asemeja la solución analítica a las observaciones.

4.2.2 SECCIONES CON MEDICIONES TRANSVERSALES

En el caso de la aplicación en secciones transversales, el modelo requiere como entrada el valor medio de amplitud de corriente M_2 (U_m) y considera la viscosidad turbulenta vertical (A_z) constante en la sección. Con el propósito de obtener modelaciones más cercanas a la realidad, se utilizó un coeficiente de viscosidad turbulento A_z y U_m variables a lo ancho del canal. Se aplicó la solución del modelo (10) en perfiles verticales individuales distribuidos a lo ancho del canal, estimándose valores de A_z y U_m en cada uno de ellos. La determinación de estos valores se realizó en dos etapas. En una primera etapa de aproximación, se estableció un rango de A_z considerando dos criterios: 1) utilizando valores típicos (10^{-4} a 10^{-2} m²/s) en estuarios dominados por la marea (Geyer, 2010) y 2) utilizando valores levemente superiores a los típicos $\sim 10^{-1}$ m²/s, para los casos más energéticos. En el caso de U_m se utilizó el promedio vertical de cada perfil.

En una segunda etapa, se realizaron corridas del modelo en cada perfil obteniéndose valores de R y RMSE para una combinación de rangos de A_z y U_m obtenidos en la primera etapa. El rango de variación de U_m fue entre los promedios máximos y mínimos de todos los perfiles de la sección. Con esta aproximación, se seleccionaron, en diagramas A_z vs U_m aquellos valores donde los contornos de R era máximos y los de RMSE eran mínimos, siendo éstos los utilizados para la corrida final en el perfil. La Fig. 19 muestra un ejemplo de los contornos de R y RMSE para rangos iguales de A_z y U_m de uno de los perfiles de Canal Chacao, donde finalmente se seleccionó el valor de $A_z = 0,07 \text{ m}^2/\text{s}$ y $U_m = 2,6 \text{ m/s}$.

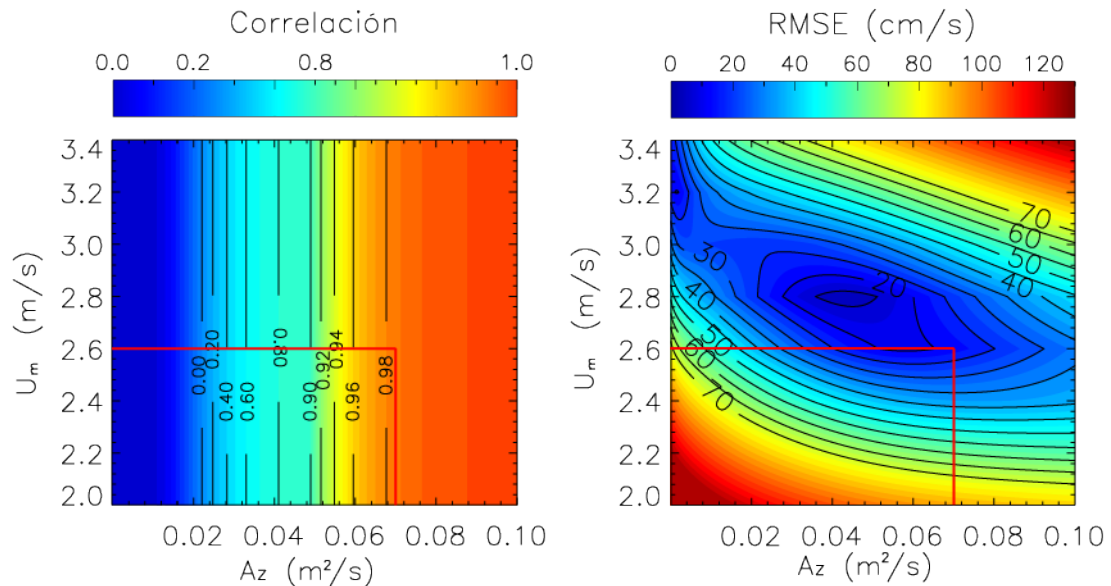


Figura 19: Contornos de correlación R y RMSE en corridas del modelo dentro de rangos de variación de A_z y U_m , del perfil central del lado norte de Canal Chacao. Los intervalos de R son 0.2 para $R < 0.9$ y de 0.02 para $R > 0.9$

Fuente: Elaboración propia.

Una comparación de las velocidades utilizadas en el modelo (U) y las velocidades medias en cada perfil (U_{mp}) se muestran en la Fig. 20. Los valores de resumen utilizados en la modelación se muestran en la Tabla 1.

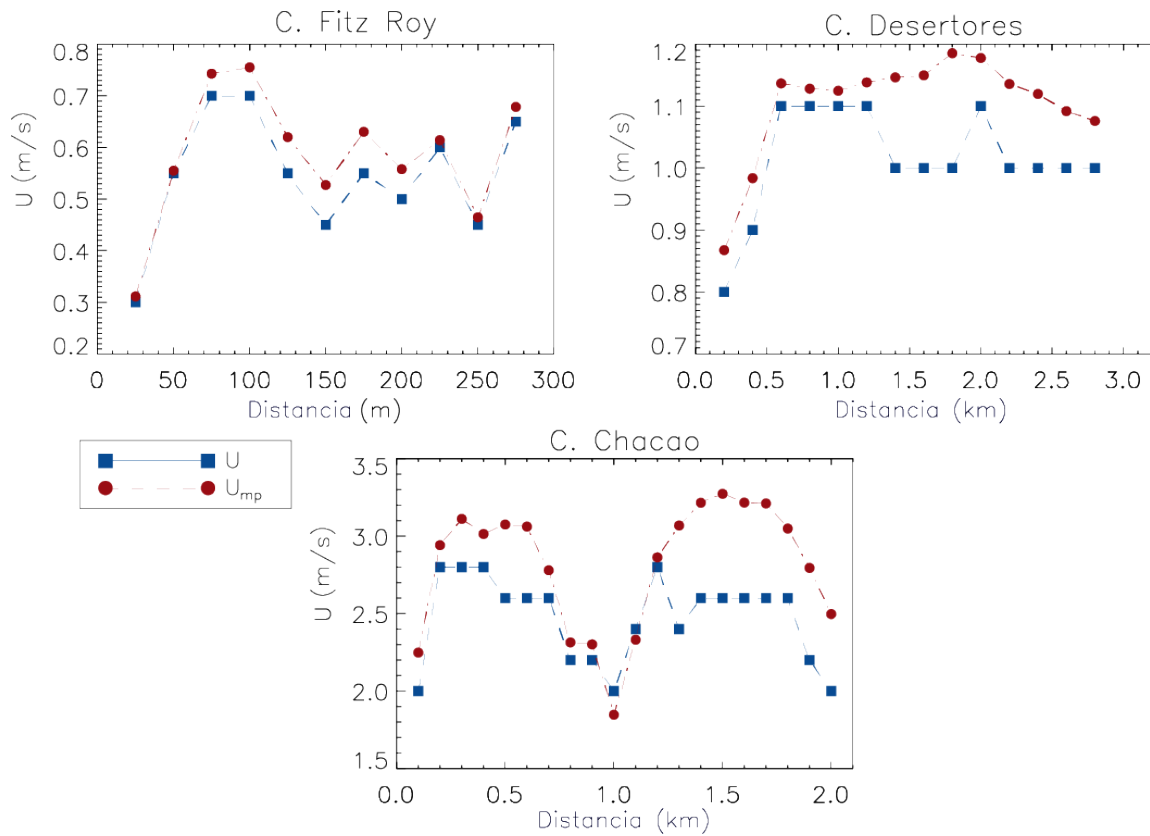


Figura 20: Velocidades del modelo y velocidades referenciales promedio de cada perfil (U_{mp})

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1: Resumen de características de las secciones y parámetros en caso transversal

Parámetro		Desertores (1 / 2)	Chacao	Jerónimo	Fitzroy (M_2/K_1)
Ancho sección	B	3.2 Km / 3 Km	2.1 Km	875 m	300 m
Ampl. Media Vert.	U_m (m/s)	1	2.8	1.7	0.6 / 0.5
Rango Amplitud*	U (m/s)	0.8-1.1	2-3.4	1.6-1.9	0.3-0.7 / 0.4-0.6
Prof. Máx	$H_{máx}$ (m)	158 / 161	100	138	28
Armónico	ω	M_2	M_2	M_2	M_2 / K_1
Nro. Col. observ.	-	17/16	22	36	13
Resolución H	dy (m)	200	100	25	25
Prof. Máx obs.	(m)	96 / 101	80	40	23
Viscosidad turbulenta vert.	A_z (m^2/s)	$0.2 \cdot 10^{-1} - 1.1 \cdot 10^{-1}$	$0.1 \cdot 10^{-2} -$	$0.2 \cdot 10^{-2} -$	$0.1 \cdot 10^{-3} - 8 \cdot 10^{-3}$
		$0.45 \cdot 10^{-1} - 1.0 \cdot 10^{-1}$	$8.8 \cdot 10^{-2}$	$5.9 \cdot 10^{-2}$	$0.1 \cdot 10^{-3} - 5.1 \cdot 10^{-3}$

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.1 Desertoires

En canal Desertoires se contó con 2 secciones (Fig. 21). En la primera (Fig. 13) se establecieron 17 perfiles con una resolución horizontal de 200 m y vertical de 1 m, el ancho total es de 3.2 km y la máxima profundidad de los datos de corriente fue a los 96 m. Para la segunda sección (D-C) fueron 16 perfiles con una resolución horizontal de 200 m y vertical de 1 m, el ancho total es de 3.0 km y la máxima profundidad disponible para los datos fue de 101 m.

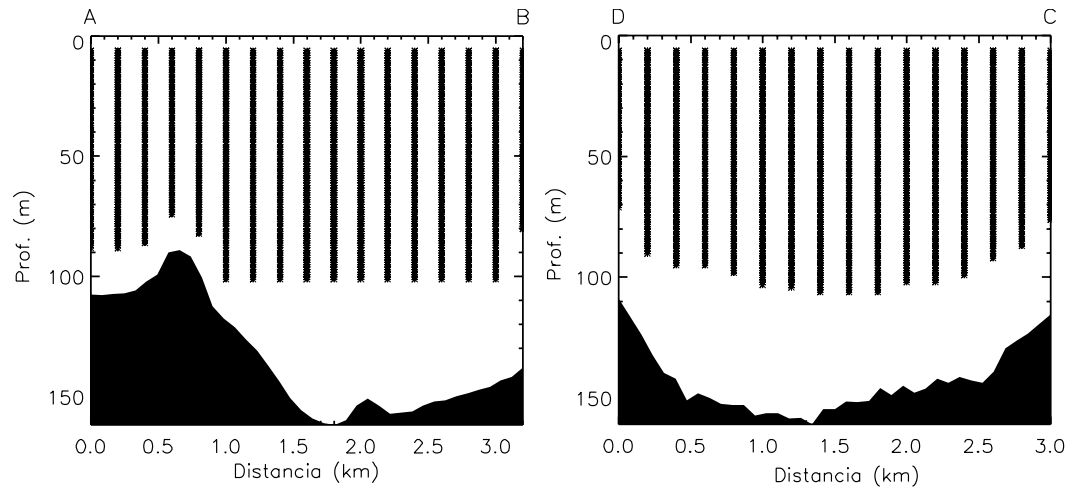


Figura 21: Perfiles de datos en Desertoires

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.2 Chacao

En canal Chacao se establecieron 22 perfiles de observación, cuyo espaciamento fue cada 100 m, cubriendo un total de 2.1 km de sección transversal y cada 1 m de un total de 80 m en la vertical (Fig. 22).

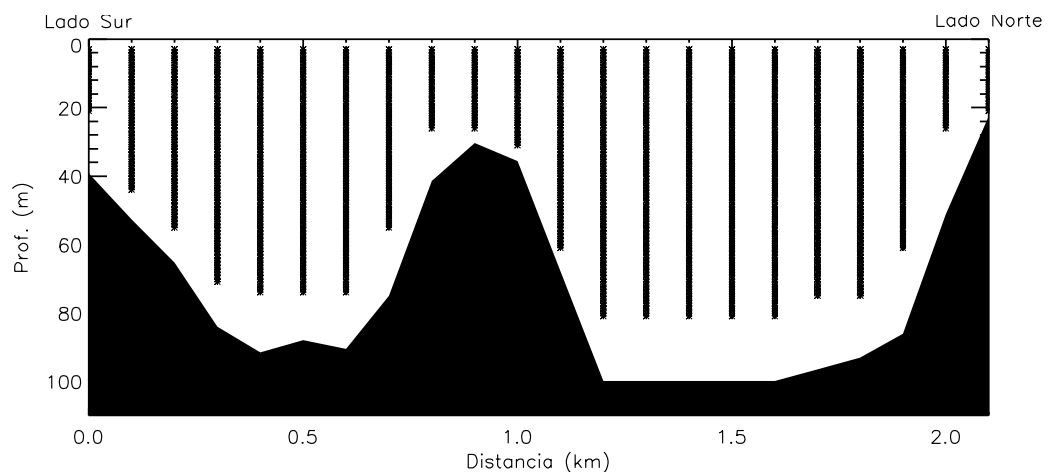


Figura 22: Perfiles de datos en C. Chacao

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.3 Jerónimo

El mismo procedimiento fue replicado en canal Jerónimo donde se establecieron 36 perfiles de velocidad. La resolución horizontal fue aproximadamente de 25 m de un total de 875 m y la vertical cada 1 m de un total de 40 m (Fig. 23). Las mediciones en canal jerónimo presentaron ruido en gran parte de la data, que podría estar asociado a la dificultad de medición en transectos transversales en canales con corrientes superficiales rápidas. La estabilidad de la embarcación durante las mediciones es esencial y es muy probable que la nave haya zigzageado en reiteradas oportunidades o desviado su curso del transecto, entorpeciendo el sondeo del ADCP. Por lo que la profundidad máxima representada es la ya mencionada.

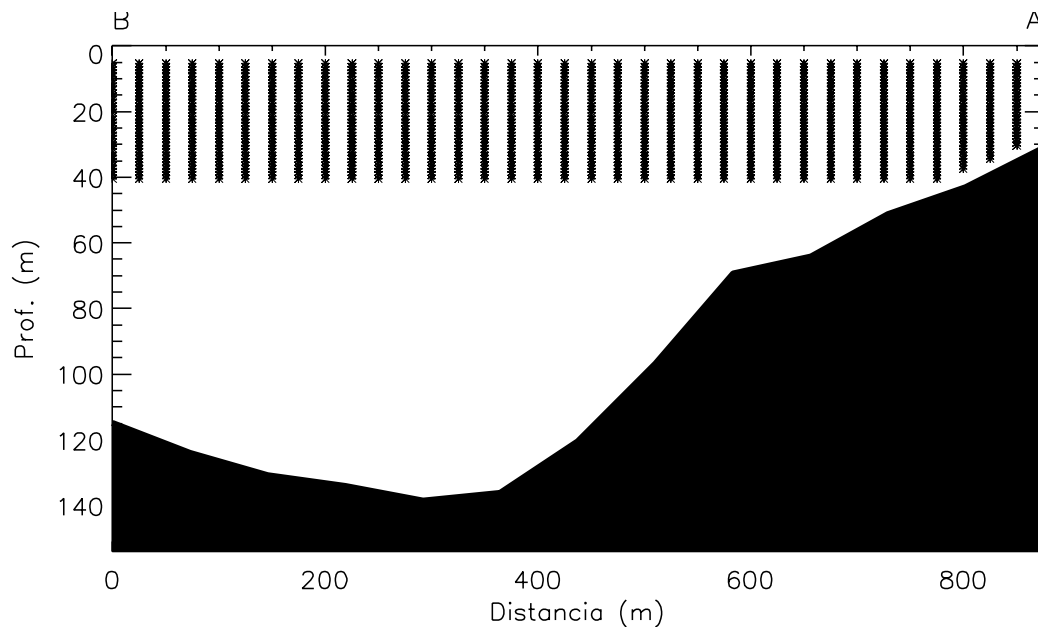


Figura 23: Perfiles de medición Jerónimo

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.4 Fitzroy

En el canal Fitzroy se consideraron 13 perfiles, la resolución horizontal es de 25 m y un ancho máximo de 300 m. La resolución vertical es de 1 m con una profundidad máxima de 23 m (Fig. 24). Además se simularon dos casos, uno fue utilizando la frecuencia lunar semidiurna (M_2) y el otro con la lunisolar diurna (K_1), debido a que las observaciones de ambas componentes poseen un rango de amplitud similar.

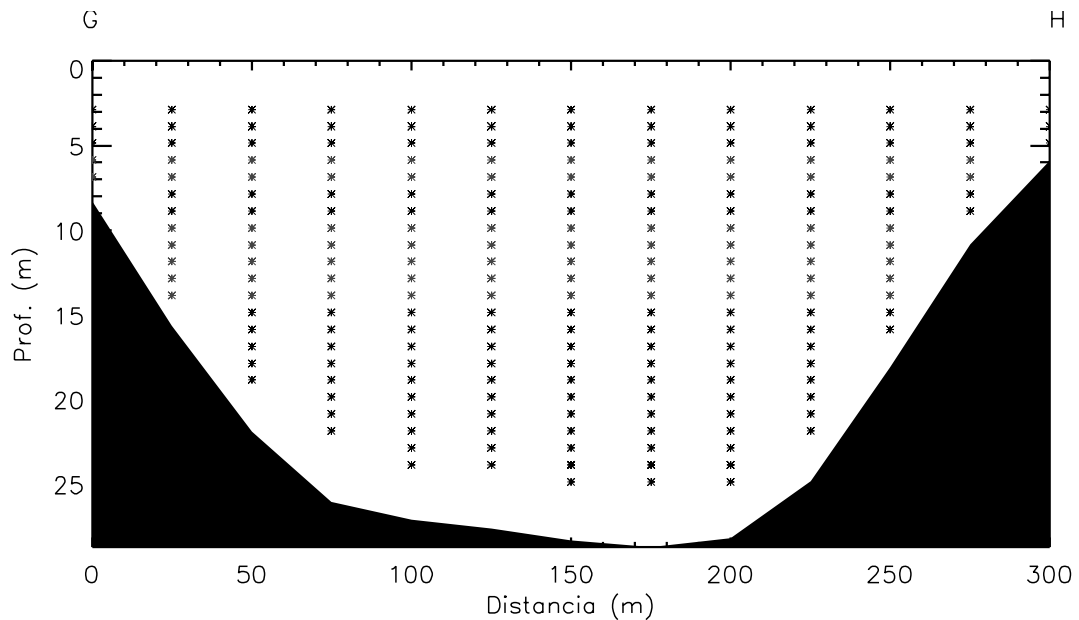


Figura 24: Perfiles de medición Fitzroy

Fuente: Elaboración propia.

