

INSTITUTO UNIVERSITARIO NAVAL

ESCUELA DE CIENCIAS DEL MAR



Tesina de Licenciatura

**“Generación de mapas digitales de cotidales e isoamplitudes
para el
Río de la Plata”.**

Alumna: Flavia Analía Verónica Di Biase.

**Director: Ing. Enrique E. D’Onofrio.
Codirector: Dr. Walter César Dragani.**

Diciembre 2005

ÍNDICE

RESUMEN	1
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DE ESTE TRABAJO	
1.1- Introducción.....	3
1.2- Objetivos de este trabajo.....	5
1.3- Antecedentes	6
CAPÍTULO 2. ÁREA DE ESTUDIO	8
CAPÍTULO 3. INFORMACIÓN DE BASE UTILIZADA	
3.1- Datos de marea.....	12
3.2- Cartas náuticas utilizadas	23
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA APLICADA	
4.1- Digitalización de cartas náuticas	25
4.2- Método de análisis armónico de marea.....	26
4.3- Cartas de cotidales y de isoamplitudes	32
4.4- Transformación de Coordenadas	32
4.4.1- Proyección Mercator	33
4.4.2- Proyección Gauss Krüger.....	35
4.5- Método de interpolación espacial	38
4.5.1- Triangulación con interpolación lineal	39
CAPÍTULO 5. RESULTADOS	
5.1- Resultados de la digitalización de las cartas náuticas.....	40
5.2- Control de calidad de las alturas de marea	41
5.3- Análisis armónico de marea	42
5.4- Obtención de constantes armónicas para una grilla en el Río de la Plata	45
5.5- Cartas de cotidales y de isoamplitudes	54

5.5.1- Análisis de los resultados para las componentes de marea	
M ₂ y S ₂	54
5.5.2- Análisis de los resultados para las componentes de marea	
O ₁ y K ₁	54
CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	64
AGRADECIMIENTOS	66
REFERENCIAS	67

RESUMEN

El objetivo y las tareas desarrolladas en esta Tesina de Licenciatura se encuadran dentro de las actividades previstas en el proyecto “Desarrollo de un modelo zonal de predicción armónica de marea astronómica en el Río de la Plata” (Sección Mareas, Departamento Oceanografía, Servicio de Hidrografía Naval).

En el proyecto mencionado se propone desarrollar un sistema de programas que permita calcular la altura de la marea astronómica para cualquier posición dentro del Río de la Plata, con solo indicar sus coordenadas geográficas y la fecha deseada. Este sistema de programas podrá ser utilizado para comprobar modelos numéricos de dinámica de marea, en investigaciones sobre contaminación, geofísica y geodesia marina. Además será una valiosa ayuda a la navegación, contribuyendo al perfeccionamiento de las actuales Tablas de Mareas.

El objetivo específico de esta Tesina de Licenciatura es la determinación de las amplitudes y épocas de las componentes M_2 , S_2 , O_1 y K_1 para los nodos de una grilla representada por una matriz de 500 columnas por 500 filas, donde cada celda es de 21” en latitud por 29” en longitud que cubre el Río de la Plata, para ello se analizan alturas horarias de marea en 24 sitios del río.

Previamente al cálculo de los análisis armónicos de las alturas horarias de marea, se realiza un control de calidad de las mismas. El objetivo de este control es la detección de anomalías presentes en los registros o en el volcado de la información en soporte magnético (cuando correspondiera). Para ello se utiliza un programa desarrollado especialmente.

Como información de base cartográfica para la representación de las líneas cotidales y de isoamplitudes se emplean dos cartas náuticas del Servicio de Hidrografía Naval en proyección Mercator, esta cartografía se encuentra en formato papel. Como para este trabajo se necesita disponer de las mismas en formato electrónico se procede a la digitalización de la costa y la isobata de 5 m del Río de la Plata de ambas cartas. Durante el proceso de digitalización se obtienen pares de coordenadas ortogonales (x,y) referidas a un origen arbitrario fijado con anterioridad por el operador. Las coordenadas Mercator

digitalizadas se transforman a coordenadas geográficas (latitud y longitud) para disponer de un conjunto de datos homogéneos, referidos a un sistema de coordenadas común. Luego con la totalidad de las coordenadas geográficas obtenidas se genera una nueva carta y se construye una grilla de 21" en latitud por 29" en longitud, que cubre la totalidad del Río de la Plata.

Tanto para la obtención de las constantes armónicas de las componentes M_2 , S_2 , O_1 y K_1 en los nodos de la mencionada grilla como para la producción de las cartas cotidales y de isoamplitudes se utilizó el método de triangulación con interpolación lineal.

Finalmente cabe destacar que una de las aplicaciones directas de estos resultados será la utilización de las componentes de marea en el proyecto: "Estudio de la dinámica oceánica y atmosférica del Estuario del Río de la Plata mediante un sistema de modelado numérico integral", que actualmente se está desarrollando en el Centro de Investigaciones del Mar y de la Atmósfera (CIMA) de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires (PICT - 2002, 07-12246), para evaluar los resultados del modelo HamSOM (Hamburg Shelf Ocean Model).

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DE ESTE TRABAJO

1.1- Introducción

Las rítmicas oscilaciones diarias del nivel del mar, denominadas mareas, han despertado la curiosidad humana a través de todos los tiempos. La marea astronómica o lunisolar se define como la oscilación periódica del nivel del mar que resulta de la atracción gravitacional de la Luna y el Sol que actúan sobre la Tierra en rotación. Su carácter determinístico permite su predicción, utilizando la misma para la confección de las actuales Tablas de Marea (SHN, 2005).