En los resultados del modelo se replicó el procedimiento de extracción de igual número de datos, para obtener observaciones comparables entre ambas fuentes.

4.2.3 CASO PITIPALENA CON MEDICIÓN LONGITUDINAL

Como ya se ha mencionado, en el estero Pitipalena sólo cuenta con mediciones en un transecto longitudinal del canal, esto implica que los perfiles de corriente sólo se tienen a lo largo del mismo. Utilizando el software Global Mapper v12, se posicionó el transecto longitudinal georeferenciado sobre la grilla batimétrica y se superpusieron las secciones transversales (georeferenciadas) (Fig. 25) establecidas en el punto 4.1.5 (Fig. 18).

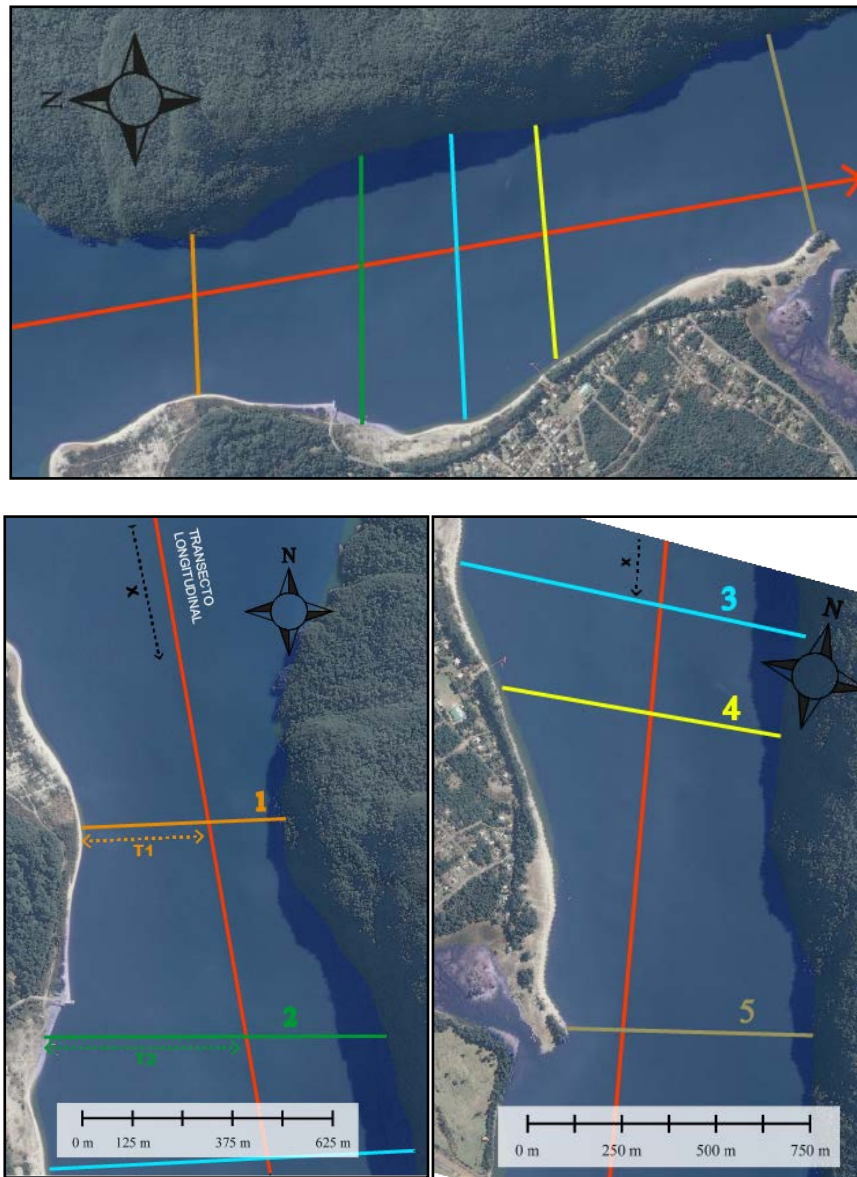


Figura 25: Sección longitudinal y transversales en Pitipalena
Fuente: Elaboración propia.

Las distancias longitudinal y transversal fueron medidas, de N-S y W-E, respectivamente. A través de un código de programación se extrajo el perfil de corriente en los puntos de intersección del transecto longitudinal con las secciones transversales. Es necesario señalar que en las secciones 3 y 4 (Fig. 26 (c)-(d)) las mediciones no alcanzaron la profundidad máxima por contaminación de los datos con rebotes del fondo. Además, las mediciones se evalúan desde los 3 m hasta el fondo para evitar la capa superficial de agua menos densa proveniente de los ríos cercanos.

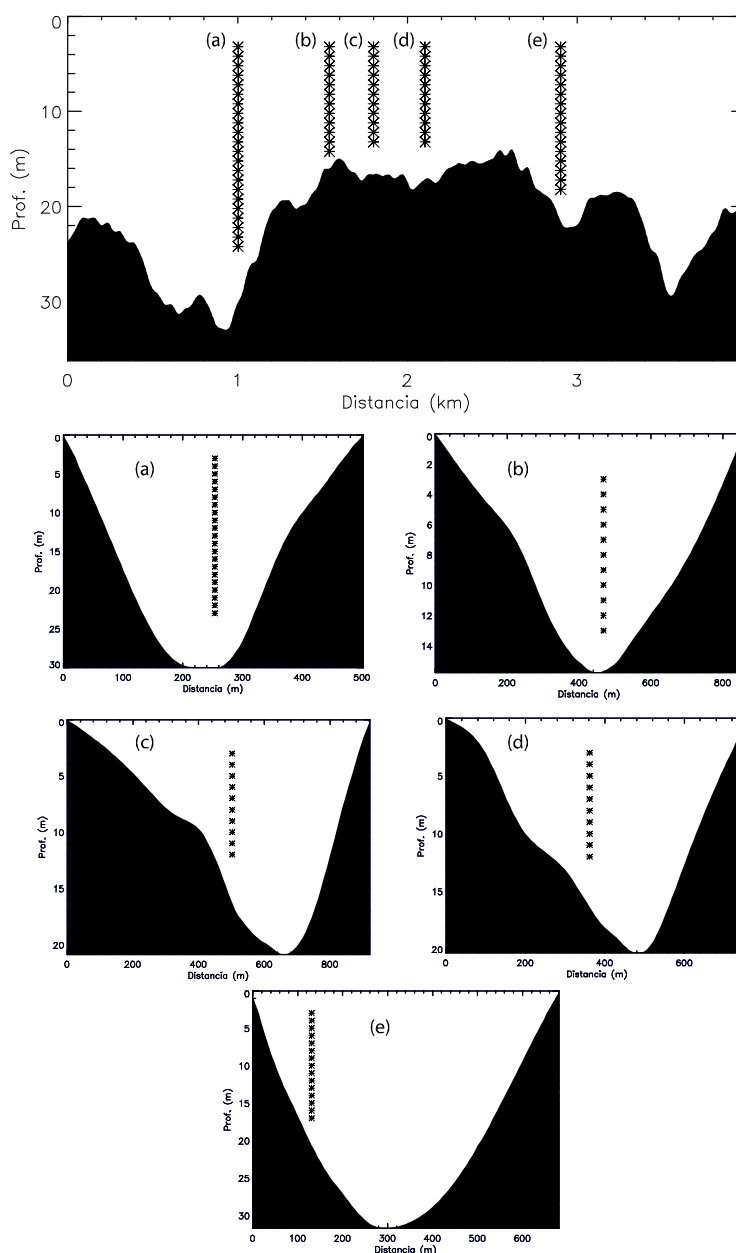


Figura 26: Perfiles verticales de modelación sobre la sección longitudinal de canal Pitipalena (panel superior). (a) Sección 1; (b) Sección 2; (c) Sección 3; (d) Sección 4; (e) Sección 5

Fuente: Elaboración propia.

Para forzar el modelo se utilizó un valor de corriente promediado en la vertical de $U = 0.7$ m/s. El coeficiente de viscosidad turbulenta vertical A_z , se parametrizó usando la formulación de Munk & Anderson, 1948:

$$A_z = A_0(1 + 10Ri)^{-1/2}.$$

Bowden *et al.* (1959), establecieron que el coeficiente A_0 de la viscosidad turbulenta, en ausencia de estratificación está dado por:

$$A_0 = 2.5 * 10^{-3} U H_0$$

Donde U es la velocidad de la corriente y H_0 es la mitad de la profundidad promedio. El número de Richardson (Ri) se considera como:

$$Ri = g(\Delta\rho/\rho_0) H_0/U^2$$

Donde $\Delta\rho$ es la diferencia de densidad típica entre el fondo y la superficie (Dyer, 1973). Se obtuvieron valores estimados de Ri y A_z constantes en la vertical para las secciones. Las características de las secciones se presentan en la tabla 2.

Tabla 2: Resumen parámetros Pitipalena

Parámetro	Símbolo	Sec. 1	Sec. 2	Sec. 3	Sec. 4	Sec. 5
Mitad de prof. media	H_0 (m)	7.5	3.75	5	5	10
Dens. de referencia	ρ_0 (kg/m ³)	1020	-	-	-	-
Delta dens. 3m-fondo	$\Delta\rho$ (kg/m ³)	1	-	-	-	-
Ancho sección	B (m)	500	857	921	761	681
Amplitud corr. media	U (m/s)	0.7	-	-	-	-
Prof. Máx	$H_{\text{máx}}$ (m)	30	15	20	20	31
Nro. Col. observ.	-	1	-	-	-	-
Resolución Vert.	-	1 m	-	-	-	-
Prof. Máx observ.	-	24 m	13 m	11 m	12 m	20 m

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se realizó el análisis estadístico mencionado en 4.2.1.5 para evaluar el ajuste de la configuración.

4.3 POTENCIA DE ENERGÍA Y ANÁLISIS PARA LA EXTRACCIÓN

A partir de los flujos de la M_2 obtenidos con el modelo analítico, se aplicó la ecuación (14) para calcular la potencia energética disponible por unidad de área en todas las secciones. Además, se calculó la potencia promedio por perfil para conocer las zonas que concentran mayor energía.

En Pitipalena se establecieron entre 10 y 20 valores de energía por sección, los que se promediaron en la vertical (número de valores varió por el ancho máximo de las 5 secciones). Los valores se georeferenciaron equidistantes (cada ~40 m) modificando los archivos .xyz generados para la Fig. 18. Reemplazando sondas por los valores de energía, se generó un mapa energético interpolando los valores sobre toda la planta del canal.

5 RESULTADOS

5.1 CANAL DESERTORES

5.1.1 COMPARACIÓN OBSERVACIONES-MODELO SECCIÓN 1 (S1)

La distribución de la magnitud de corriente de marea por M_2 observada se muestra en la Fig. 27(a). Las mayores velocidades (~120 cm/s) se concentran en el sector central de la sección y se atenúan hacia los costados y el fondo, lo que sugiere efectos friccionales del fondo. Además, las velocidades decrecen hacia la superficie por factores que se discuten con mayor profundidad en la sección 6. La estructura transversal del modelo (Fig. 27(c)) reproduce razonablemente las observaciones, mostrando velocidades comparables (110~120 cm/s) en la zona central de la columna de agua, con excepción de la región superficial, donde el modelo sobreestima las velocidades. Las velocidades de las corrientes en los extremos de la sección en el modelo están dentro del rango de las observaciones observado (~70 – 110 cm/s). La atenuación de velocidad hacia el fondo no se replica correctamente en la zona más profunda, lo que induce los mayores errores en la magnitud de las corrientes del modelo.

La atenuación del flujo en los costados de la sección muestra relación con los valores de A_z . El lado derecho en la zona más profunda tiene un valor de viscosidad turbulenta promedio de $\sim 5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$, mientras que el lado izquierdo en toda la columna alcanza $2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ (Fig. 27 (b)). En general, el coeficiente de viscosidad turbulenta A_z estuvo en un rango de $2 \cdot 10^{-2} - 1.1 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ y los mayores índices de A_z se obtuvieron en el centro de la sección, donde se concentran las mayores velocidades y se alcanza la mayor profundidad.

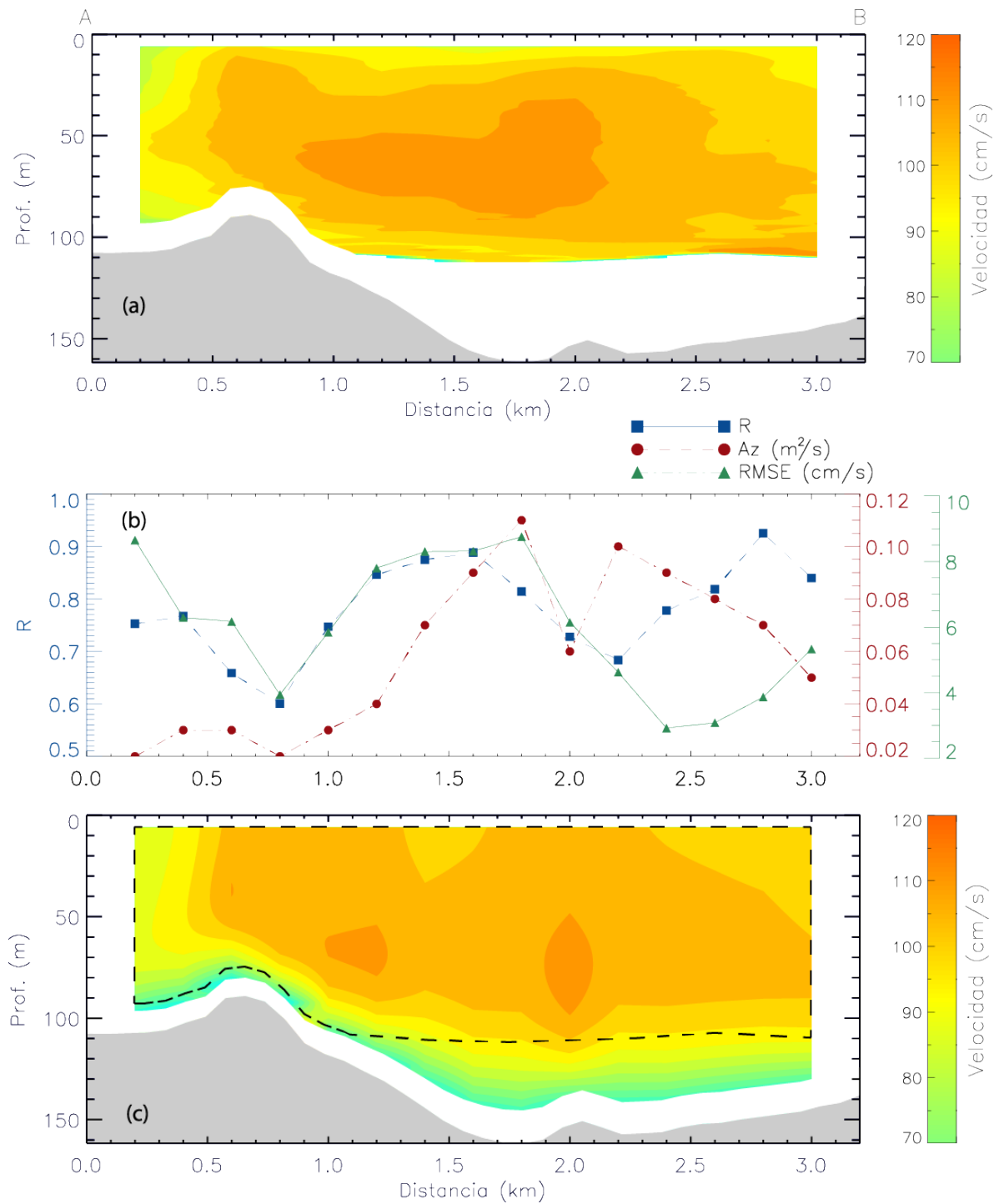


Figura 27: (a) Observaciones de la amplitud de la corriente de marea M_2 en canal Desertores S1. (b) Variabilidad transversal de R , A_z y RMS en la sección. (c) Solución analítica en Desertores S1. Línea segmentada es el dominio de las observaciones.
Fuente: Elaboración propia.

5.1.2 PARÁMETROS ESTADÍSTICOS SECCIÓN 1

Los valores mínimos y máximos de correlación obtenidos fueron de ~ 0.6 y ~ 0.93 , respectivamente (Fig. 28). Aproximadamente dos tercios de la sección tienen un valor sobre 0.75 y los valores más bajos se ubicaron sobre los montículos submarinos que se aprecian en la Fig. 27 (b), lo que sugiere que las variaciones bruscas del fondo afectan al modelo. El error medio cuadrático tuvo un rango de 2 – 9 cm/s y los máximos valores se ubicaron en el centro de la sección.

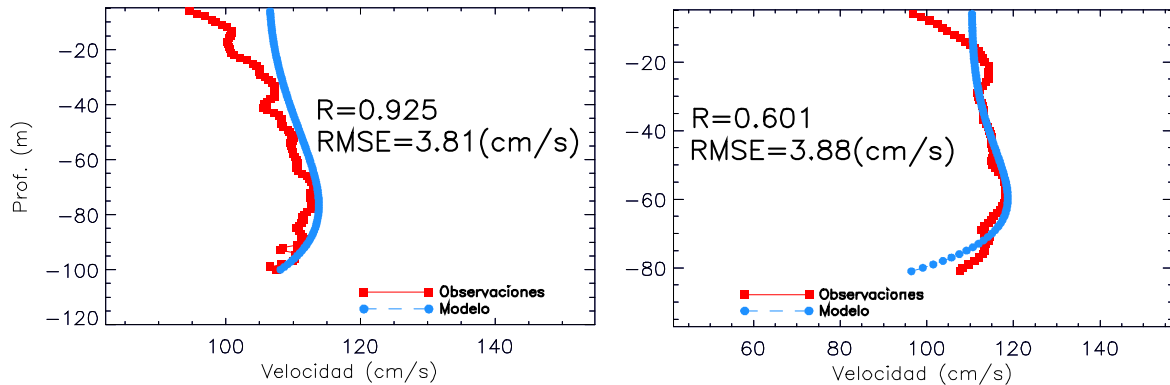


Figura 28: Comparación de perfiles de corriente con alta y baja correlación (R) en Desertores S1

Fuente: Elaboración propia.

5.1.3 COMPARACIÓN OBSERVACIONES-MODELO SECCIÓN 2 (S2)

La Fig. 29 muestra que las mayores velocidades también se concentran en la zona central de la sección, situación esperable considerando que el flujo observado es similar al de la sección 1. Sin embargo, en el sector derecho se observan mayores velocidades (~ 120 cm/s) en profundidades medias, que las observadas en la sección 1, lo que puede atribuirse al aumento de velocidades en la capa superficial por efecto la descarga del río Blanco frente a esta sección. Hay sobreestimación de las velocidades del modelo en superficie, al igual que en la sección 1. El modelo representa bien las mayores velocidades en la zona derecha, no obstante, los mayores errores en la magnitud del flujo están en las zonas más aceleradas (Fig. 29 (b)). A_z estuvo en un rango similar a la sección anterior, lo que es esperable considerando que los flujos en ambas secciones poseen magnitudes y comportamientos que se asemejan. Sin embargo, la variabilidad del fondo induce diferencias. Los valores de A_z (Fig. 29 (b)) se incrementan en las zonas profundas, donde las variaciones de velocidad en la columna de agua son evidentes ($8 \cdot 10^{-2} \sim 1.1 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$) y decrecen hacia zonas someras donde los flujos no varían demasiado en la vertical ($< 6 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$).

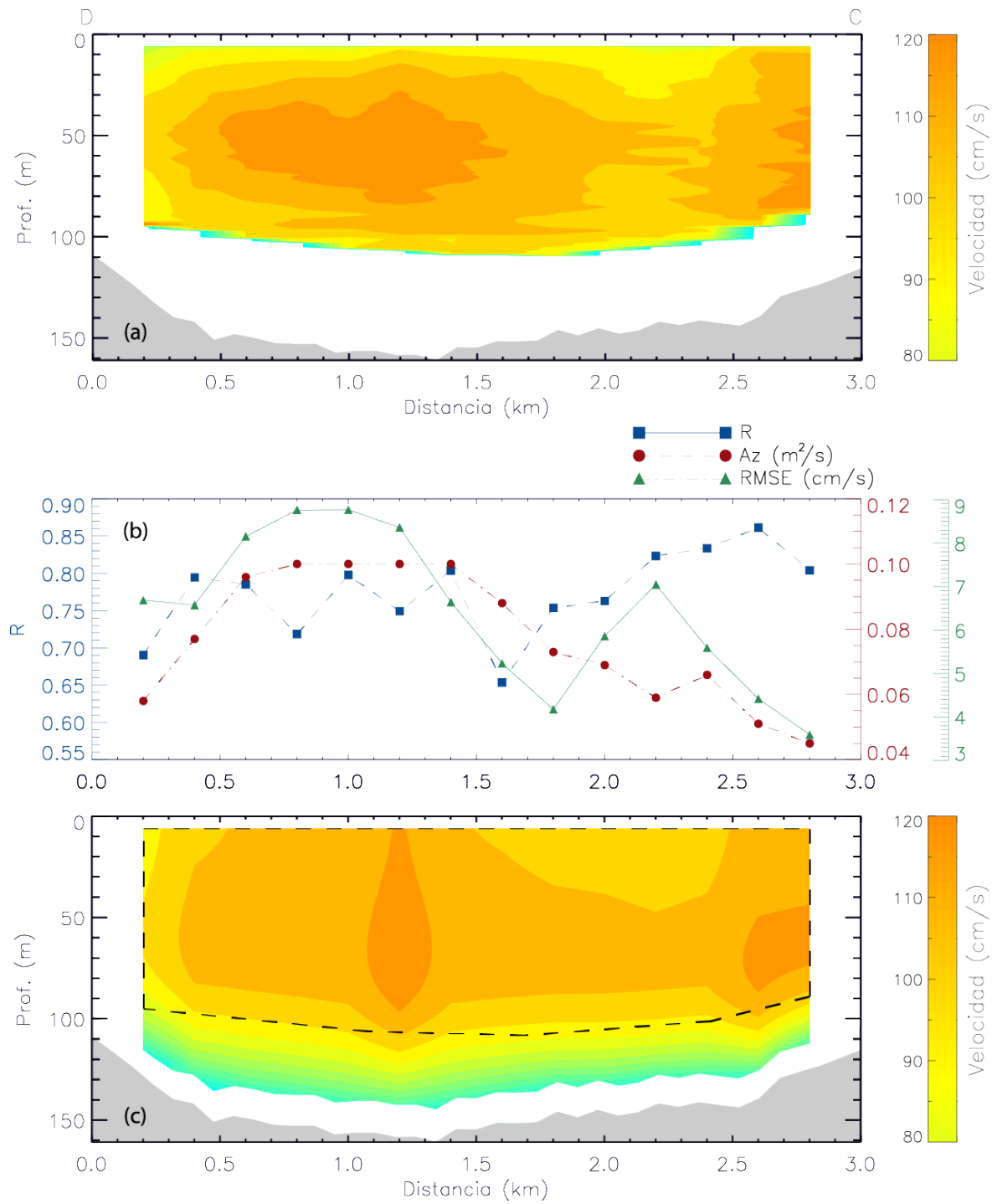


Figura 29: (a) Observaciones de la amplitud de la corriente de marea M_2 en canal Desertores S2. (b) Variabilidad transversal de R , A_z y $RMSE$ en la sección. (c) Solución analítica en Desertores S2. Línea segmentada es el dominio de las observaciones.
Fuente: Elaboración propia.

5.1.4 PARÁMETROS ESTADÍSTICOS SECCIÓN 2

El comportamiento del modelo posee una similitud con las observaciones incluso en los menores valores de R (Fig. 30). El rango fue entre ~ 0.65 y ~ 0.86 . Los mejores ajustes coinciden con las menores diferencias en la magnitud entre la columna de agua observada y modelada, principalmente en la zona derecha. La mayor parte de los perfiles tiene un buen ajuste ($R > 0.75$). El error medio cuadrático tuvo un rango de $2 - 9$ cm/s (Fig. 29(c)), las mayores discrepancias ($RMSE > 5$ cm/s) ocurrieron en el sector centro hacia la izquierda de la figura, ya que ocurre algo similar a la sección anterior, las mayores velocidades se concentran en un área mayor en las observaciones.

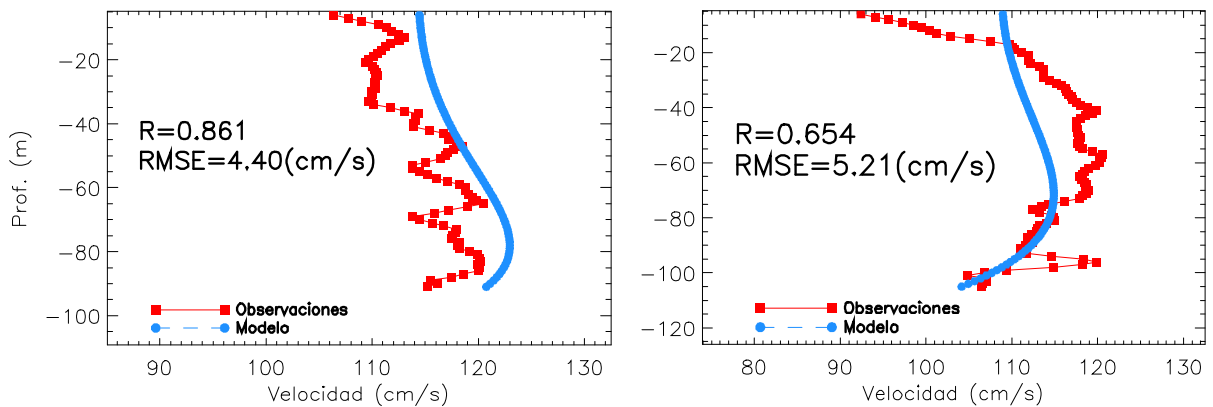


Figura 30: Comparación de perfiles de corriente con alta y baja correlación (R) en Desertores S2

Fuente: Elaboración propia.

5.2 CANAL CHACAO

5.2.1 COMPARACIÓN OBSERVACIONES Y MODELO

La distribución de las amplitudes de la componente M_2 de la corriente de marea observada en el canal Chacao se muestra en la Fig. 31 (a). Destacan patrones transversales diferentes entre el sector norte y sur. En el canal del lado norte se aprecia una distribución de corrientes con mayores velocidades en el centro y en la superficie (~ 3.4 m/s), decreciendo hacia el fondo y sectores someros. En el canal del lado sur las mayores velocidades se concentran en la mitad de la columna de agua de la parte central (~ 3.2 m/s) y no en superficie, lo que se puede deber a una mayor influencia de los armónicos de origen no lineal de aguas someras M_4 - M_6 (Cáceres *et al.*, 2003) o por presencia de vórtices. El comportamiento del lado norte es bien replicado en el modelo Fig. 31(c), con velocidades levemente sobreestimadas a las observadas, cercanas a la superficie (~ 3.5 m/s). Los mayores errores (RMSE) ocurren debido a que en el modelo las velocidades decrecen abruptamente cerca del fondo, mientras que en las observaciones éstas tienden a mantenerse en valores similares a igual profundidad (Fig. 31 (b)). El modelo en el lado sur replica bien las dos zonas de mayor velocidad, con una leve subestimación en el centro de éstas, además, las velocidades cercanas al fondo también se aprecian disminuidas. A_z alcanzó los valores máximos en el lado derecho ($\sim 7 \cdot 10^{-2}$ m²/s), donde el patrón de corrientes se asemeja entre observación y modelo (comportamiento fuertemente influenciado por la fricción de fondo) (Fig. 31 (b)). En cambio, en el lado izquierdo los valores de A_z son menores $\sim 4 \cdot 10^{-2}$ (m²/s), generando que los flujos no varíen drásticamente en la vertical, y manteniendo las mayores velocidades a la mitad de la profundidad.

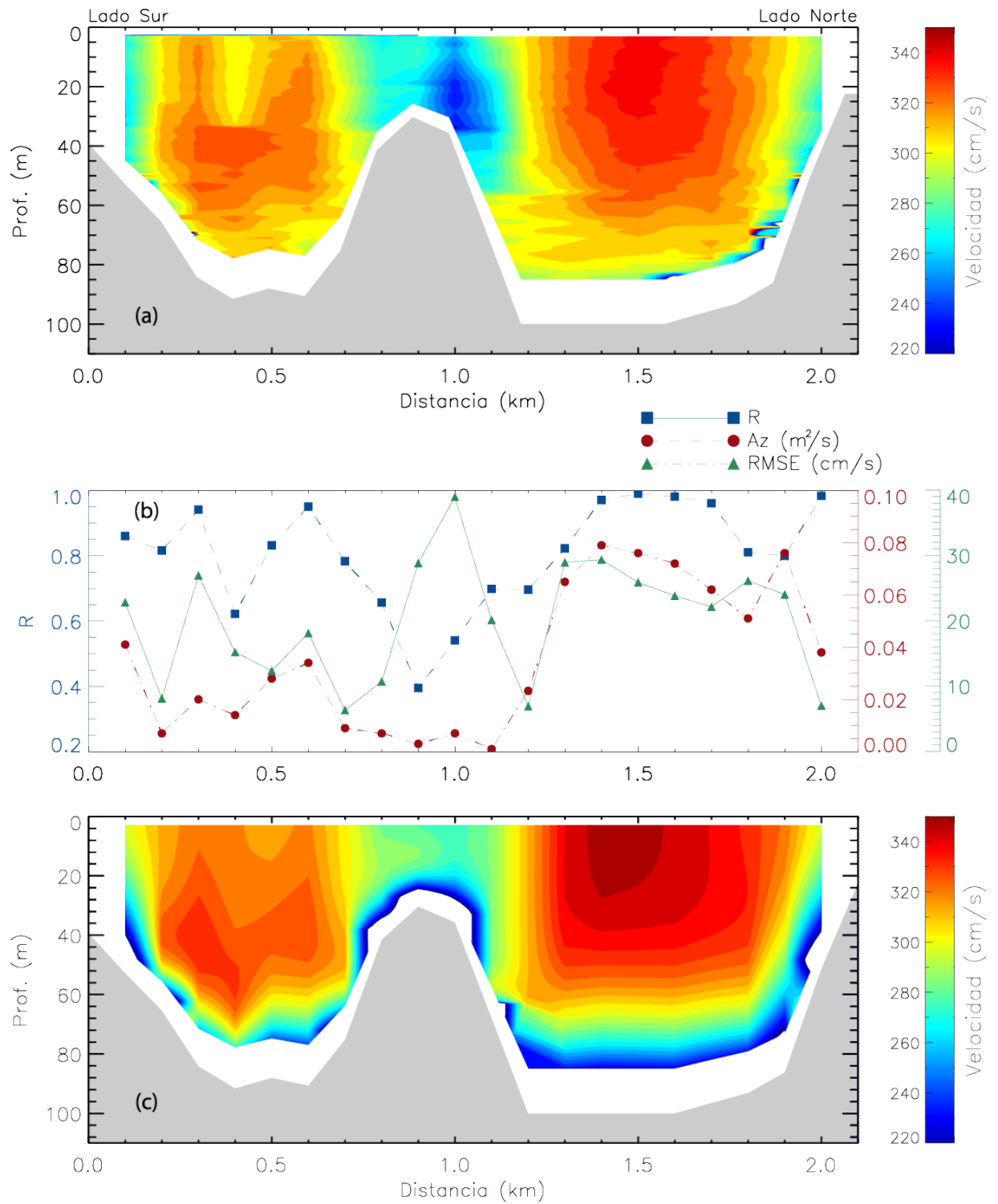


Figura 31: (a) Observaciones de la amplitud de la corriente de marea M_2 en C. Chacao (b) Variabilidad transversal de R , A_z y $RMSE$ en la sección. (c) Solución analítica en C. Chacao.

Fuente: Elaboración parcial propia – Cáceres et al., 2003

5.2.2 PARÁMETROS ESTADÍSTICOS

Los perfiles modelados poseen gran similitud con los observados (Fig. 32). Para altos valores de $R \sim 0.95$ (Fig. 32, panel izquierdo), el modelo reproduce aceptablemente el comportamiento de las corrientes en el perfil vertical, observándose las mayores diferencias bajo los 65 m. Sobre la Roca Remolinos se obtuvieron los menores valores del análisis $R \sim 0.4$ (Fig. 32, panel derecho), evidenciándose que la fuerte variación vertical de las observaciones no es bien representada en este sector por el modelo. Los menores errores del modelo se presentan en el lado sur (10 cm/s $\sim$ 25 cm/s), donde la amplitud simulada adquiere valores cercanos los observados en toda la columna (Fig. 31 (c)). En el lado norte los errores crecen a rangos entre los 20 y $\sim$ 25 cm/s. El mayor error se encontró en Roca Remolinos ($\sim$ 40 cm/s). En todos los casos los mayores errores son atribuidos a la subestimación que hace el modelo en las regiones cercanas al fondo.

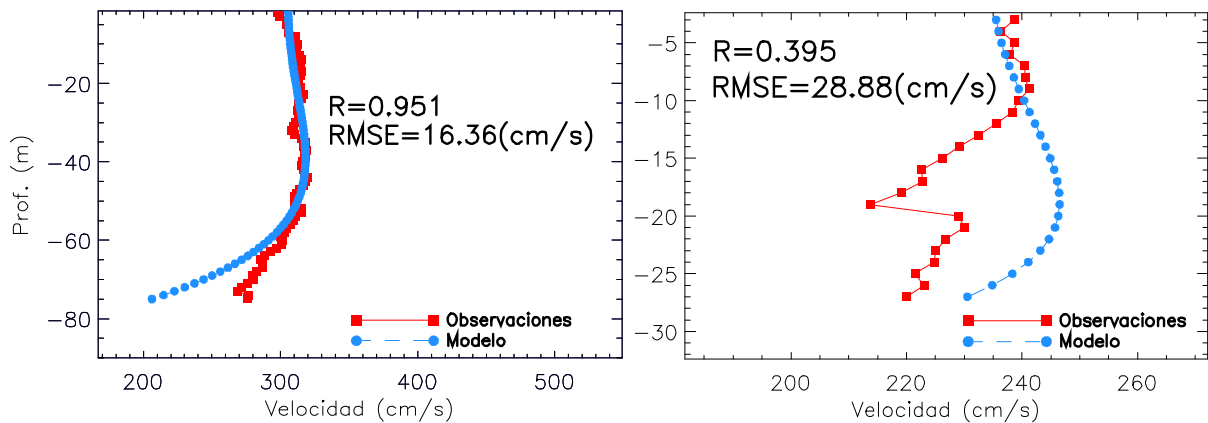


Figura 32: Comparación de perfiles de corriente con alta y baja correlación (R) en Canal Chacao

Fuente: Elaboración propia.

5.3 CANAL FITZROY

Debido a que en este canal adquiere importancia relativa la amplitud de la componente armónica K_1 , se presentan los resultados para ambas componentes armónicas M_2 y K_1 .

5.3.1 COMPARACIÓN OBSERVACIONES Y MODELO M_2

Se presentan patrones de corriente relativamente similares entre los lados del canal, con dos zonas donde las velocidades son mayores (~ 80 cm/s). En los costados y en el centro se atenúa (~ 50 cm/s) (Fig. 34 (c)). El modelo representa bien los valores en el centro del canal, replicando el comportamiento en la columna de agua. Los valores de A_z presentan un máximo en la región central ($\sim 8 \cdot 10^{-3}$ m²/s), y disminuye hacia los costados (Fig. 34 (b)). Un comportamiento similar se observa en los errores RMSE. Las variaciones de los cizalles del flujo son relativamente más importantes en la dimensión horizontal que en la vertical.

5.3.2 PARÁMETROS ESTADÍSTICOS M_2

Las correlaciones R en su mayoría superan 0.65, con un máximo de 0.91 (Fig. 33) obtenido en el centro del canal. Dos valores no superan el umbral establecido, estos se obtuvieron en el lado izquierdo de la sección, donde el cizalle vertical del flujo no es bien representado por el modelo ($R = 0.15 \sim 0.4$). Los mayores errores se obtuvieron en el centro de la sección (~ 7 cm/s) y el lado izquierdo (~ 10 cm/s). Cabe destacar que incluso la menor correlación alcanzada por el modelo, capta el comportamiento que poco varía en la vertical, con velocidades de entre 50~60 cm/s (Fig. 34 (b)).