Desde épocas remotas, se han realizado mediciones del nivel del mar en zonas costeras para explicar sus variaciones. A través de las observaciones las primeras civilizaciones llegaron a conclusiones intuitivas vinculando los movimientos de la marea con el paso de la Luna. Herodoto (484 A.C.) fue uno de los primeros en percatarse de las crecientes y bajantes diarias en cierto lugar del Mar Rojo. Posteriormente, Aristóteles (384 A.C.) fue quien a partir de las numerosas teorías existentes, asoció al fenómeno de la marea con ciertas fases de la Luna.

Recién en la segunda mitad del siglo XVII, Isaac Newton (1642 - 1727) formuló una teoría para estudiar el comportamiento de las fuerzas generadoras de marea que constituyó la base para estudios posteriores. Estos estudios dieron origen a lo que hoy se conoce como teoría de equilibrio o teoría estática de la marea, en ella se da como responsable de las fuerzas generadoras de marea a las atracciones gravitatorias de la Luna y el Sol transformando un problema dinámico en uno estático. En esta teoría las únicas fuerzas actuantes son la de la marea y la de gravedad.

El matemático francés Laplace (1749 - 1827) fue el primero en introducir en 1774 la hidrodinámica en la teoría de las mareas. Puso énfasis en la relación de los períodos celestes del sistema Tierra - Luna - Sol con los movimientos del agua a quien adjudicó dichos períodos. Estos pensamientos posibilitaron la introducción del concepto de ondas componentes de marea. Uno de los primeros en lograr un desarrollo completo de la altura de marea

como una serie de términos armónicos fue Doodson (1921). Posteriormente este método fue optimizado y adaptado a las nuevas formas de cálculos utilizando cuadrados mínimos (Foreman, 1977).

Las ondas de marea se generan en las grandes cuencas oceánicas, extendiéndose hacia la plataforma continental donde alcanzan amplitudes mucho mayores. Cada cuenca oceánica tiene sus modos naturales de oscilación lo que influye en la respuesta a la fuerza generadora de marea.

En el Río de la Plata, donde la profundidad media es aproximadamente de 5 m, no es posible la generación de ondas de marea propias en su interior. La onda de marea que se observa en el mismo es debida a la acción oceánica influida por las perturbaciones atmosféricas (Balay, 1961).

El estuario de Río de la Plata (Perillo et al., 1999) es de gran importancia para la Argentina y el Uruguay ya que, los puertos y ciudades más importantes están ubicados sobre sus márgenes, incluyendo ambas capitales (Buenos Aires y Montevideo, respectivamente). Además existen muchos centros industriales y turísticos de ambos países sobre sus costas. El estuario es, además, fuente de agua dulce para millones de habitantes y es área de desove y cría para muchas especies costeras (Cousseau, 1985; Boschi, 1988). Además conocer el comportamiento de la marea es de vital importancia pues de esto depende la seguridad y cartografía náutica.

Un primer paso hacia el conocimiento de la dinámica de marea lo constituye el cálculo de cartas de líneas cotidales y de isoamplitudes. Se entiende por línea cotidal al lugar geométrico de los puntos donde la pleamar (o bajamar), debida a una componente de marea, se produce al mismo tiempo. Por otra parte las líneas de isoamplitudes son puntos de igual amplitud de la componente estudiada.

Las primeras cartas de líneas cotidales y de isoamplitudes de la componente M₂, para el Río de la Plata, fueron realizadas por Balay, (1961). Posteriormente Legal (1995), para la misma zona confeccionó cartas de líneas cotidales y de isoamplitudes para las principales componentes de marea.

Con la utilización, en los últimos años, de sensores de presión en los levantamientos batimétricos y con la instalación de nuevas estaciones

permanentes de marea, como las de Hidrovía S.A., se dispone en la actualidad de mayor cantidad de información. Esto posibilita la construcción de nuevas cartas de líneas de cotidales y de isoamplitudes para optimizar el conocimiento de la dinámica de marea.

1.2- Objetivos de este trabajo

El objetivo central de esta Tesina de Licenciatura es la generación de mapas digitales de cotidales e isoamplitudes para las componentes M2, S2, O1 y K1 en el Río de la Plata. Por otra parte se calculan las amplitudes y fases, de las componentes mencionadas, para los nodos de una grilla representada por una matriz de 500 columnas por 500 filas, donde cada celda es de 21" en latitud por 29" en longitud que cubre la totalidad de Río de la Plata.

El objetivo y las tareas desarrolladas en esta Tesina de Licenciatura se encuadran dentro de las actividades previstas en el proyecto "Desarrollo de un modelo zonal de predicción armónica de marea astronómica en el Río de la Plata" (Sección Mareas, Departamento Oceanografía, Servicio de Hidrografía Naval). Este último proyecto tiene como objetivo desarrollar las técnicas y programas necesarios para calcular la altura de la marea astronómica en cualquier posición geográfica, dentro del Río de la Plata, utilizando una computadora personal. Los resultados obtenidos en esta Tesina de Licenciatura serán utilizados como una base de datos por el sistema de programas del proyecto mencionado.

Cabe destacar que los valores de las constantes armónicas serán utilizados en el proyecto: "Estudio de la dinámica oceánica y atmosférica del Estuario del Río de la Plata mediante un sistema de modelado numérico integral", que actualmente se está desarrollando en el Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA) de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires (PICT - 2002, 07-12246), conjuntamente con investigadores del SHN, para evaluar los resultados del modelo HamSOM (Hamburg Shelf Ocean Model).

La organización de este trabajo es la siguiente: En el capítulo 2 se describe la zona de estudio. En el capítulo 3 se presenta la totalidad de la información de base utilizada. La metodología a aplicar se describe en el

capítulo 4. Luego se muestran los resultados obtenidos (capítulo 5). Por último, se dan las conclusiones de este trabajo en el capítulo 6.

1.3- Antecedentes

Las primeras cartas de cotidales y de isoamplitudes de la componente M2, para el Río de la Plata, basadas en mediciones de marea, fueron realizadas por Balay, 1961. Del análisis de estas cartas (Figura 1.1) surge que la onda de marea ingresa al estuario a través de la línea imaginaria que une San Clemente con el cabo Santa María con amplitudes variables desde 3,0 pies sobre la costa argentina hasta 0,5 pies sobre la uruguaya (Balay, 1961). Posteriormente, Legal (1995) desarrolló cartas cotidales y de isoamplitudes para el Río de la Plata, de las componentes M2, N2, S2, O1, K1, P1, Q1, M4, Sa y Mf. Para ello realizó análisis armónico de las mediciones de marea disponibles hasta ese momento.

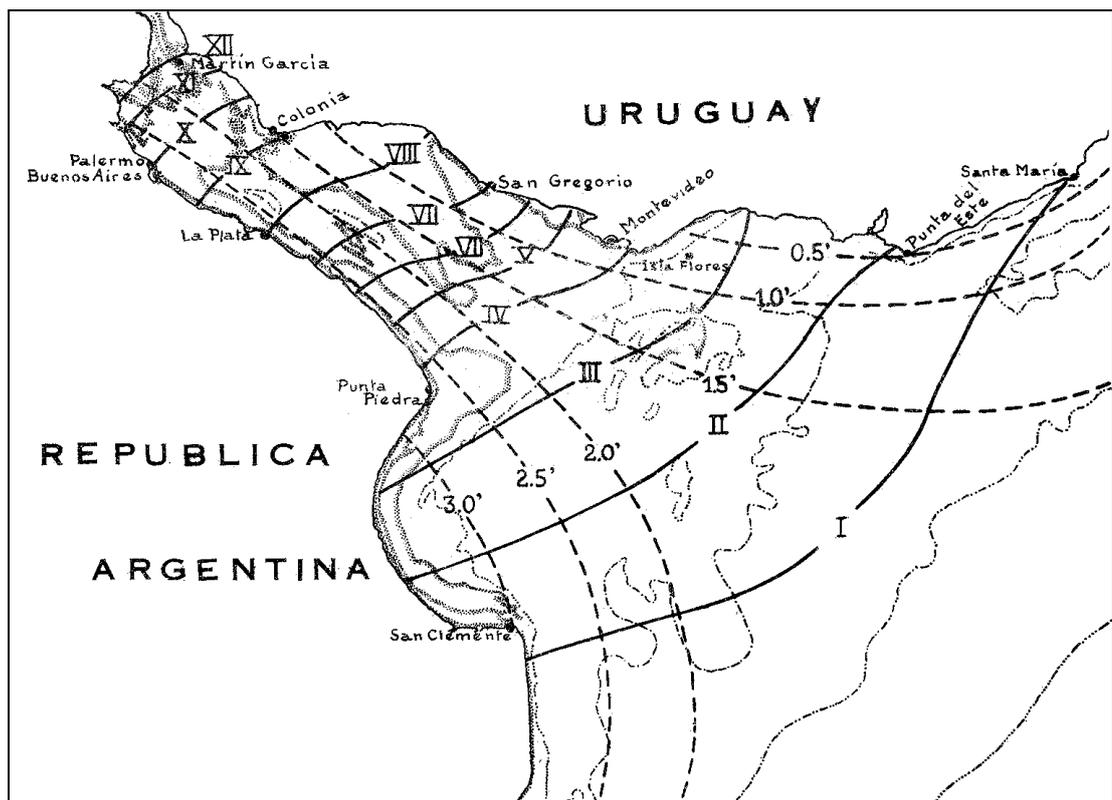


Figura 1.1. Mapa del Río de la Plata de cotidales y de isoamplitudes (Balay 1961).

Varios intentos de modelado de la marea en el Río de la Plata se pueden encontrar en la literatura especializada, para estudiar las características de la marea y de la onda de tormenta, por ejemplo (O'Connor, 1991; Vieira et al.,

1996, Albarracín, 1987, Molinari, 1986, Olalde, 1988). Modelos más complejos fueron realizados por Glorioso et al., 1994,1995, 1997; y Glorioso, 2000, Aunque los resultados obtenidos, por los autores mencionados, no son totalmente satisfactorios debido a que el estuario del Río de la Plata estaba ubicado cerca del borde norte de su dominio.

Palma et al., (2004) implementó un modelo numérico de tres dimensiones forzado con viento y marea. En el mismo se comienza con una versión tridimensional barotrópica de la circulación forzada por vientos y marea. Continúa con un planteo más complejo de una plataforma estratificada por densidad forzada también por las descargas de agua dulce y la presencia de las corrientes de borde oeste Los resultados obtenidos indican una mejora en la representación de los efectos producidos por el viento y la marea respecto de trabajos anteriores.