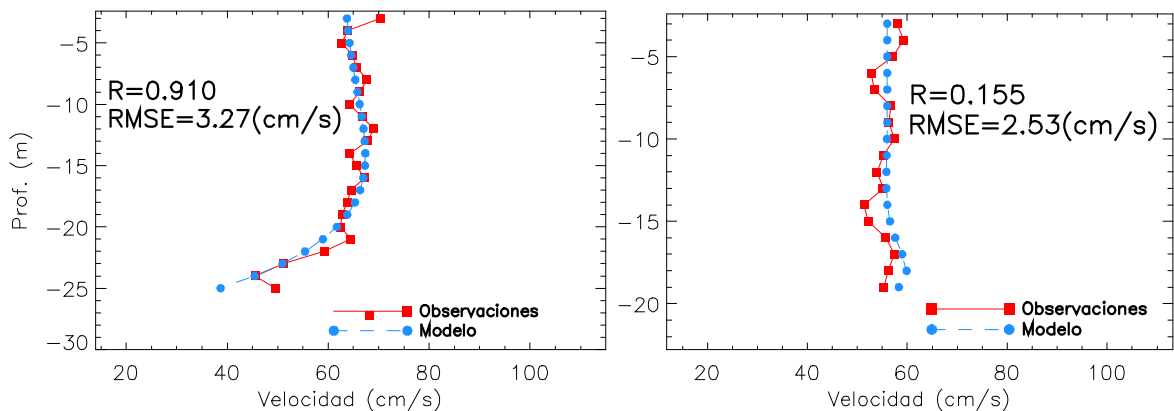


Figura 33: Comparación de perfiles de corriente M_2 con alta y baja correlación (R) en Canal Fitzroy

Fuente: Elaboración propia.

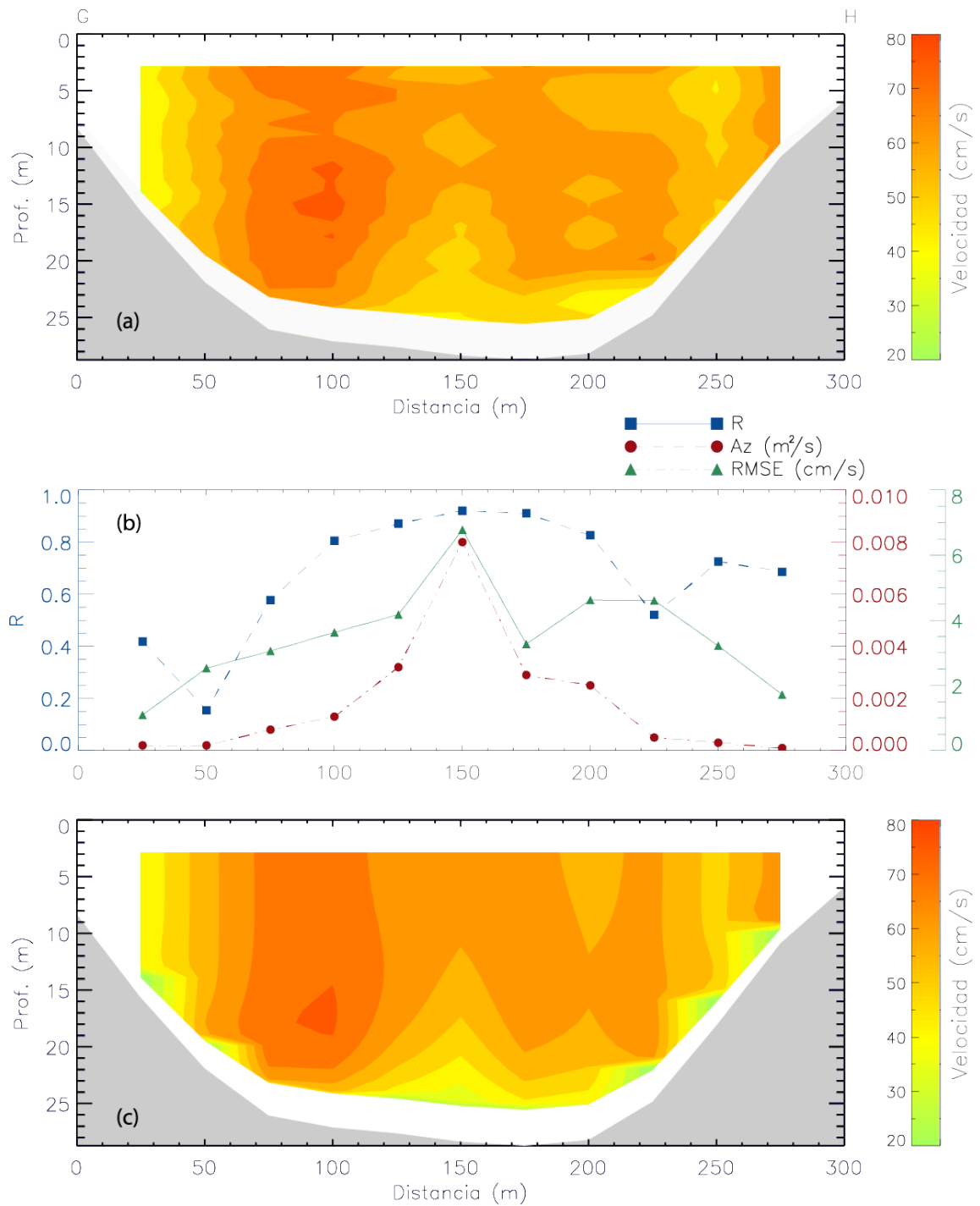


Figura 34: (a) Observaciones de la amplitud de la corriente de marea M_2 en C. Fitzroy (b) Variabilidad transversal de R, A_z y RMSE en la sección. (c) Solución analítica en C. Fitzroy.

Fuente: Elaboración propia.

5.3.3 COMPARACIÓN OBSERVACIONES Y MODELO K_1

Las mayores velocidades observadas se concentran en el centro del canal hacia la superficie en el lado derecho y en la mitad de la columna en el lado izquierdo (Fig. 36 (a)). Los patrones transversales se asemejan a los de la componente M_2 , sin embargo la amplitud de la K_1 es levemente inferior. La representación del modelo capta esencialmente la dominancia de la componente en el lado derecho, mientras que el lado izquierdo es probable que la componente armónica semidiurna tenga mayor influencia en la columna. A_z tuvo un comportamiento similar al caso de la componente M_2 , sin embargo los máximos no se observaron en el centro sino que en el costado derecho donde las mayores velocidades se mantienen cerca de la superficie y se atenúan al fondo. Los valores de A_z fueron similares a obtenidos para la componente M_2 , sin embargo el valor máximo ($\sim 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) se obtuvo hacia el costado derecho, donde los flujos tienen la mayor variación de superficie a fondo, con valores de 80 a 25 cm/s. Los menores A_z se obtuvieron hacia los bordes, donde el flujo mantiene un comportamiento similar en toda la columna (Fig. 36 (c)).

5.3.4 PARÁMETROS ESTADÍSTICOS K_1

Las mayores correlaciones R se ubican en el centro del canal con valores sobre los 0.7, ajustándose por sobre lo establecido. Sin embargo, existen puntos que no cumplen con el umbral propuesto para R (Fig. 36 (b)). En el menor ajuste, el modelo no representa la variabilidad vertical del cizalle del perfil entre los 4 y 9 m de profundidad, lo que además disminuye la precisión de la magnitud de la corriente (Fig. 35). En los mayores valores alcanzados ~ 0.97 , el modelo replica la disminución gradual de la velocidad, evidenciando la influencia del fondo en estas zonas.

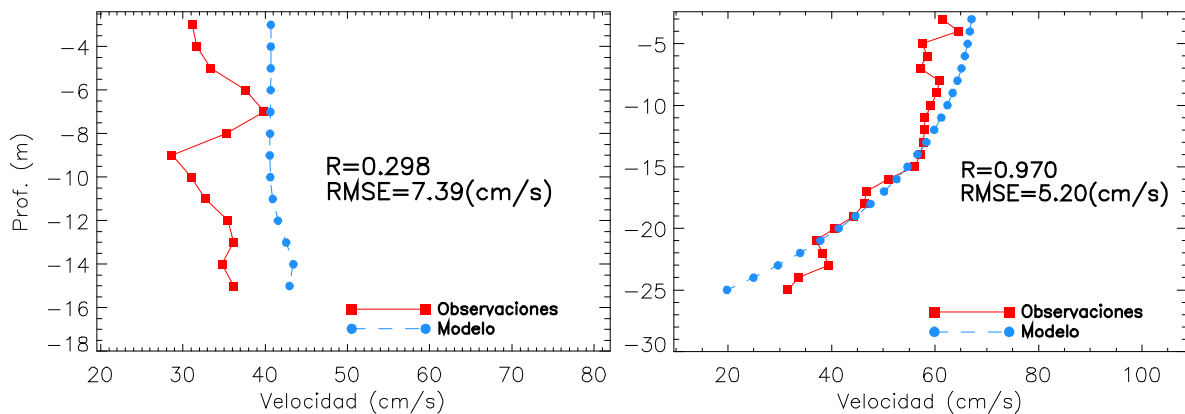


Figura 35: Comparación de perfiles de corriente K_1 con alta y baja correlación (R) en Canal Fitzroy

Fuente: Elaboración propia.

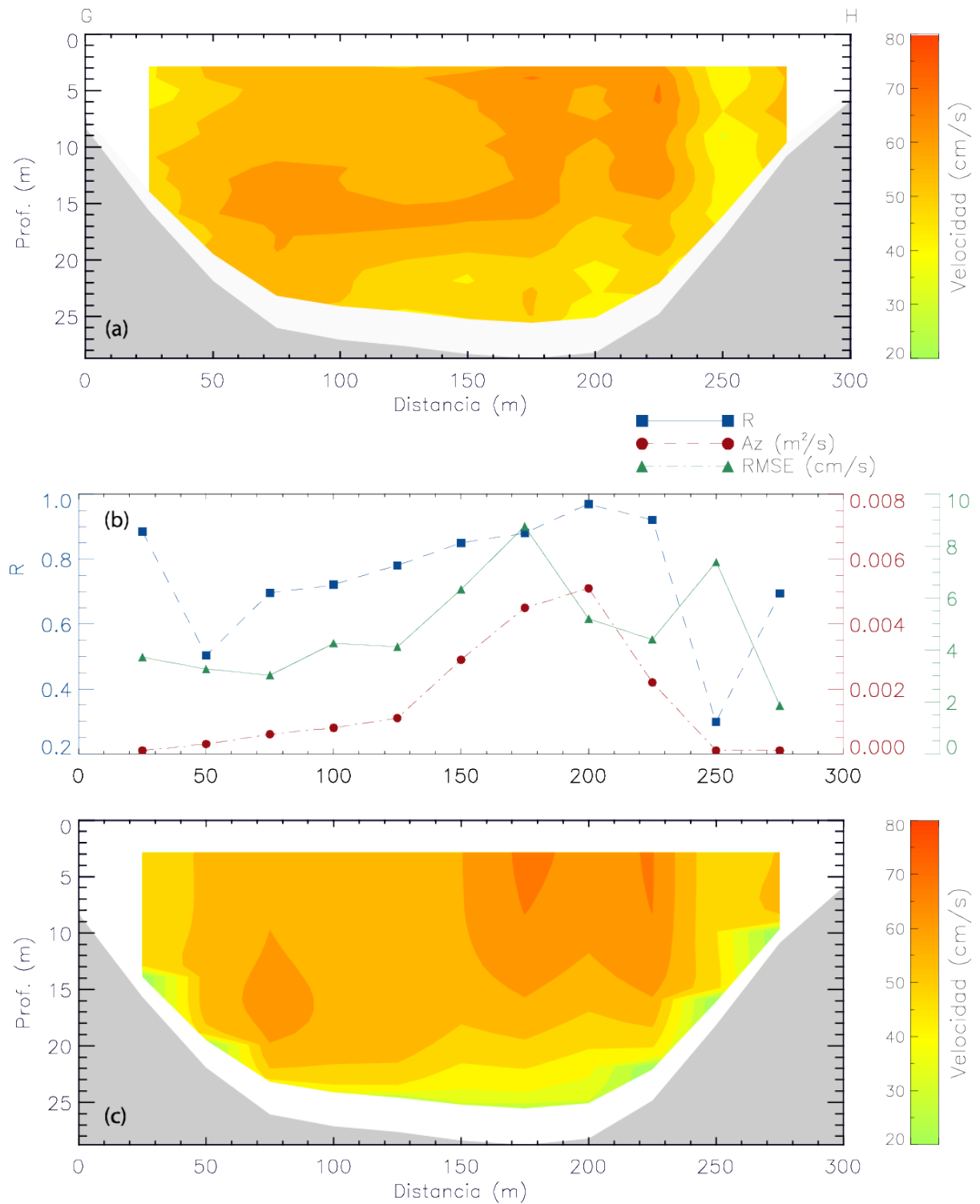


Figura 36: (a) Observaciones de la amplitud de la corriente de marea K_1 en C. Fitzroy (b) Variabilidad transversal de R , A_z y $RMSE$ en la sección. (c) Solución analítica en C. Fitzroy.

Fuente: Elaboración propia.

5.4 CANAL JERÓNIMO

5.4.1 COMPARACIÓN OBSERVACIONES Y MODELO

Como ya se ha mencionado, las observaciones obtenidas en este canal son limitadas en comparación a los anteriores, debido al ruido en la medición (Fig. 37 (a)). Los ajustes realizados para la estadística se limitan a la profundidad ya mencionada para este canal en la sección 4.2.2.3 (~40 m).

Las mayores velocidades se concentran bajo los 20 m de profundidad y se atenúan hacia la superficie, con velocidades que varían entre 140 cm/s y 180 cm/s. Esto se puede atribuir a que este canal es la única vía de evacuación hacia el sur de las aguas superficiales menos densas provenientes de las cuencas de los Senos Otway y Skyring, lo que disminuiría la importancia de la componente M_z por efectos friccionales. Este comportamiento se aprecia mejor en el sector derecho del canal, donde el modelo replica el gradiente de velocidad hacia la superficie, pero con dificultad para representar las mayores velocidades cercanas al fondo (Fig. 37 (c)). El lado izquierdo se obtuvo menor similitud entre lo observado y lo modelado, con patrones que mantienen rangos de velocidad en la vertical. Los mayores valores de A_z (Fig. 37 (b)) se obtuvieron principalmente en el sector profundo del canal y disminuyendo gradualmente hacia la zona somera. El rango fue de $1 \cdot 10^{-2}$ a $5 \cdot 10^{-2}$ m²/s en el lado izquierdo y $A_z \sim 6 \cdot 10^{-3}$ m²/s en el lado derecho. La variabilidad de A_z en esta sección se discute en el capítulo 6.

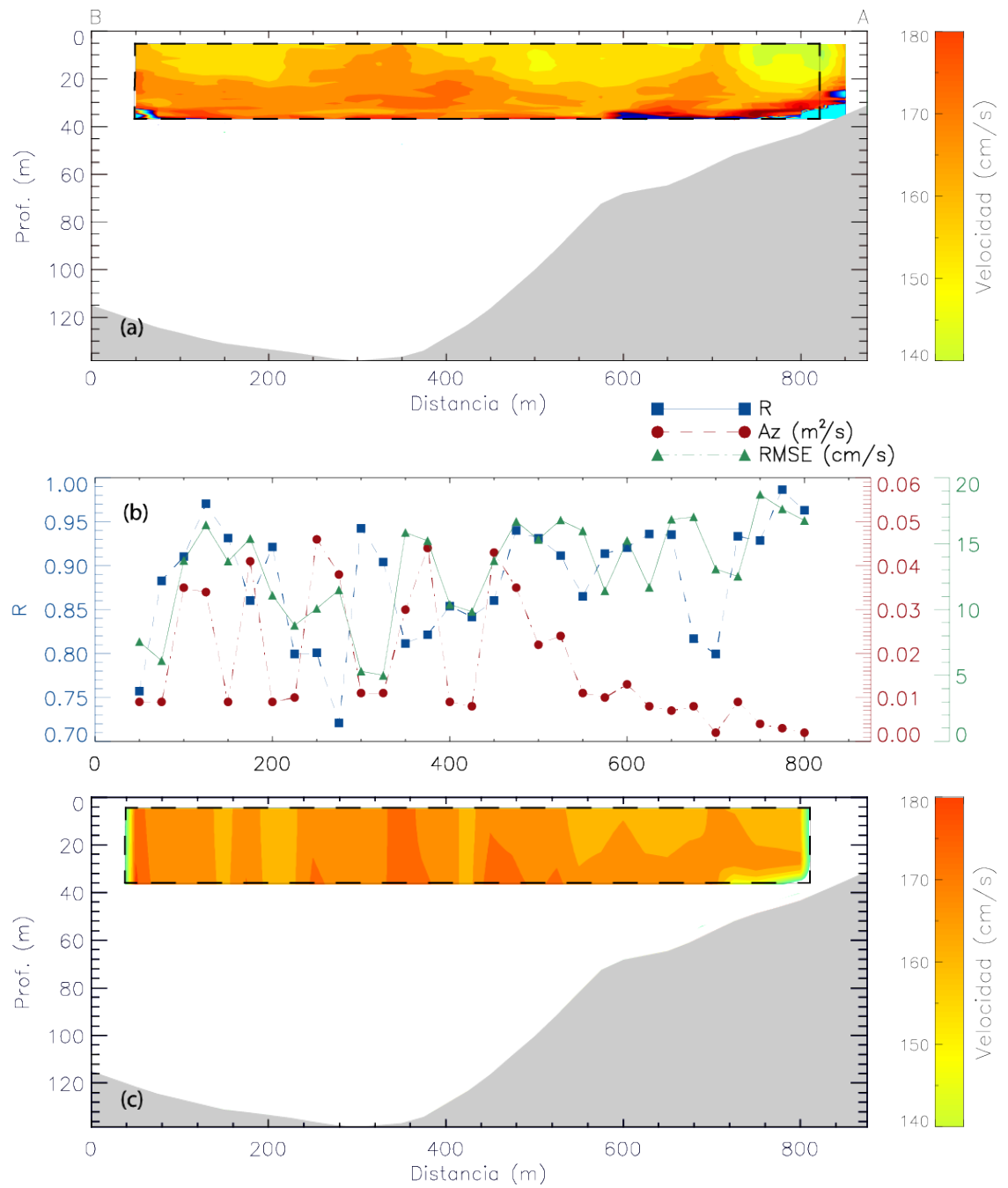


Figura 37: (a) Observaciones de la amplitud de la corriente de marea K_1 en C. Jerónimo (b) Variabilidad transversal de R , A_z y RMSE en la sección. (c) Solución analítica en C. Jerónimo.