Finalmente debe destacarse el modelo tridimensional en ecuaciones primitivas HamSOM (Hamburg Shelf Ocean Model) implementado por la Dra. Claudia Simionato en el Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). Este modelo fue desarrollado en la Universidad de Hamburgo por Backhaus (1983, 1985) y ha sido aplicado en muchos mares costeros del mundo (ver, por ejemplo, Backhaus et al., 1987; Rodríguez et al., 1991; Stronach et al., 1993; Simionato et al., 2001 y 2002) demostrando ser una herramienta muy robusta para el estudio de la dinámica de las aguas de plataforma y estuarios (Simionato et al., 2003).

CAPÍTULO 2

ÁREA DE ESTUDIO

El Río de la Plata se extiende entre las latitudes 34°00'S y 36°20'S, y entre las longitudes 55°00'W y 58°30'W, aproximadamente dejando a Uruguay y a la provincia de Buenos Aires (Argentina) al noreste y sudoeste, respectivamente. Un tratado firmado por ambos países fija el límite septentrional del Río de la Plata en el paralelo que pasa por punta Gorda, en la costa oriental; sobre este paralelo se encuentra el kilómetro cero del río Uruguay (Servicio de Hidrografía Naval, 2001).

La longitud (NO–SE) del Río de la Plata es de 323 km desde el origen que se ha señalado anteriormente, hasta una línea que une Punta del Este, en la costa uruguaya, con Cabo San Antonio, en la costa argentina. Dicho límite, con una longitud de 221 km, constituye el límite exterior del Río de la Plata separando geográficamente el Océano Atlántico de las aguas interiores de este río. La costa norte tiene 416 km de largo, mientras que la costa sur mide 393 km (Servicio de Hidrografía Naval, 2001) (Figura 2.1). El Río de la Plata forma de la cuenca hidrológica más extensa del globo abarcando unos 3.200.000 km², de los cuales 900.000 km² corresponden a Argentina.

El Río de la Plata es un estuario (Perillo et al., 1999) que se forma de la unión de los ríos Paraná y Uruguay cuyos caudales medios son de alrededor de 16000 y 6000 m³/s respectivamente, constituyendo una descarga total media mayor que 22000 m³/s (CARP, 1989; Nagy et al., 1997). En consecuencia transportan enormes cantidades de sedimentos, por lo que el estuario presenta un gran número de bancos de arcilla y limo. Los mayores caudales de ambos ríos se presentan durante el otoño y no inciden significativamente en los niveles del Río de la Plata (D'Onofrio et al., 1999).

De acuerdo con su profundidad y el grado de influencia marina sobre la salinidad de sus aguas, el estuario puede ser dividido en tres regiones principales: Interior, Medio y Exterior (CARP, 1989; AA-AGOSBA-ILPLA-SHN, 1997; D'Onofrio et al., 1999; Dragani et al., 2004).

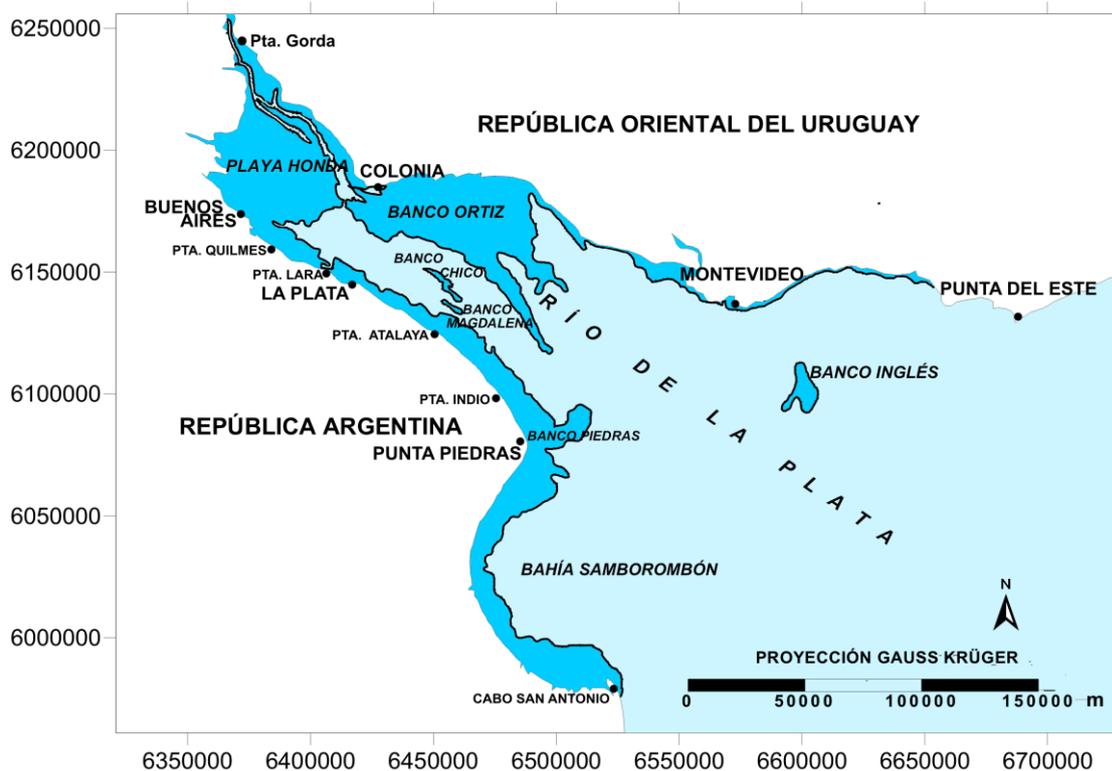


Figura 2.1. Mapa de ubicación.