Fuente: Elaboración propia.

5.4.2 PARÁMETROS ESTADÍSTICOS

Las velocidades en los perfiles del canal Jerónimo aumentan con la profundidad, comportamiento que el modelo no es capaz de representar correctamente (Fig. 38). En el caso del menor $R \sim 0.72$ el perfil modelado prácticamente se mantiene constante los primeros 4/5 de la profundidad y adquiere una pendiente negativa cercano al fondo. Las mediciones en este perfil, en cambio, disminuyen al fondo y aumentan sólo en el último tramo (Fig. 37 (b)). La mayor correlación fue de $R \sim 0.98$ y en ambos casos la tendencia en la velocidad es clara a aumentar continuamente hacia el fondo (Fig. 38). El ajuste se hace más confiable hacia la zona somera, donde todos los valores son >0.8 . El error en el modelo también posee un comportamiento irregular con valores que van de 5 cm/s a 20 cm/s. Los menores errores se obtuvieron en la zona somera, específicamente en la última parte de la sección, donde se concentran las menores velocidades.

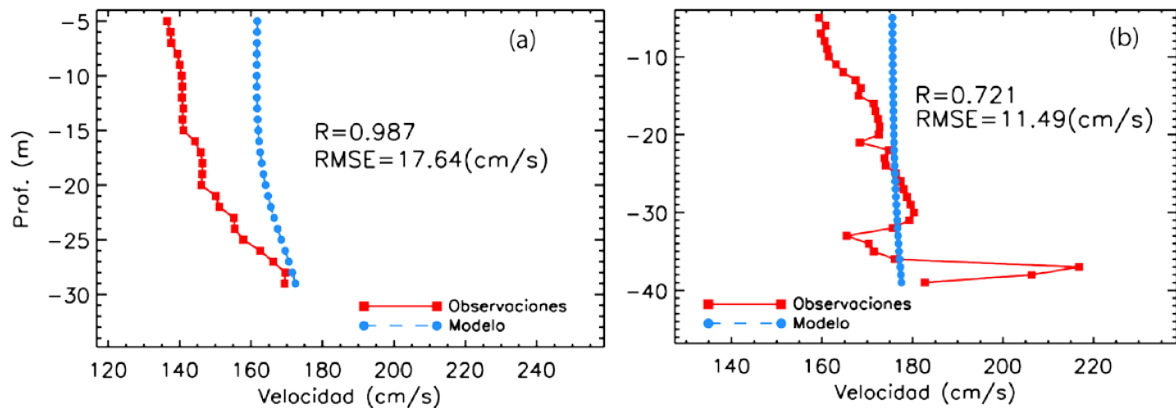


Figura 38: Comparación de perfiles de corriente M_2 con alta y baja correlación (R) en Canal Fitzroy

Fuente: Elaboración propia.

5.5 CANAL PITIPALENA

5.5.1 CIRCULACIÓN DEL MODELO

Los patrones de corrientes en las cinco secciones del canal (Fig. 39 (a), (b), (c), (d) y (e)) muestran un patrón de mayores velocidades en la región central y en superficie, las que decrecen hacia el fondo y hacia los bordes. Las mayores velocidades (~ 105 cm/s) se obtienen en la zona norte del canal, lugar por donde ingresa la onda de marea al estuario, y se mantienen en la constricción que se aprecia en las secciones (b) y (c), lugar de menor ancho pero más profundas. Hay una disminución de las velocidades en el tramo sur (~ 80 cm/s) (d) y (e), donde la sección se ensancha y profundiza aún más.

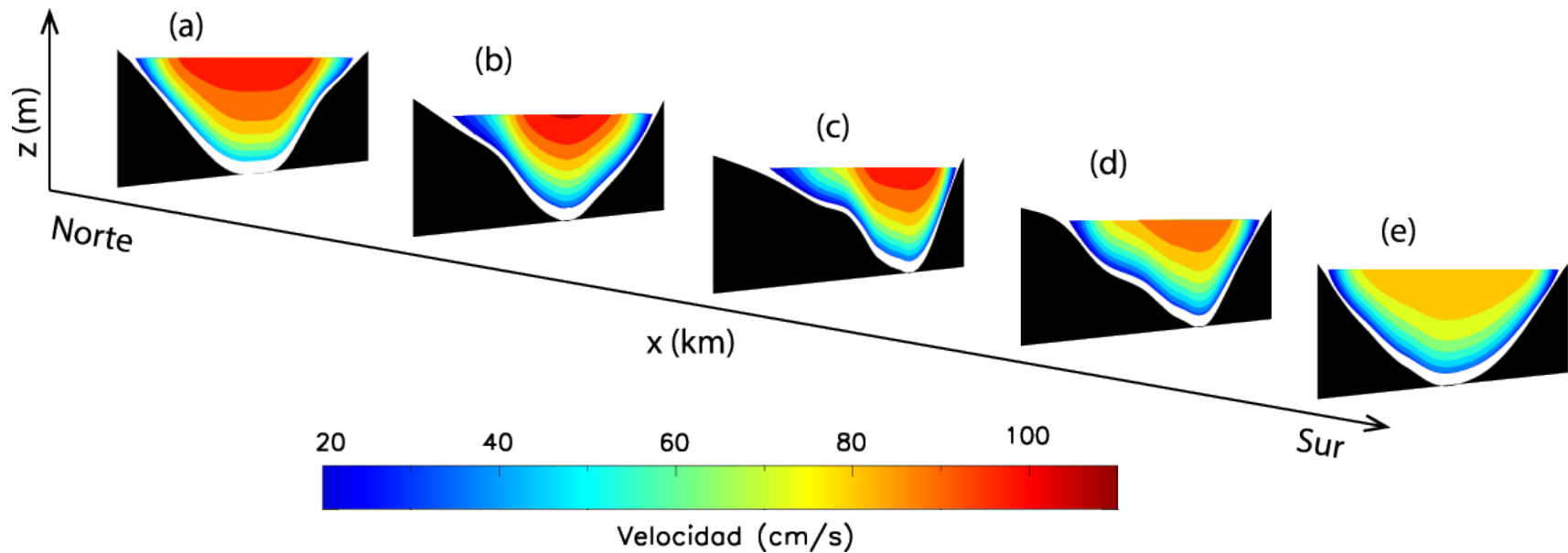


Figura 39: Solución analítica de la amplitud de la corriente de marea M_2 en las secciones de canal Pitipalena
Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de fricción para cada sección, y los resultados de los ajustes en la intersección de los perfiles (medido y modelado), establecidos en la sección 4.2.2, son presentados en la tabla 3.

Tabla 3: Resultados de análisis estadístico y coeficiente de viscosidad turbulento en C. Pitipalena

Parámetro	Símbolo	Sec. 1 (a)	Sec. 2 (b)	Sec. 3 (c)	Sec. 4 (d)	Sec. 5 (e)
Richardson	R_i	0.20	0.10	0.13	0.13	0.26
Visc. Turbulenta	A_z (m ² /s)	0.007	0.0043	0.005	0.005	0.0078
Correlación	R	0.89	0.92	0.97	0.95	0.85
Err. Med. Cuad.	RMSE (cm/s)	9.0	15.5	10.2	15.4	11.8
Sesgo	BIAS (cm/s)	4.45	-10.3	-8.47	-13.5	-3.4

Fuente: Elaboración propia.

En todas las secciones las correlaciones del modelo con el perfil de datos disponible de la sección longitudinal que pasa por el centro del canal son elevadas ($R > 0.85$). El error en la magnitud de las corrientes supera los 10 cm/s en 4 de los 5 tramos, no obstante las diferencias en todas ellas son por subestimaciones en la región del fondo. Los perfiles observados en general presentan velocidades decrecientes a medida que se incrementa la profundidad, sin embargo la oscilación vertical de las magnitudes de la corriente es un comportamiento que el modelo no es capaz de representar (Fig. 40). Los valores de viscosidad turbulenta se mantienen en un orden de magnitud similar, con variaciones asociadas principalmente a la diferencia de profundidad entre ellos. Los números de Richardson se mantienen con valores < 0.5 , lo que indica predominio de condiciones inestables. Las diferencias entre los perfiles se discuten en el capítulo 6.

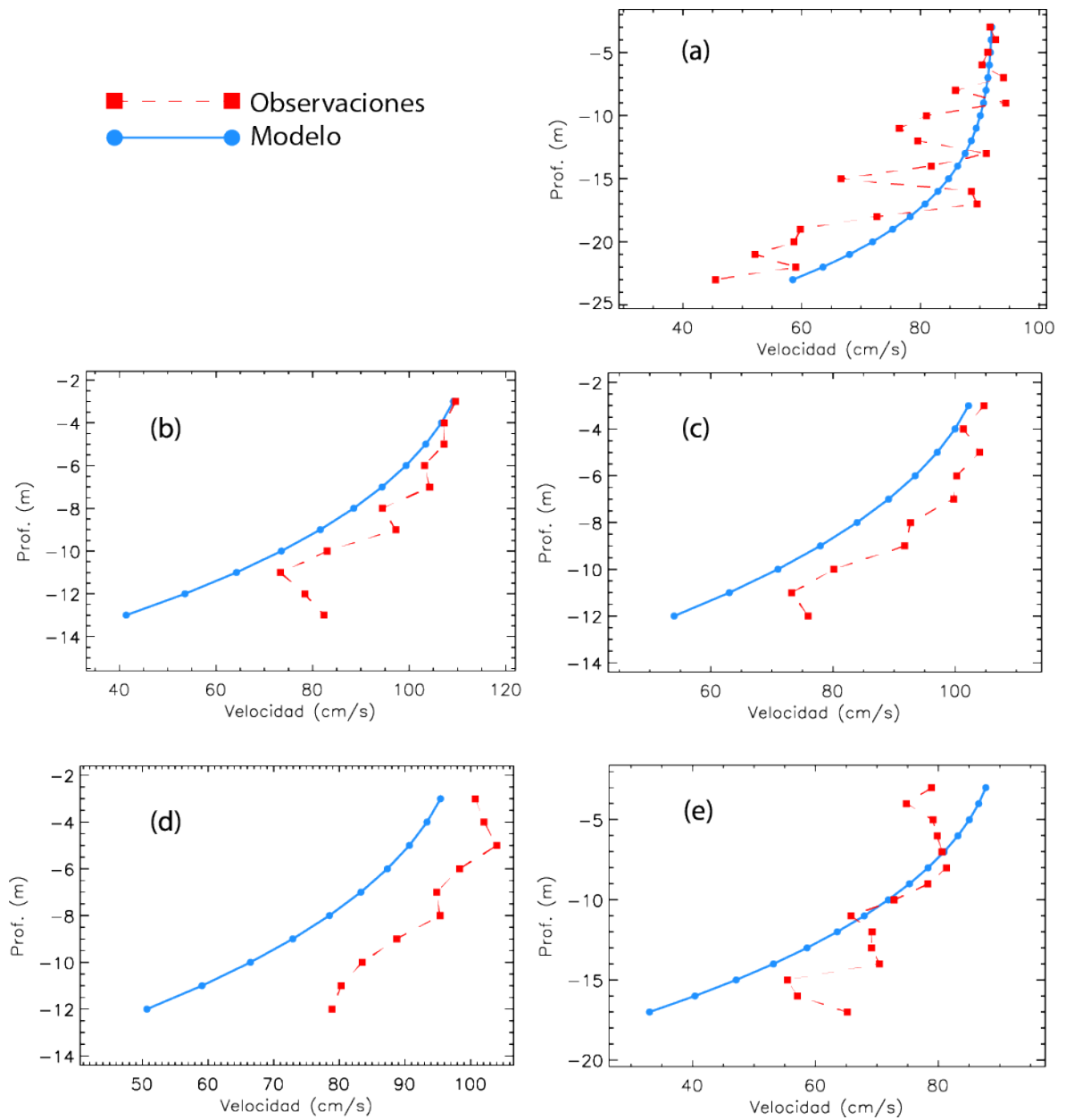


Figura 40: Comparación de perfiles de corriente M_2 en canal Pitipalena en los cinco transectos: a) Sección 1, b) Sección 2, c) Sección 3, d) Sección 4 y e) Sección 5.
Fuente: Elaboración propia.

5.6 POTENCIA DEL FLUJO EN LAS SECCIONES

En este punto se muestran los resultados de la disponibilidad de energía de todas las secciones presentadas, con el fin de estimar una cuantificación del recurso disponible por concepto de la corriente inducida por la componente M_2 de marea y K_1 en el caso particular del canal Fitzroy. En todos los casos es necesario señalar que si bien esta cuantificación se hace con las componentes de marea que tienen la mayor energía en todos los sistemas estudiados, existe un porcentaje menor de otras componentes armónicas que incrementarán estos valores y que no se muestran aquí por simplicidad en el análisis.

En cada sección se calculó la potencia del flujo con los resultados del modelo analítico, utilizando la resolución vertical y horizontal establecida en la tabla 1. En el caso particular de canal Pitipalena se reestructuró la matriz de potencia discretizando valores cada ~40 m y de este modo disminuir el número de perfiles (en el cálculo de corrientes de marea fue ~5 m). A continuación se ilustran los resultados de energía en las secciones y los valores promedio en la vertical.

5.6.1 POTENCIA CANAL DESERTORES

La distribución de potencia sobre ambas secciones supera el umbral de 0.8 kW/m^2 , con valores máximos de $\sim 1 \text{ kW/m}^2$ en la sección 1 y $\sim 1.2 \text{ kW/m}^2$ en sección la 2 (Fig. 41 (b)-(c)). Los valores más altos se ubican, en ambos casos, a mitad de la columna de agua, con máximos tanto sobre regiones someras como profundas.

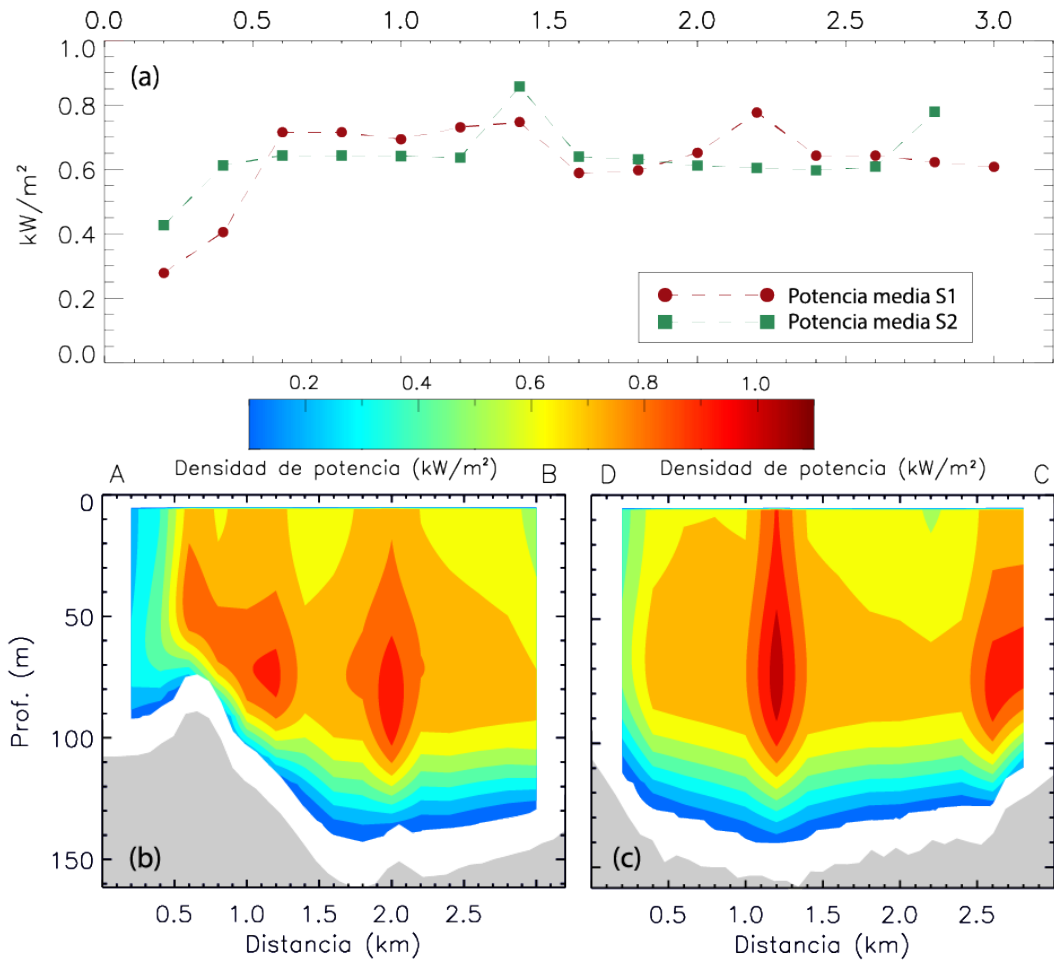


Figura 41: (a) Potencia verticalmente promediada en C. Desertores. (b) Distribución de potencia en S1 (c) Distribución de potencia en S2

Fuente: Elaboración propia.

La potencia media obtenida para ambas secciones arrojan valores mínimos sobre los 0.3 kW/m^2 y un máximo de $\sim 0.9 \text{ kW/m}^2$ obtenido para la sección 2 (Fig. 41 (a)).

5.6.2 POTENCIA CANAL CHACAO

En esta sección se obtuvieron las mayores potencias en dimensión transversal y promediada en la vertical. La potencia cuantificada en ambos sectores del canal supera varias veces la obtenida en todas las otras secciones, con valores que alcanzan hasta los 22 kW/m² en el lado norte y ~20 kW/m² en lado sur (Fig. 42 (b)). Un aspecto interesante es lo que ocurre sobre Roca Remolino que muestra potencias entre 4 ~ 6 kW/m², sobre profundidades someras.

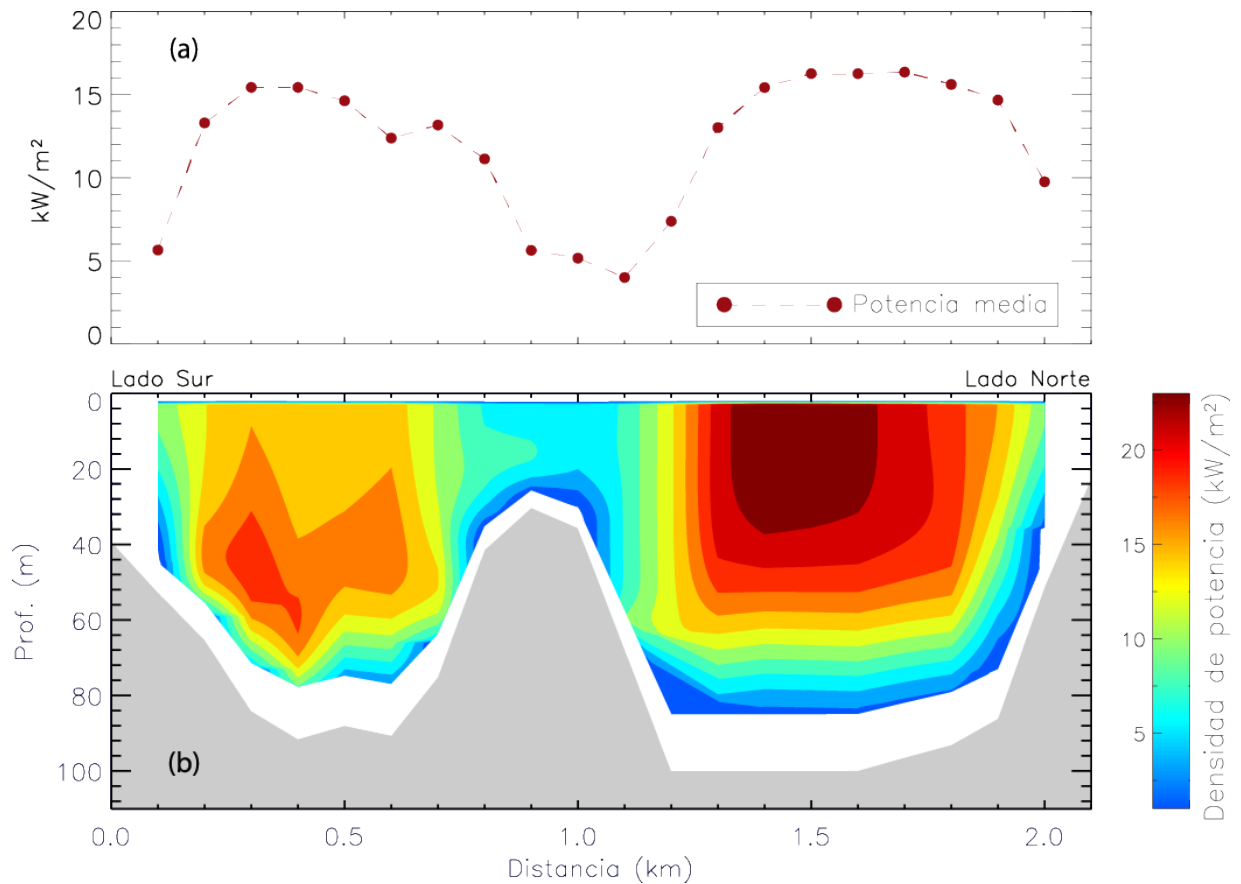


Figura 42: (a) Potencia verticalmente promediada en C. Chacao. (b) Distribución de potencia en la sección

Fuente: Elaboración propia.

La potencia media en la vertical es similar en ambos sectores del canal con valores máximos ~15 kW/m² (Fig. 42 (a)). Esto ya que una gran área de la sección concentra flujos de alta energía, comportamiento que continúa a gran profundidad. Sobre Roca Remolinos la media es ~5 kW/m².

5.6.3 POTENCIA EN CANAL FITZROY

En esta sección fue posible cuantificar la potencia del flujo como consecuencia de las 2 componentes de las que se dispone y realizar una comparación de la cantidad de energía que aporta cada una a la distribución transversal de ésta. Es necesario señalar que la suma del aporte de ambas componentes se realiza asumiendo un comportamiento lineal de la onda de marea en aguas someras, concepto que se discute en la sección 6.

Los mayores valores se encuentran hacia los costados del canal, con un mayor aporte en el lado izquierdo de la M_2 y al lado derecho de K_1 (Fig. 43 (b)). La máxima potencia se ubica cercana al fondo en el costado izquierdo de la sección con valores $\sim 1.4 \text{ kW/m}^2$, mientras que hacia el costado derecho los valores son mayores hacia la superficie $0.9\sim 1.1 \text{ kW/m}^2$. El incremento de la potencia en el sector somero del lado derecho, puede deberse a efectos no lineales o vorticidades inducidos por los cizalles laterales de la corriente.

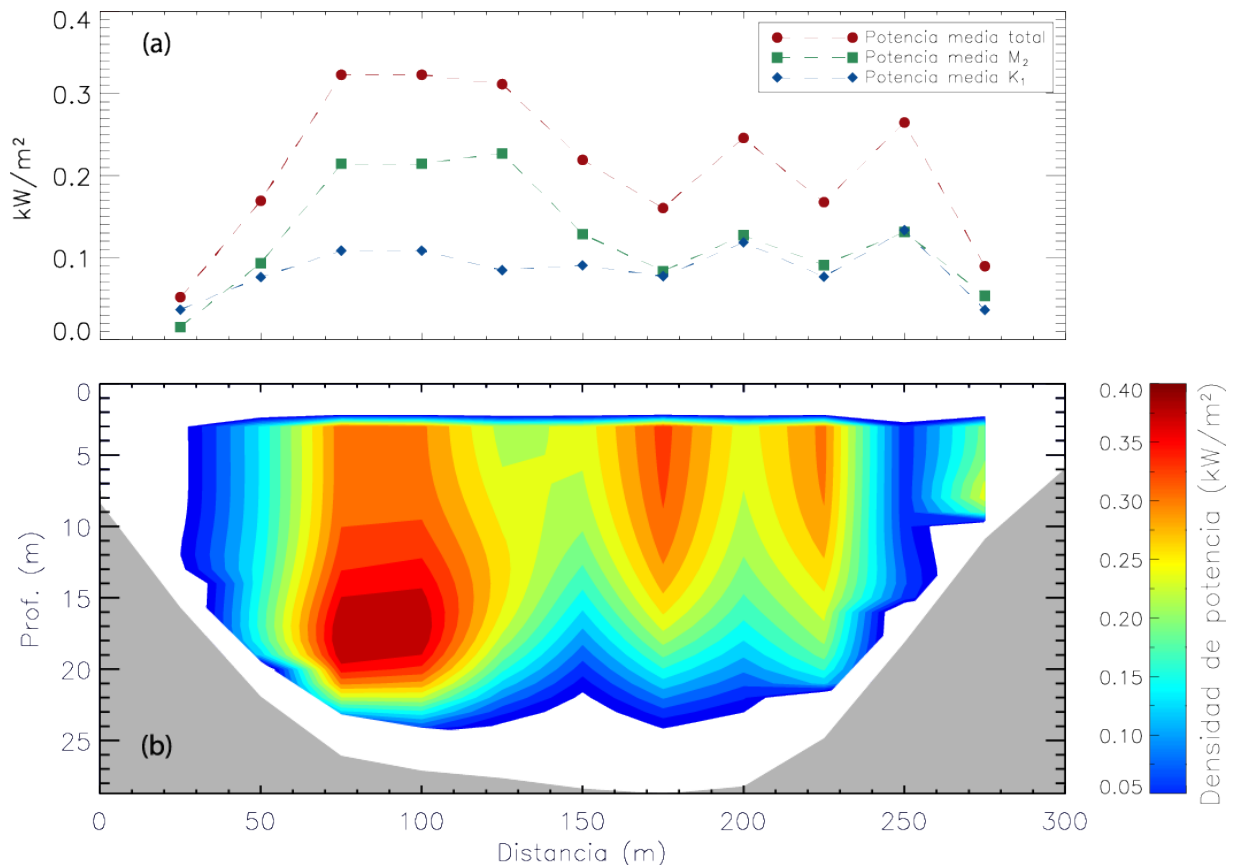


Figura 43: (a) Potencia verticalmente promediada en C. Fitzroy. (b) Distribución de potencia en sección M_2+K_1

Fuente: Elaboración propia.

La potencia media del flujo en cada una de las componentes comprende una pequeña fracción de lo que se cuantifica al sumirlas (Fig. 43 (a)). Esto se debe principalmente a que el cálculo de la potencia del flujo que atraviesa una sección es proporcional al cubo de la

velocidad con que lo atraviesa, por lo que es esperable que mientras se incorporen más elementos forzantes a la estimación, mayor aún sea la curva. La potencia media total del análisis alcanza los $\sim 1.4 \text{ kW/m}^2$ en el sector izquierdo del canal.

5.6.4 POTENCIA EN CANAL JERÓNIMO

Los valores considerados para la estimación son aquellos dentro de la región enmarcada.

La distribución transversal en general muestra zonas energéticas en toda la sección del canal y los mayores valores se encuentran al centro de la misma (Fig. 44 (a)). La extrapolación realizada muestra los mayores flujos en el mismo sector, pero ubicado cercano al fondo con valores de 4 kW/m^2 , comportamiento que se replica hacia la zona somera con valores levemente menores $\sim 3.2 \text{ kW/m}^2$.

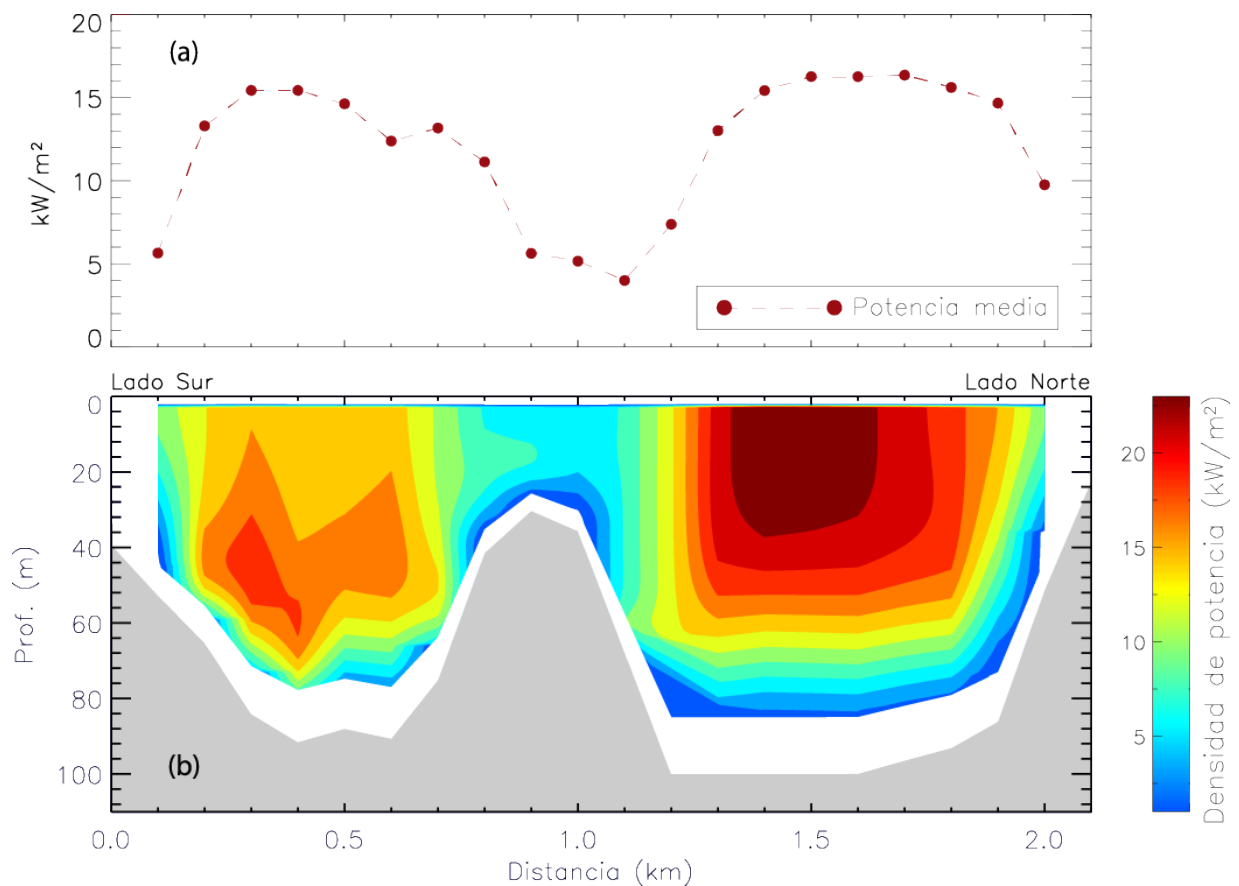


Figura 44: (a) Potencia media en la vertical C. Jerónimo. (b) Distribución de potencia en la sección

Fuente: Elaboración propia.

La potencia del flujo en Jerónimo promedia valores en la vertical sobre los 2 kW/m^2 , con máximos en el centro y decreciendo en el costado somero del canal.

5.6.5 POTENCIA EN CANAL PITIPALENA

La potencia obtenida en Pitipalena no supera los 0.5 kW/m^2 en el promedio vertical (Fig. 45). Sin embargo, se destaca que al haber valores interpolados en la sección, se pueden estar ignorando procesos entre secciones, que potencien o atenúen el flujo. Por lo que es necesario señalar que los resultados contemplan una primera aproximación de la energía que podría disponer canal Pitipalena en concepto de corrientes de marea.

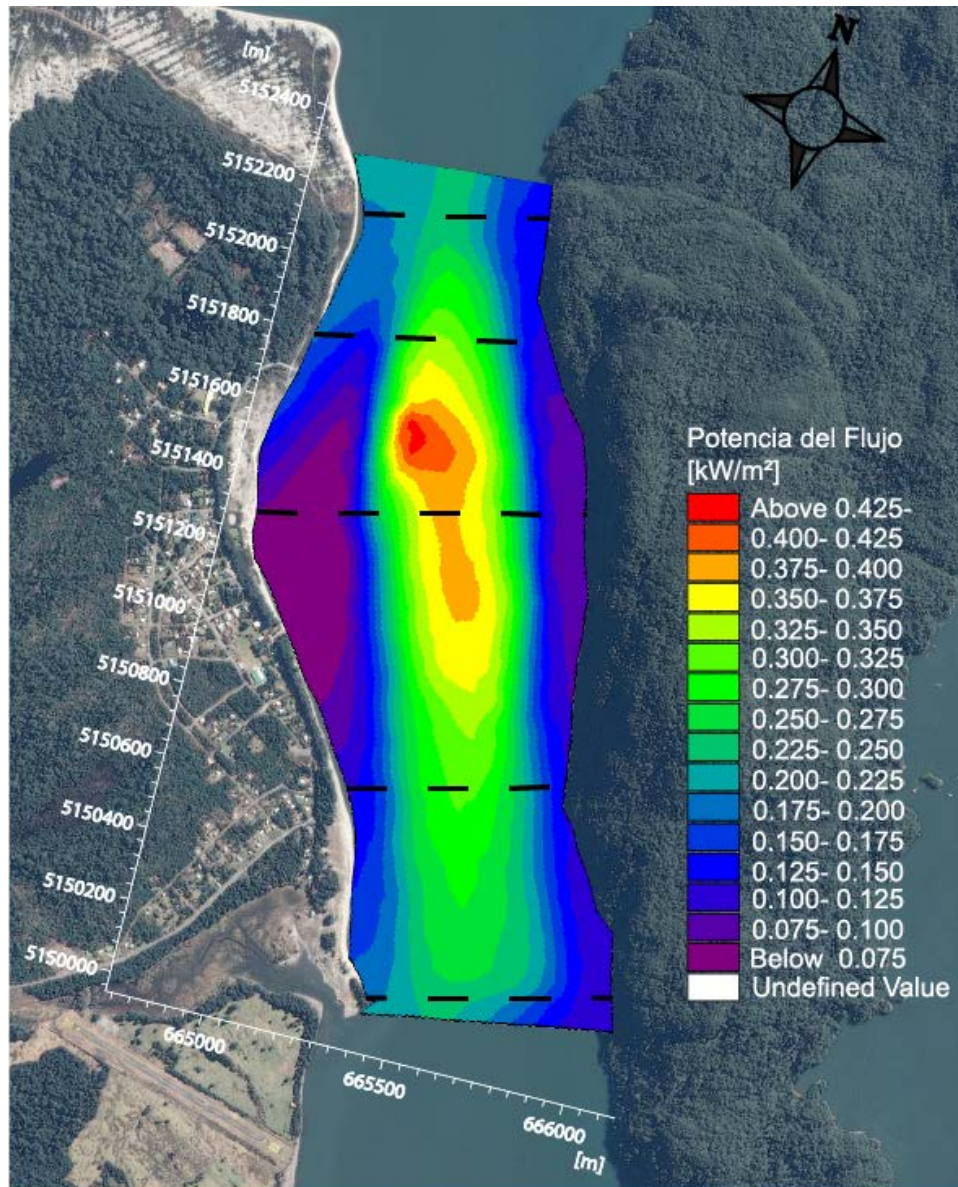


Figura 45: Potencia verticalmente promediada, interpolada horizontalmente a partir de los cinco transectos del C. Pitipalena

Fuente: Elaboración propia.

Los mayores valores se concentran en la zona central del canal, frente a la localidad de Raúl Marín Balmaceda, donde también se ubican las mayores profundidades (en sentido transversal). Hacia los costados la potencia disminuye con valores de $0.1\sim0.3 \text{ kW/m}^2$.

6 DISCUSIÓN

6.1 ANTECEDENTES

A partir de datos de ADCP móvil en transectos transversales de los canales Chacao, Desertores, Fitzroy y Jerónimo. Un transecto longitudinal en canala Pitipalena, se emplearon soluciones analíticas obtenidas de un modelo bidimensional para representar cuantitativa y gráficamente el comportamiento de los campos de corrientes de marea observados en esos canales ubicados al sur de Chile.

En cada canal con transectos de ADCP transversal se aplicó la solución analítica y se estableció un número determinado de perfiles de corrientes para realizar la comparación entre lo observado y lo resuelto. En cada perfil, se utilizaron valores en torno al promedio de la velocidad medida en la sección (U_m), y aplicando un rango de valores de viscosidad turbulenta, cuyos umbrales (superior e inferior) fueron definidos mediante corridas preliminares con valores constantes, se resolvieron los perfiles de corriente modelados. Posteriormente, se realizaron pruebas estadísticas para evaluar el ajuste entre ambas situaciones (observación y modelo).