El Río de la Plata Interior, comprende el tramo que va desde el origen hasta la línea Buenos Aires-Colonia (Figura 2.1). Su color es marrón claro, esto se debe a la enorme cantidad de limo en suspensión que posee (Figura 2.2). En esta sección sus orillas distan entre sí 50 km. El lecho es poco profundo (alrededor de 5 m); un enorme banco denominado Playa Honda puede considerarse prolongación de los depósitos del delta del Paraná. Además presenta baja salinidad (aproximadamente 0.3psu) (Pineda Rojas, 2003).

El Río de la Plata Medio, se extiende desde la línea Buenos Aires-Colonia hasta la línea Punta Piedras-Montevideo (Figura 2.1) aquí se produce un paulatino distanciamiento de las riberas hasta alcanzar un ancho de 100 km. En esta zona, la profundidad es de 5 a 10 m, y su salinidad varía entre 0.3 y 5psu (Pineda Rojas, 2003).

Por último, el Río de la Plata Exterior, se extiende desde Punta Piedras-Montevideo hasta la línea que une Cabo San Antonio-Punta del Este (Figura 2.1). Se caracteriza por su ensanchamiento y por un progresivo aumento de la

profundidad, que llega a ser de 18 m en el límite externo. Desde el comienzo de esta región empieza a aumentar la salinidad del agua, presentando un rango de 5 a 25psu (Pineda Rojas, 2003). Diferentes aspectos relacionados con la distribución de la salinidad en el Río de la Plata, así como con sus variaciones temporales, pueden consultarse en CARP (1989), Bazán et al., (1991) y (1993), Guerrero et al., (1997) y Simionato et al., (2001). En todo el Río de la Plata el lecho de los bancos está formado por limo arenoso, y aún por arena consolidada, mientras que el de los canales es limo. Además de los bancos, el fondo del río presenta barras, como la de Punta Indio.



Figura 2.2. Imágen satelital del Río de la Plata.

Desde la época colonial este río es la puerta de entrada y salida de lo que antes fuera el Virreynato del Río de la Plata y actualmente es la República Argentina. A medida que fue pasando el tiempo fue aumentando el calado de los buques haciéndose necesario profundizar y balizar sus canales. Actualmente éste es un trabajo que se realiza en forma continua y que demanda un gran costo, pero este esfuerzo se halla justificado ampliamente, pues por el Río de la Plata entran el 92% y salen el 75% de las mercaderías importadas (Servicio de Hidrografía Naval, 2001).

Desde el punto de vista geopolítico el Río de la Plata es considerado una de las regiones más importantes de la Argentina, ya que:

- Es el principal acceso al territorio y a los países denominados "del Plata".
- Tiene decisiva influencia en las comunicaciones entre las diferentes regiones del país.
- Es una de las vías de salida hacia el exterior más importantes de los productos del campo y de la industria.
- En su margen derecha se halla situada Buenos Aires, capital política, cultural y económica de la Argentina.

El régimen de marea en el río es de carácter semidiurno, debido a que la componente lunar M2 (con una amplitud de 0,27 m en Buenos Aires) representa más del 80% de la energía total de la marea en el estuario. Sin embargo, existen desigualdades diurnas significativas, mayormente causadas por la componente O1 (cuya amplitud en Buenos Aires es de 0,15 m). La onda de marea ingresa al Río de la Plata desde la plataforma continental y sufre un proceso de adaptación a la configuración geográfica en la zona Exterior hasta la línea imaginaria que une Punta Piedras-Montevideo (CARP, 1989; D'Onofrio et al., 1999).

La onda de marea se propaga a lo largo del estuario como una onda libre de gravedad externa, tardando aproximadamente 12 horas en recorrerlo de un extremo a otro. Debido a que esta duración es casi similar al período de la marea, dos máximos y dos mínimos pueden coexistir al mismo tiempo dentro del estuario. Además, se observa un incremento uniforme de la amplitud de la componente M2, desde la costa uruguaya hacia la argentina, siendo en general las curvas de isoamplitudes paralelas a la línea de costa, presentando valores máximos en la Bahía de Samborombón, donde ocurre la mayor disipación de la energía (CARP, 1989; Simionato et al., 2002).

Los vientos que impactan más superficialmente sobre el Río de la Plata son el pampero y la sudestada. Cuando el pampero sopla arrastra las aguas hacia la ribera septentrional y el nivel del agua sobre la costa argentina suele descender bastante más de lo normal. En contraposición la sudestada provoca inundaciones en la costa argentina resultando la parte de la planicie fluvial comprendida entre Buenos Aires y La Plata casi totalmente inundada produciéndose un efecto contrario en la costa uruguaya.

CAPÍTULO 3

INFORMACIÓN DE BASE UTILIZADA

3.1- Datos de marea

Para la realización de este trabajo se analizaron alturas horarias de marea de 24 sitios ubicados sobre el Río de la Plata (Figura 3.1).