En el caso en que sólo se dispuso de mediciones en un transecto longitudinal (canal Pitipalena), se modeló a partir de los datos de ADCP en el perfil vertical que intercepta la posición de los cinco transectos transversales definidos para modelación. Se elaboraron secciones transversales modeladas a partir de un valor de fricción para cada sección y se utilizó un valor promedio de velocidad de la corriente. Finalmente se calculó la potencia del flujo en todas las secciones, proponiendo una distribución en planta de la energía en el canal Pitipalena.

6.2 ASPECTOS DEL ANÁLISIS

La relación entre los resultados del modelo y las observaciones muestra que, en general, en los cuatro sitios con datos de corrientes a lo ancho del canal, éste reproduce aceptablemente bien las distribuciones de corrientes observadas. Las magnitudes de las corrientes y las distribuciones dentro de la sección son razonablemente reproducidas.

Una comparación cuantitativa de la estadística en cada canal es presentada en la Tabla 4. Se observa que los canales Jerónimo y Chacao presentan la mayor correlación R , pero los mayores RMSE, y canal Desertores presenta valores aceptables de R y bajos RMSE. En general los valores de R fueron en todos los casos mayores que 0.65 y los errores menores que el 10% establecido en la sección 4.2.1, sugiriendo que el modelo replica con confianza las distribuciones observadas.

Tabla 4: Promedios transversales de R y RMSE en los canales en estudio

UBICACIÓN	Promedio R	Promedio RMSE (cm/s)
C. Chacao	0.82	20.5
C. Desertores (S1)	0.78	5.9
C. Desertores (S2)	0.77	6.4
C. Jerónimo	0.88	13.0
C. Fitzroy (M ₂)	0.67	3.5
C. Fitzroy (K ₁)	0.75	4.7

Fuente: Elaboración propia.

En la mayoría de los casos también se observó que el modelo subestima en las zonas cercanas al fondo y sobreestima en la región superficial. Las discrepancias presentadas entre las observaciones y el modelo pueden ser atribuidas principalmente a cuatro causas:

1. El modelo analítico utilizado en este trabajo no considera los términos advectivos en el balance de momentum, lo que puede llevar a subestimaciones en sitios de intensificación de la corriente asociada a rasgos batimétricos o constricciones costeras.
2. La influencia de asimetrías en las corrientes de marea, ocasionadas por descargas de agua dulce y rasgos batimétricos, lo que se traduce en la aparición de componentes armónicas de aguas someras que modifican el comportamiento de la corriente.
3. El uso de un coeficiente de viscosidad turbulento A_z constante en la vertical, que puede estar influyendo en las subestimaciones y sobreestimaciones en los extremos de los perfiles verticales.
4. La presencia de cambios de signo en los cizalles verticales, que muestra fuertes variaciones de las corrientes en la vertical (ver Fig. 40 (a)), las que no pueden ser replicadas por el modelo y que hacen disminuir su correlación R.

Es reconocido que en los sitios con fuertes corrientes de marea, el clásico balance dinámico geostrófico a lo ancho del estuario (Dyer, 1997) puede ser modificado a uno donde el balance es entre la advección y la fricción, como en el caso de Canal Chacao (Cáceres *et al.*, 2003). Este canal es reconocido por presentar términos friccionales horizontales y verticales de su balance de momentum, que sobrepasan en importancia a la advección (Cáceres *et al.*, 2003). Así, las altas intensidades de las corrientes en el centro de los canales, decreciendo hacia los bordes (Fig. 27), son rasgos típicos de sistemas dominados por la fricción. En distribuciones donde las velocidades se incrementan en los bordes del perfil batimétrico, se esperaría predominio de la advección (Cáceres *et al.*, 2002). De acuerdo a los patrones observados en varios canales del presente estudio, entre ellos Chacao, Desertores, Pitipalena y Fitzroy, se sugiere que en ellos hay dominancia de la fricción sobre la advección.

En dos casos (C. Pitipalena y C. Desertores), sin embargo, hay evidencia de una delgada capa superficial de agua dulce que podría estar influenciando las disminuciones de las

velocidades en la capa superficial, debilitando la importancia de la componente M_2 de la marea y promoviendo el aumento de la importancia de las componentes de aguas someras.

La utilización de un perfil vertical de velocidades en el centro del canal Pitipalena para validar las corrientes modeladas a lo ancho, puede ser justificada en base a dos conceptos: 1) Ejemplo de escasa variabilidad lateral de A_z en otro sistema similar (C. Chacao) y 2) similitud dinámica con C. Chacao. Esta baja variabilidad de A_z se exploró analizando los datos del lado norte del canal Chacao (Fig. 31). En dicho lugar, los valores de A_z , R y RMSE mostraron pequeñas variaciones entre Roca Remolinos y la costa del lado norte, por lo que se puede asumir que la utilización de un valor de A_z constante para dicha sección, producirá resultados similares a los observados en la Fig. 31. En la Fig. 46 se observa la similitud de los resultados en los casos A_z constante en toda la sección (a) y A_z variable en la horizontal (b). Así, el uso de un valor constante de A_z en Pitipalena para representar las corrientes a lo ancho no parece ser descartable.

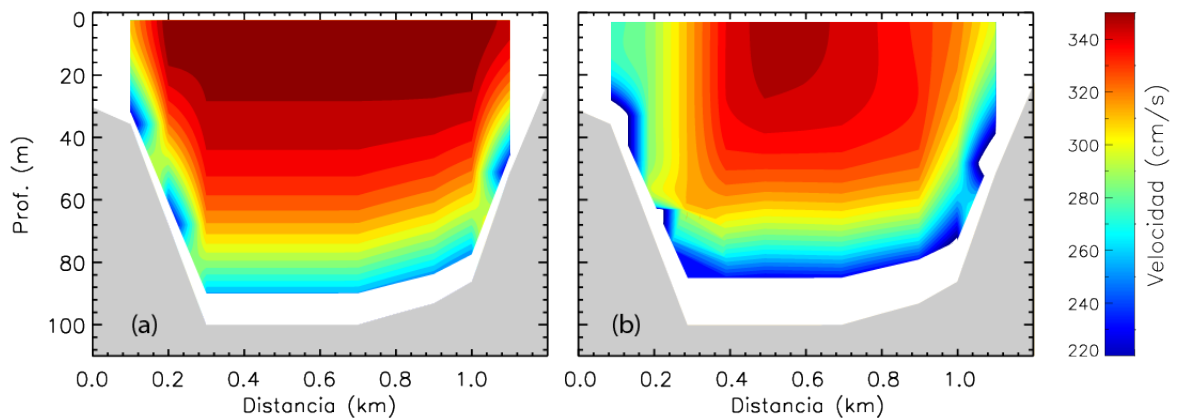


Figura 46: Solución analítica lado norte de C. Chacao. (a) Valor constante de $A_z=0.085 \text{ m}^2/\text{s}$ y $U=2.8 \text{ m/s}$ para toda la sección y (b) A_z variable en la horizontal.

Fuente: Elaboración propia.

También aparecen similitudes dinámicas entre ambos sistemas que dan mayor confianza en la aplicación de esta aproximación. Si consideramos dos flujos que tienen diferentes escalas espaciales (ancho y profundidad en canales, p.e.), velocidades de flujo, o propiedades de los fluidos que pueden ser aparentemente diferentes, estos pueden aún ser dinámicamente similares (Kundu, 1990). El concepto de similitud dinámica está íntimamente asociado con la idea de productos no dimensionales, en los que hay un uso intensivo de datos unificados que se presentan en términos de parámetros adimensionales. Pueden establecerse relaciones muy útiles entre los modelos en el laboratorio y los sistemas naturales sobre la base de consideraciones físicas consistentes, junto con un análisis dimensional. Para establecer similitud dinámica entre los cinco sistemas en estudio, se efectuaron comparaciones con tres números no dimensionales: número de Ekman, número de Rossby y número de Reynolds.

El número de Rossby (R_o) compara la inercia con la rotación y se define por:

$$R_o = \frac{\bar{U}}{fL}$$

donde $\bar{U}$ es la velocidad típica del flujo en el sistema y L es la distancia transversal o ancho del canal. El número de Reynolds compara la inercia con la fricción y se define por:

$$R_e = \frac{U^2/L}{A_z U/L^2} = \frac{UL}{A_z}$$

Asimismo, al estudiar la similitud dinámica, la geometría de los sistemas también juega un rol importante como complemento a este análisis. En el caso de secciones transversales en canales, uno de los rasgos de interés es la relación H/L entre la profundidad (H) y el ancho (L).

Una comparación de la similitud dinámica entre todos los canales en estudio es presentada en la tabla 5 con estos números no dimensionales. Se muestran los valores típicos utilizados para el escalamiento de cada uno de los términos. Se observan valores similares del número de Ekman entre Chacao y Pitipalena y entre Desertoires (S1) y Fitzroy; del número de Rossby entre Chacao y Pitipalena, y entre Jerónimo y Fitzroy; del número de Reynolds entre los cinco sitios; y de la relación H/L entre Chacao, Pitipalena y Fitzroy. Así, Chacao y Pitipalena muestran similitud entre los tres números y en su geometría, sugiriendo que ambos sistemas son similares en su dinámica. Este antecedente también refuerza la confianza en la aplicación del modelo a partir de un perfil vertical central.

Tabla 5: Parámetros típicos y números no dimensionales en canales de estudio

CANALES	A_z (m ² /s)	f (s ⁻¹)	H (m)	U (m/s)	L (m)	Ek	R_o	Re	H/L
Chacao (Canal norte)	0.085	$9.69 \cdot 10^{-5}$	100	2.8	1000	0.088	28.883	32941.2	0.10
Pitipalena (Centro)	0.007	$1.006 \cdot 10^{-4}$	28	0.7	300	0.089	23.200	30000	0.09
Desertoires (S1)	0.1	$1.284 \cdot 10^{-4}$	150	1.1	3000	0.035	2.855	33000	0.05
Jerónimo	0.03	$1.168 \cdot 10^{-4}$	130	1.7	900	0.015	16.166	51000	0.14
Fitzroy	0.004	$1.157 \cdot 10^{-4}$	30	0.7	300	0.038	20.162	52500	0.10

Fuente: Elaboración propia.

Las figuras 27, 29, 31, 33, 35, 37 y 39 sugieren el siguiente patrón: que las zonas más profundas de la sección presentan, en general, el valor más alto de A_z y las mayores velocidades de la corriente. Esta relación directa es sustentada con la aproximación de Bowden *et al.* (1959), donde el coeficiente A_0 de la viscosidad turbulenta, en ausencia de estratificación está dado por $A_0 = 2.5 \cdot 10^{-3} UH_0$ donde U es la velocidad de la corriente y H_0 es la mitad de la profundidad promedio.

Tanto esta como otras aproximaciones teóricas a un valor constante de viscosidad turbulenta, fueron utilizadas por Cáceres *et al.* (2003) en Canal Chacao, para proponer un valor de $A_z = 0,01 \text{ m}^2/\text{s}$, el cual resulta subestimado de acuerdo los resultados del modelo (Tabla 1). En el presente estudio se evaluó el comportamiento del modelo con un valor de viscosidad turbulenta A_z variable en la dimensión horizontal y promediada en la vertical. Esto constituye un avance en la estimación de valores de campo de A_z y refleja la contribución del estudio para el uso de valores más realistas en modelación de corrientes. La incorporación del coeficiente A_z variable en la vertical en futuras modelaciones podría incluir soluciones parabólicas o semiparabólicas (Zitman and Schuttelaars, 2012).

Otro aspecto a tener en consideración es que las comparaciones son entre el modelo y las amplitudes de la componente M_2 de la corriente de marea obtenidas en una fase particular del ciclo lunar (sicigias o cuadraturas). Por lo tanto, los resultados son solo representativos de aquella fase en que se tomaron los datos. El análisis de energía de cada sitio debe hacerse teniendo presente esta consideración.

La potencia calculada con el modelo muestra valores significativos en los canales Desertoires, Jerónimo y Fitzroy, en los que atraviesan corrientes menores a las de Chacao.

Considerando que existen dispositivos que permiten la captación de energía incluso en flujos más débiles ($\sim 50 \text{ cm/s}$) (Ver Apéndice), Pitipalena también se asoma como una zona de interés, principalmente porque podría permitir el abastecimiento de comunidades que se encuentran aisladas y que dependen de combustibles fósiles y horarios restringidos para el uso de electricidad. No obstante los procesos hidrodinámicos son simplificados en la aplicación de las soluciones analíticas y estas simplificaciones disminuyen la precisión de la cuantificación de recurso energético, lo que en consecuencia aumenta la incertidumbre a la hora de establecer si un sitio tiene potencial para extracción. En la tabla 6 se resumen los valores de potencia por sección.

Tabla 6: Valores de potencia media, máxima y mínima por sección

POTENCIA (kW/m²)	Media en la sección	Máx.	Mín.
C. Chacao	11.7	23.2	1.0
C. Desertoires (S1)	0.62	0.98	0.01
C. Desertoires (S2)	0.64	1.05	0.01
C. Jerónimo	2.56	4.02	0.1
C. Fitzroy (M_2)	0.13	0.27	0.005
C. Fitzroy (K_1)	0.08	0.19	0.003

Fuente: Elaboración propia.

7 CONCLUSIÓN

El presente estudio constituye la primera instancia de aplicación del modelo de Huijts *et al.* (2006) en cinco canales o estuarios profundos (fiordos) dominados por la influencia mareal. En algunos de ellos las corrientes alcanzan velocidades suficientes para extracción de energía.

El modelo se aplicó con un valor de viscosidad turbulenta A_z variable en la dimensión horizontal y promediado en la vertical en los canales Chacao, Jerónimo, Fitzroy y Desertores, y con valores constantes en la dimensión horizontal y vertical en canal Pitipalena, encontrándose valores que representan una contribución a la modelación de corrientes en estos sistemas.

En los cinco sitios de estudio, el modelo reproduce aceptablemente bien las distribuciones de velocidades. Las correlaciones ($R > 0.6$) y RMSE ($< U \cdot 0.1$) obtenidas en la mayoría de los casos confirma que las magnitudes de las corrientes y las distribuciones dentro de la sección son razonablemente reproducidas.

Al comparar cuantitativamente las energías observadas en cada sección, los canales Chacao, y Jerónimo muestran los más altos valores energéticos con una media de 11.7 y 2.56 kW/m², la energía en estos canales se concentra principalmente en las zonas profundas del canal y ubicada en la mitad de la columna de agua. Los canales Desertores y Fitzroy presentan una media de potencia ~ 1 kW/m² y ~ 0.1 kW/m², respectivamente, concentrando las mayores energías en zonas profundas, a mitad de la columna de agua y más cercanas a la superficie. Pitipalena exhibe potencias de ~ 0.5 kW/m² con las mayores energías cerca de la superficie.

Al simplificar un escenario y trabajar con un valor de viscosidad turbulenta constante en toda la sección, el modelo responde bien en ambientes dominados por la fricción de fondo, captando las principales características del flujo en estos. El caso de canal Chacao lado Norte es un ejemplo de ello, donde el modelo explica de gran manera el comportamiento de la M_2 en el sector de Roca Remolinos, que por lo demás es de gran interés en temas energéticos. Este aspecto es significativo cuando se toma en consideración que los experimentos de medición son de 12 horas o más. Además, obtener mediciones en transectos transversales, con ADCP remolcados, presenta un gran desafío, sobre todo cuando las corrientes son de gran magnitud, ya que a la embarcación se le dificulta mantener la estabilidad de la nave y el transecto de navegación establecido (caso Jerónimo). De este modo, la utilización de las soluciones analíticas puede traducirse en un gran aporte para los trabajos futuros en materias de investigación básica o aplicada en el ámbito de energías marinas.

8 REFERENCIAS

- Arnott, K. D., Valle-Levinson, A., & Luther, M. (2012). Friction dominated exchange in a Florida estuary. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 113, 248-258.
- Basdurak, N. B., & Valle-Levinson, A. (2013). Tidal variability of lateral advection in a coastal plain estuary. *Continental Shelf Research*, 61-62, 85-97.
- Bernitsas, M. (2012). *Enhancing Flow Induced Motions to Harness Hydrokinetic Energy in an Environmentally Compatible Way*. Recent Presentation, University of Maine.
- Bernitsas, M., Ben-Simon, Y., Raghavan, K., & Garcia, E. M. (2008). VIVACE (Vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy): A new concept in generation of clean and renewable energy from fluid flow. *J. Offshore Mech. Arct. Eng.*(130(4)), 1-18.
- Bowden, K. F., Fairbairn, L. A., & Huges, P. (1959). The distribution of shearing stresses in a tidal current. *Geophys. J. Roy. Astr. S.*, 2(Issue 4), 288-305.
- Cáceres, M., Valle-Levinson, A., & Atkinson, L. (2003). Observations of cross-channel structure of flow in an energetic tidal channel. *J. Geophys. Res.*, 108(C4), 3114.
- Cáceres, M., Valle-Levinson, A., & Bello, M. (2008). Residual flow over a bump in Quellón Bay. *Rev. biol. mar. oceanogr.*, 43 (3), 629-639.
- Cáceres, M., Valle-Levinson, A., Fierro, J., Bello, M., & Castillo, M. (2007). Características del flujo residual en canales Pulluche y Chacabuco. *Cienc. Tecnol. Mar*, 30 (2), 17-36.
- Cáceres, M., Valle-Levinson, A., Fierro, J., Valenzuela, C., & Castillo, M. (2010). Variabilidad transversal del flujo y de la densidad en la boca del Fiordo Aysén. *Cienc. Tecnol. Mar*, 33 (1), 5-15.
- Cáceres, M., Valle-Levinson, A., Sepúlveda, H. H., & Holderied, K. (2002). Transverse variability of flow and density in a Chilean fjord. *Continental Shelf Research*, 22, 1683-1698.
- Cameron, W. M., & Pritchard, D. W. (1963). The Sea: Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas. (M. N. Hill, Ed.) *Volume 2*.
- Castillo, M., & Valenzuela, C. (2006). Régimen de circulación en canales y fiordos australes. *Avances en el conocimiento oceanográfico de las aguas interiores chilenas, Puerto Montt a cabo de Hornos*, 59-62.
- Díaz, P., Molinet, C., Cáceres, M., & Valle-Levinson, A. (2011). Seasonal and intratidal distribution of *Dinophysis* spp. in a Chilean fjord. *Harmful Algae*, 10(Issue 2), 155-164.
- Draper, S. (2011). *Tidal Stream Energy Extraction in Coastal Basins*. PhD. Thesis, University of Oxford, St. Catherine's College.
- Dyer, K. (1973). *Estuaries: a physical introduction*. Chichester: John Wiley and sons.
- Dyer, K. (1997). *Estuaries: A Physical Introduction* (2nd edition ed.). Wiley.
- Evans, J. D. (1996). *Straightforward Statistics for the Behavioral Sciences*. Brooks/Cole Publishing Company.
- Fierro, J., Bravo, M., & Castillo, M. (2000). Caracterización del régimen de mareas y corrientes a lo largo del canal Moraleda (43° 54' S - 45° 17' S). *Cienc. Tecnol. Mar*, 23, 3-14.
- Fischer, H. (1972). Mass transport mechanisms in partially stratified estuaries. *J. Fluid Mech.*, 53, 671-687.
- Friedrichs, C. T., & Hamrick, J. M. (1996). Effects of Channel Geometry on Cross Sectional Variations in Along Channel Velocity in Partially Stratified Estuaries. En D. Aubrey, & C. Friedrichs, *Buoyancy Effects on Coastal and Estuarine Dynamics* (págs. 283-300). Washington, D.C.: American Geophysical Union.