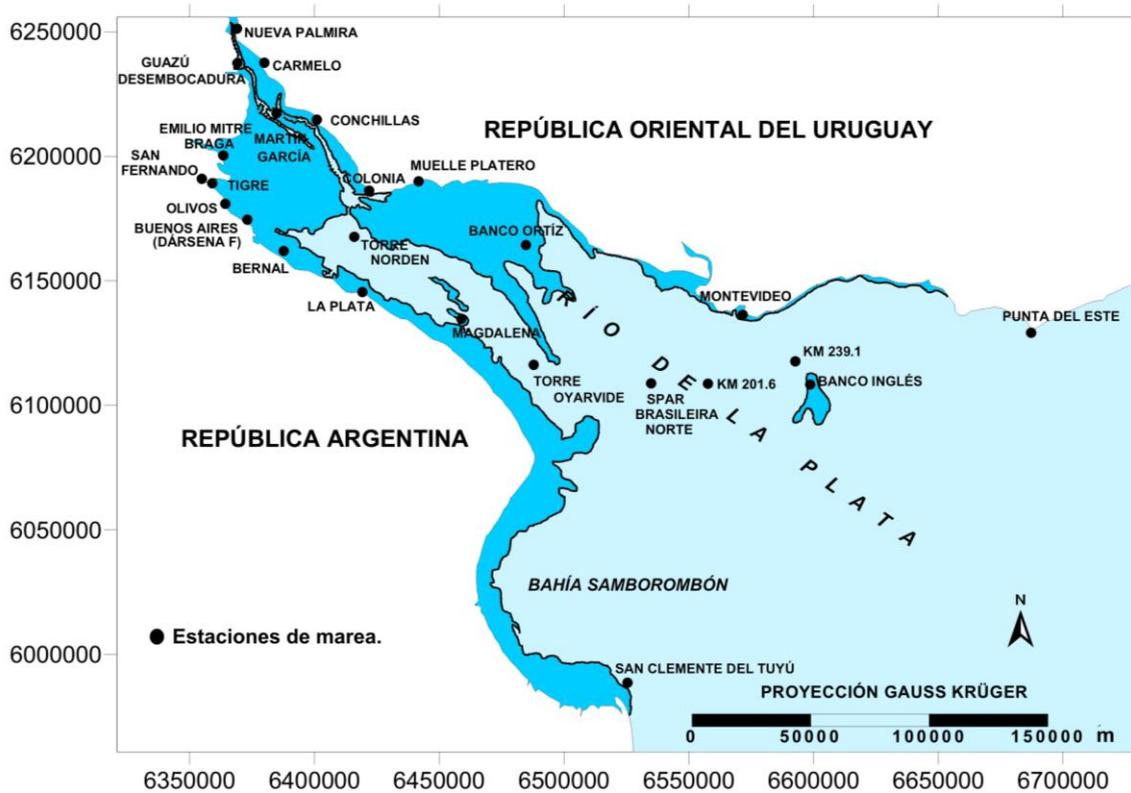


Figura 3.1 Mapa de las estaciones mareográficas utilizadas.

En la Tabla 3.1 se presentan las coordenadas geográficas y Gauss Krüger (Xg, Yg), el período y la duración de la medición en cada sitio. En todos los casos se dispone de alturas horarias de marea sin interrupciones en el período indicado.

ESTACIONES	LATITUD (S)	LONGITUD (w)	Xg	Yg	DURACIÓN (DÍAS)	PERÍODO
PUERTO DE PUNTA DEL ESTE	34°57'42"	54°57'06"	6129150.76	6687230.43	365	01/01/03-31/12/03
SAN CLEMENTE DEL TUYU (Muelle)	36°21'30"	56°42'30"	5988645.50	6525465.53	792 971.5	01/03/87-30/04/89 01/03/93-28/10/95
KM 239.1	35°05'00"	55°59'00"	6117654.89	6592717.12	141 91	12/08/03-31/12/03 01/04/03-30/06/03
PUERTO DE MONTEVIDEO	34°54'30"	56°13'30"	6136337.72	6571582.26	365	01/04/69-31/03/70
CANAL PUNTA INDIO (KM. 201.6 / ex Par Uno)	35°10'00"	56°22'00"	6108698.80	6557698.76	365	01/01/84-31/12/84
SPAR BRASILEIRA NORTE	35°10'30"	56°37'00"	6108815.19	6534922.78	365	01/02/03-31/01/04
CANAL PUNTA INDIO (Torre Oyarvide)	35°06'00"	57°08'00"	6116270.55	6487843.07	4380	01/01/80-31/01/92
BANCO ORTIZ	34°40'00"	57°10'00"	6164361.89	6484744.95	33	26/11/04-29/12/04
MAGDALENA	34°56'00"	57°27'00"	6134676.38	6458886.89	365	01/01/03-31/12/03
PUERTO LA PLATA	34°50'00"	57°53'00"	6145506.88	6419197.83	517 1734	01/10/94-29/02/96 01/01/99-30/09/03
MUELLE PLATERO	34°26'30"	57°38'30"	6189930.72	6441737.69	243	01/07/01-28/02/02
TORRE NORDEN	34°38'00"	57°55'00"	6167667.66	6415946.33	268	05/12/00-30/08/01
COLONIA DEL SACRAMENTO	34°28'30"	57°51'00"	6186210.68	6421903.92	485	30/11/80-31/05/81
BERNAL	34°40'55"	58°13'33"	6161973.30	6387661.60	39	12/03/04-20/04/04
PUERTO DE BUENOS AIRES (Dársena F)	34°33'45"	58°24'00"	6174575.77	6373051.49	6935	01/01/82-31/12/00
OLIVOS	34°30'00"	58°29'00"	6180924.78	6364288.99	184	01/05/49-31/10/49
SAN FERNANDO	34°26'00"	58°34'00"	6189169.70	6359060.58	29	27/11/85-26/12/85
TIGRE	34°25'00"	58°34'30"	6190954.46	6354844.05	34	29/08/96-02/10/96

CANAL EMILIO MITRE DESTACAMENTO BRAGA	34°19'00"	58°30'00"	6200332.43	6363494.57	276	01/05/03-31/01/04
MARTÍN GARCÍA	34°11'00"	58°15'00"	6217261.90	6384764.30	365	01/01/80-01/12/80
CONCHILLAS	34°12'30"	58°04'30"	6214672.51	6400927.31	33	21/08/96-22/09/96
GUAZÚ DESEMBOCADURA	34°00'00"	58°25'00"	6237399.36	6369116.51	365	01/01/03-31/12/03
CARMELO	34°00'00"	58°18'00"	6237542.29	6379895.89	32.7	21/08/96-23/09/96
NUEVA PALMIRA	33°52'30"	58°25'00"	6251266.13	6368925.06	32.7	21/08/96-23/09/96

Tabla 3.1. Posiciones de las estaciones de marea, duración y período de las mediciones.

A continuación se realiza una enumeración sintética de los sitios donde se realizaron las mediciones de alturas de marea, y una breve descripción de los equipos utilizados.

Como parte de la obra de Modernización, Ampliación, Operación y Mantenimiento del Sistema de Señalización y Tareas de Redragado y Mantenimiento de la Vía Navegable Troncal Santa Fe –Océano, Hidrovía S.A. ha instalado, y actualmente mantiene, un sistema automático de obtención de alturas hidrométricas para toda la vía navegable (García, 2001). Para este trabajo se han utilizado los datos de alturas de marea de algunas de las estaciones mareográficas pertenecientes a esta empresa, las cuales se indican a continuación.

En función de la ubicación geográfica de los mareógrafos y por consiguiente, de las variaciones de alturas hidrométricas, cada estación tiene un intervalo de muestreo propio de adquisición de datos (Tabla 3.2) (García, 2001).

Ubicación	Estación	Intervalo de muestreo (min)
Río de la Plata	Km 239,1	20
	Brasileira Norte	20
	Magdalena	20
	Canal Emilio Mitre (Braga)	20
Río Paraná Guazú	Guazú Desembocadura	30

Tabla 3.2. Intervalo de muestreo de datos de cada estación (Hidrovía S.A.)

Para acceder a los datos de alturas, Hidrovía S.A. implementó un sistema formado por una estación central, estaciones remotas denominadas mareógrafos, y dos estaciones secundarias o réplicas.

Operativamente el sistema funciona de la siguiente forma: la estación central consulta a las distintas estaciones remotas en forma periódica, captura los datos almacenados en las mismas y los guarda en su disco (memoria no volátil), para posteriormente replicar dichos datos a las dos estaciones secundarias (García, 2001). La Figura 3.2 muestra el esquema de sistema mencionado.

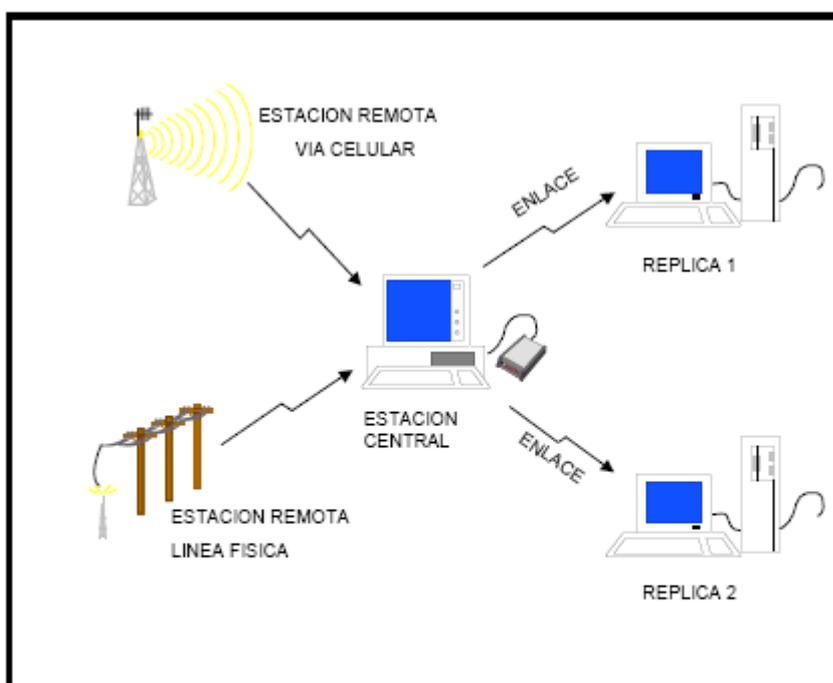


Figura 3.2. Diagrama de configuración de la red de estaciones mareográficas de Hidrovía S.A. (García, 2001).