- Fugate, D. C., Friedrichs, C. T., & Lawrence P., S. (2007). Lateral dynamics and associated transport of sediment in the upper reaches of a partially mixed estuary, Chesapeake Bay, USA. *Continental Shelf Research*, 27, 679-698.
- Garrad-Hassan. (2009). Preliminary site selection - Chilean marine energy resources. 69.
- Garrett, C. (2009). *AccessScience*. Obtenido de <http://www.accessscience.com>
- Garrett, C., & Cummins, P. (2004). Generating Power from Tidal Currents. *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, 130(3), 114-118.
- Geyer, W. (2010). Contemporary Issues in Estuarine Physics. En A. Valle-Levinson (Ed.). New York: Cambridge University Press.
- Gorlov, A. (2001). *Tidal Energy*. Boston: Academic Press.
- Huijts, K. (2010). *Modelling the transverse distribution of velocity and suspended sediment in tidal estuaries*. PhD. Thesis, Utrecht University, Faculty of Science, Department of Physics and Astronomy, The Netherlands.
- Huijts, K., De Swart, H., Schramkowski, G., & Schuttelaars, H. (2011). Transverse structure of tidal and residual flow and sediment concentration in estuaries. *Ocean Dynamics*, 61, 1067-1091.
- Huijts, K., Schuttelaars, H., De Swart, H., & Valle-Levinson, A. (2006). Lateral entrainment of sediment in tidal estuaries: An idealized model study. *J. Geoph. Res.*, 111(C1).
- Joyce, T. (1989). On in situ calibration of shipboard ADCP's. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*(6), 169-172.
- Kasai, A., Edward Hill, A., Fujiwara, T., & H. Simpson, J. (2000). Effect of the Earth's rotation on the circulation in regions of freshwater influence. *J. Geophys. Res.*, 105(C7), 16,961-16,969.
- Kepler Energy. (19 de 8 de 2014). *Technology: Kepler Energy*. Obtenido de Kepler Energy: <http://www.keplerenergy.co.uk/technology.html>
- Kundu, P. (1990). *Fluid Mechanics*. California: Academic Press.
- Lwiza, K. M., Bowers, D. G., & Simpson, J. (1991). Residual and tidal flow at a tidal mixing front in the North Sea. *Cont. Shelf Res.*, 11(11), 1379-1395.
- McAdam, R. (2011). *Studies into the Technical Feasibility of the Transverse Horizontal Axis Water Turbine*. PhD. Thesis, University of Oxford, Department of Engineering Science.
- McAdam, R. A., Houlsby, G. T., Oldfield, M. L., & McCulloch, M. D. (2009). Experimental Testing of the Transverse Horizontal Axis Water Turbine. *Proc. 8th European Wave and Tidal Energy Conference*, (págs. 360-365).
- Munk, W. H., & Anderson, E. R. (1948). Notes on the theory of the thermocline. *J. Mar. Res.*, 3, 276-295.
- Salinas, S., & Castillo, M. (2012). Caracterización de la scorrientes mareales y submareales en canal desiertos (42° 42' S; 72° 50' W). *Cienc. Tecnol. Mar*, 35, 5-18.
- Schramkowski, G. P., & De Swart, H. E. (2002). Morphodynamic equilibrium in straight tidal channels: Combined effects of Coriolis force and external overtides. *J. Geophys. Res.*, 107(C12), 3227.
- SHOA. (1990). *Derrotero de la costa de Chile* (1997 ed., Vol. II). Valparaíso: Instituto Hidrográfico de la Armada de Chile.
- SHOA. (2000). *Derrotero de la costa de Chile* (2004 ed., Vol. III). Valparaíso: Instituto Hidrográfico de la Armada de Chile.
- Stewart, R. H. (2008). *Introduction to Physical Oceanography*. Texas.
- Sutherland, G., Foreman, M., & Garrett, C. (2006). Tidal current energy assessment for Johnstone Strait, Vancouver Island. *J. Power and Energy*, 221, 147-157.

- Trump, C., & Marmorino, G. (1997). Calibrating a gyrocompass using ADCP and DGPS data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 14, 211-214.
- Valdenegro, A., & Silva, N. (2003). Caracterización oceanográfica física y química de la zona de canales y fiordos australes de Chile entre el estrecho de Magallanes y cabo de Hornos (CIMAR 3 Fiordos). *Cienc. Tecnol. Mar*, 26 (2), 19-60.
- Valle-Levinson, A. (2008). Density driven exchange flow in terms of the Kelvin and Ekman numbers. *J. Geoph. Res.*, 113.
- Valle-Levinson, A., & Atkinson, L. (1999). Spatial gradients in the flow over an estuarine channel. *Estuaries*, 22 (2A), 179-193.
- Valle-Levinson, A., Reyes, C., & Sanay, R. (2003). Effects of Bathymetry, Friction, and Rotation on Estuary–Ocean Exchange. *J. Phys. Oceanogr.*, 33, 2375-2393.
- Vennell, R. (2011). Tuning Tidal Turbines In-Concert to Maximise Farm Efficiency. *J. Fluid Mech.*, 671, 587-604.
- Vreugdenhil, C. (1994). *Numerical Methods for Shallow Water Flow*. Norwell, Ma: Kluwer.
- Wong, K. (1994). On the nature of transverse variability in a coastal plain estuary. 14,209-14,222.
- Zitman, T. J., & Schuttelaars, H. M. (2012). Importance of cross-channel bathymetry and eddy viscosity parameterisation in modelling estuarine flow. *Ocean Dynamics*, 603-631.

9 APÉNDICE

9.1 DISPOSITIVOS DE EXTRACCIÓN

Cabe destacar que la finalidad de este estudio no es realizar una comparación entre el desempeño de los dispositivos de extracción, sino presentar el estado del arte de los mismos con el fin de aportar mayor conocimiento a estudios posteriores que pudieran considerar la implementación de dispositivos de captación energética.

Los dispositivos utilizados comúnmente son elementos que, ya sean flotantes, fijos o de otros tipos, aprovechan la energía de las corrientes de marea o corrientes horizontales inducidas por las mareas. La principal ventaja de estos sistemas es que no necesitan la instalación de represas para contener el agua, sino que aprovecha las corrientes generadas por el ascenso y descenso de agua de un punto a otro. Los estudios de generación eléctrica a partir de corrientes de marea crecen en relación a las necesidades energéticas que presenta el desarrollo de los países. Es por ello que los estudios de este recurso ha ido en aumento (Garrett & Cummins, 2004; Sutherland, Foreman, & Garrett, 2006; Garrett, 2009; Vennell, 2011; McAdam, 2011).

La extracción de la energía hidro-cinética se lleva a cabo de manera similar a la extracción de energía por viento; utilizando dispositivos que transforman el movimiento de las corrientes en energía. Si bien existen diversos formatos, las principales se presentan a continuación (Fig. 47).

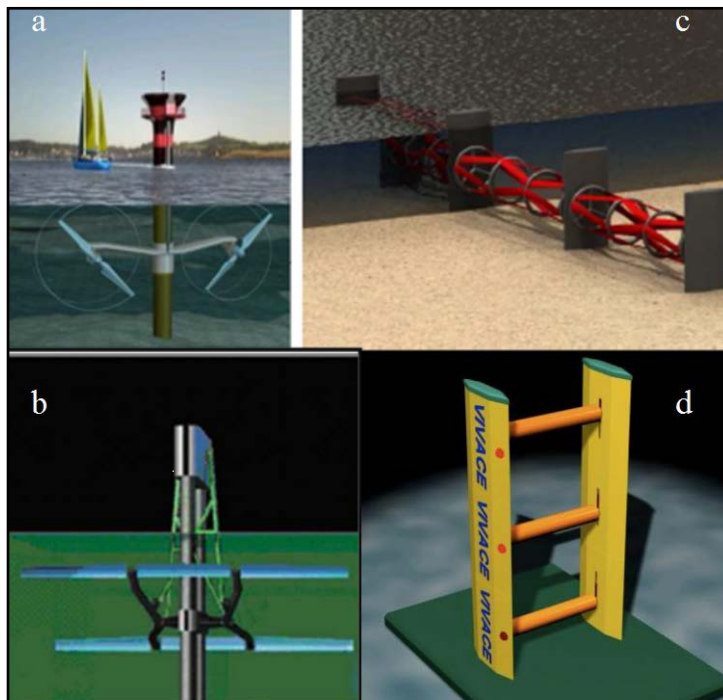


Figura 47: (a) Turbina axial horizontal y vertical, (b) hidroplanos, (c) turbinas de eje transversal-horizontal (THAWT, por sus siglas en inglés) y las (d) vibración inducida por vórtices (VIVACE).

Fuente: Draper, 2011; Vortexhydroenergy.

Los modelos más destacados son los que se han desarrollado en los últimos años, estos son el THAWT y el VIVACE.

9.1.1 TURBINA DE EJE TRANSVERSAL-HORIZONTAL (THAWT)

Aunque a la fecha todavía no se comercializa, sus características son llamativas en relación a otros dispositivos. El primer dispositivo (THAWT) fue desarrollado en la Universidad de Oxford y su diseño busca cubrir de forma más eficiente el área de la sección transversal de los canales con corrientes de marea (McAdam *et al.*, 2009; McAdam, 2011). La turbina fue diseñada para operar en serie (Fig. 47 (c)) o como una sola, maximizando la captación en zonas estrechas con corrientes de ríos o mareas. En la descripción, sus desarrolladores confirman que a través de pruebas a escala, utilizando análisis teóricos y modelaciones numéricas, la turbina THAWT muestra resultados varias veces mayor en comparación con turbinas del tipo hélice ubicadas en un mismo sitio. Las principales razones que destacan son: (1) el gran área de barrido que posee el rotor de la THAWT en comparación con el área de barrido circular limitado en profundidad de varios rotores tipo hélice y (2) el hecho de que la potencia de extracción energética de las corrientes de marea puede ser incrementada optimizando la tasa de bloqueo del flujo (lo que se traduce en mayores velocidades).

La unidad básica de generación consta de dos turbinas que posee un generador de accionamiento directo en el centro, requiriendo 4 puntos de apoyo y tres fundaciones de

soporte solamente. El dispositivo funciona bien en flujos de cualquier dirección, por lo que no requiere ser ajustado cuando la marea cambia su dirección (Fig. 48)

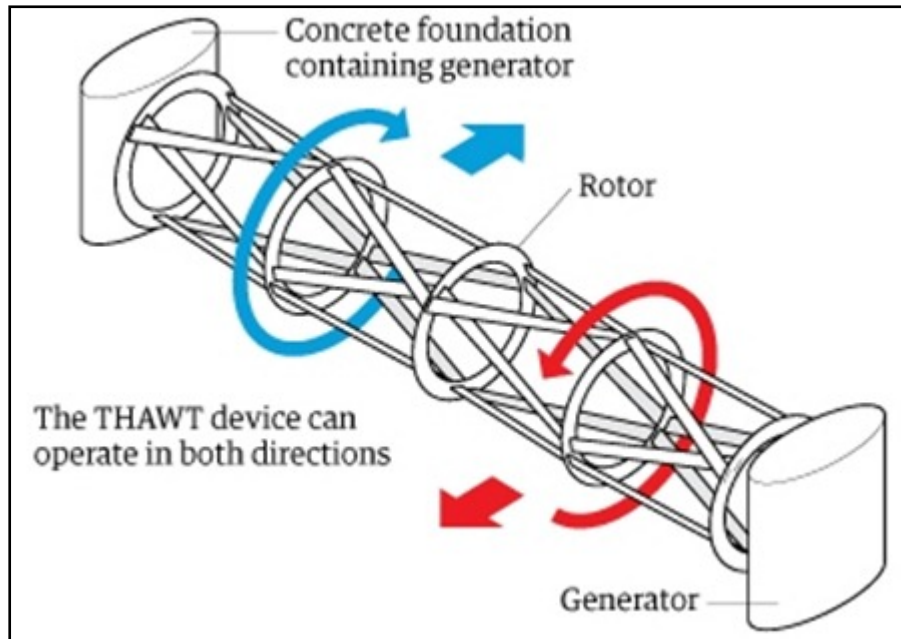


Figura 48: Funcionamiento de una turbina THAWT

Fuente: Kepler Energy, 2014.

Si bien la turbina es escalable para compatibilizar con diferentes sitios, un rotor típico posee 10m de diámetro, 60m de longitud y son instalados a 20m de profundidad, sin embargo el funcionamiento se estima hasta los 50m (McAdam R. , 2011). Las pruebas a escala documentadas por los autores mencionados, muestran que la unidad básica de 10m de diámetro y 120m de longitud (2 turbinas con 1 generador) podrían generar más de 4.4 MW a velocidades de 2 m/s, y más de 5.2 MW a 2.5 m/s. Además señalan que la unidad opera con una eficiencia razonable a bajas velocidades.

9.1.2 VIBRACIÓN INDUCIDA POR VÓRTICES (VIVACE)

También en sus etapas finales de desarrollo y con pruebas a escala real en el río St. Clair de Michigan, EE.UU., el Vortex Induced Vibration for Aquatic Clean Energy es tecnología distinta en cuanto a aprovechamiento de las corrientes. El dispositivo fue desarrollado en la Universidad de Michigan y el concepto de su diseño fue emulado del fenómeno natural destructivo de las vibraciones inducidas por vorticidad (VIV) y mejorado reproduciendo el comportamiento hidrocínético que utilizan los peces para desplazarse, lo que permite la extracción de energía incluso de corrientes más bajas (0.5 ~ 1 m/s) (Bernitsas *et al.*, 2008; Bernitsas, 2012). Las principales características de este método son (a) el aprovechamiento completo de la evolución del vórtice; (b) maximizar la vibración inducida por vórtice y (c) aprovechar la energía del VIV.

Uno de estos dispositivos consta de uno o más cilindros rugosos que se mueven hacia arriba y abajo a medida que la corriente pasa y genera vórtices, cada meneo del cilindro mueve los

imanes que lo sujetan a los pilares en los costados generando corriente continua (DC) (Fig. 49).

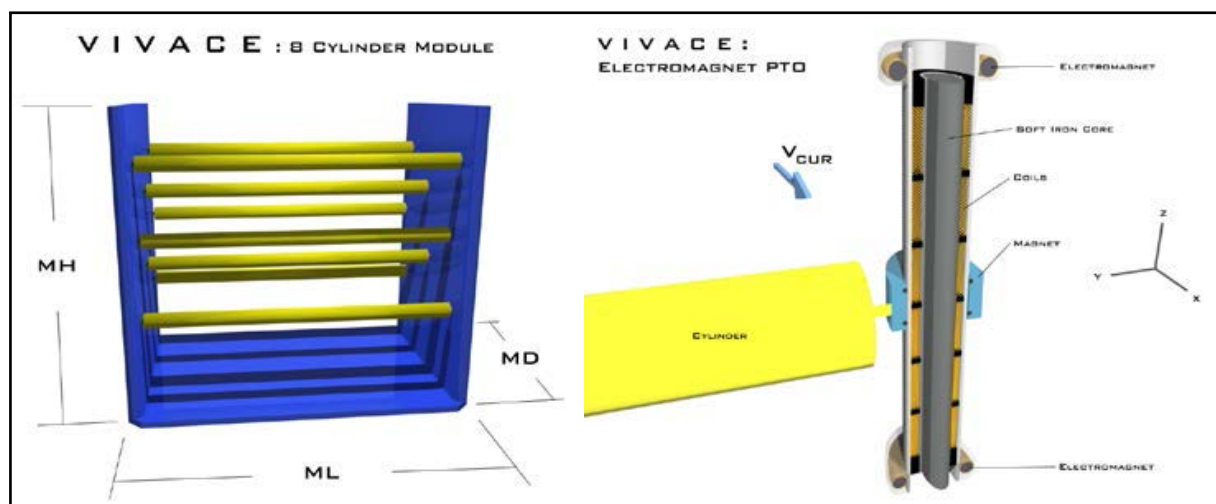


Figura 49: Funcionamiento de una turbina VIVACE

Fuente: Bernitsas et al., 2008

Tabla 7: Configuración del dispositivo VIVACE a distintas escalas de extracción

Escala	Potencia $P_{Vivace-har}$ (Mw)	Número de cilindros	Diámetro (m)	Largo (m)	Altura (m)	Superficie (m ²)
Giga	1000	32849	2	40	60	1497335
Mega	100	6570	2	20	30	258998
Grande	10	1314	1	20	15	14569
Medio	1	526	0.5	10	15	2428
Pequeño	0.1	328	0.2	4	5	92
Micro	0.05	657	0.1	2	5	45

Fuente: Bernitsas et al., 2008

El caso de una configuración a mega-escala, utilizando solamente un módulo en el convertidor se muestra en la tabla 8.

Tabla 8: Configuración a escala mega del elemento VIVACE

Longitud	20 m
Diámetro	1 m
Número de cilindros	1
Peso incluyendo fundaciones	8.675 tons
Volumen de un módulo	23.56 m ³
Volúmen de huella	20-30 años
Vida útil	1.5 m/s
h_{VIVACE}	0.22
Ratio de potencia	7.6 kW
Potencia neta (disponible 90%)	6.84 kW

Fuente: Bernitsas et al., 2008

El gran argumento de la utilización de dispositivos de extracción de energía por corrientes de marea, es que generan un impacto menor en los ecosistemas y en el medio ambiente (Garrett & Cummins, 2004; Sutherland *et al.*, 2006; Garrett, 2009), a diferencia de la utilización de elementos de contención que muchas veces afecta la migración de especies acuáticas.