Las transmisiones entre las estaciones remotas y la estación central, y entre esta y las réplicas se realiza en forma telefónica ya sea por celular o por línea fija. La estación central, que se encuentra ubicada en las oficinas de la Subsecretaría de Transporte Ferroviario, Fluvial y Marítimo, está compuesta por una computadora personal (PC), una impresora y un modem con una línea telefónica fija. A través de un software de aplicación específico la computadora administra en forma automática, las llamadas a las distintas estaciones remotas siguiendo una agenda de comunicaciones. También en horarios predeterminados los datos que recibe la estación central se replican a dos estaciones secundarias ubicadas en las oficinas de Hidrovía S.A. para su

control y utilización en el procesamiento de relevamientos batimétricos (García, 2001).

A los efectos de mantener sincronizados los relojes de todas las estaciones remotas con la hora oficial, la estación central registra en cada comunicación con los mareógrafos la hora de cada uno de ellos, y la compara con la hora propia. Si existieran diferencias superiores a la tolerancia, un sistema de alarmas lo indica y el operador ejecuta un comando que se denomina “puesta en hora” para corregir las diferencias. La hora de la estación central se contrasta periódicamente con la hora oficial (García, 2001). Esta corrección permite disminuir notablemente el error debido a las marchas de los relojes de los mareógrafos permitiendo mejorar la precisión de la constante armónica amplitud obtenida mediante análisis armónicos de marea.

Los mareógrafos están compuestos por una unidad de procesamiento de operaciones y almacenamiento de datos (datalogger), un sensor de nivel de agua, un modem, un teléfono y una antena de transmisión (para el caso de celulares). También el equipamiento estándar de una estación remota comprende protecciones para descargas eléctricas atmosféricas ya sea del conjunto, a través de un pararrayos, de la conexión telefónica física mediante protecciones gaseosas, y de los sensores de presión mediante cables de puesta a tierra de los “bulbos terminales” de los sensores (García, 2001).

Los sensores de presión utilizados para medir marea poseen compensación por diferencias en la presión atmosférica y registran en forma lineal respecto a las variaciones del agua para todo su rango de medición que es de 0 a 10 m. La precisión de este elemento es de ± 1 cm. En las Figuras 3.3 y 3.4 pueden apreciarse el datalogger en conjunto y un detalle de las conexiones de los sensores (García, 2001).

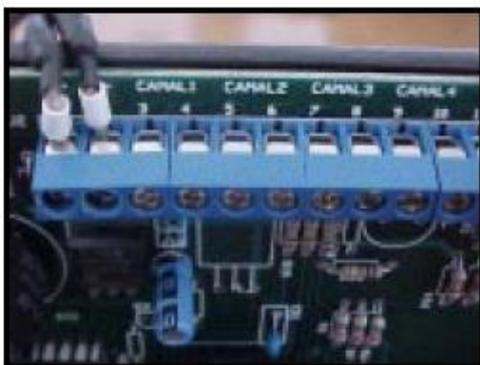


Figura 3.3. Datalogger

Figura 3.4. Conexiones de los sensores

Estos equipos están normalmente instalados en lugares remotos, por lo que la alimentación eléctrica se realiza mediante sistemas fotovoltaicos de 12 volts, compuestos por paneles solares y baterías (García, 2001). Los equipos se encuentran instalados sobre muelles, sobre balizas, y sobre boyas tipo Spar. Sobre estas últimas se encuentran los registradores de las estaciones de Km 239,1, Brasileira Norte y Magdalena. La Figura 3.5 muestra una boya tipo Spar, similar a las utilizadas en las estaciones mencionadas.



Figura 3.5. Boya tipo Spar.

Aprovechando la existencia de balizas de señalización se realizaron adaptaciones sobre éstas para disponer equipos mareógrafos, por ejemplo en la estación de Guazú Desembocadura (Figura 3.6).



Figura 3.6. Estación Guazú Desembocadura.

La estación Emilio Mitre Braga es un ejemplo de una estación ubicada sobre un muelle (Figura 3.7).



Figura 3.7. Estación Emilio Mitre Braga.

En el **Puerto de Buenos Aires** existen 2 estaciones mareográficas, una perteneciente a la Dirección Nacional de Vías Navegables (DNVN) y otra al Servicio de Hidrografía Naval (SHN). La correspondiente a la DNVN comenzó a

registrar en 1905 y continúa haciéndolo hasta la actualidad. Se encuentra ubicada próxima al Antepuerto Sur en la Dársena Este. La estación del SHN fue construida sobre el muelle del Club de Pescadores ubicada frente al Aeroparque Jorge Newbery de esta ciudad (Figura 3.8). Las mediciones en ésta última comenzaron en el año 1950 y continúan hasta la actualidad.

Tanto la estación perteneciente a la DNVN como la del SHN poseen registradores analógicos cuyo esquema se presenta en la Figura 3.9 (UNESCO, 1985). Esta última, además, está equipada desde el año 1970 con registradores telemétricos de marea, que permiten recibir la información en tiempo real en el SHN.



Figura 3.8. Estación mareográfica Palermo.

Los registradores de las estaciones de **Martín García, San Fernando, Olivos, La Plata, Conchillas, Carmelo, Nueva Palmira, Colonia, Montevideo, Muelle Platero y Punta del Este**, también son del tipo analógico, cuyo esquema se presenta en la Figura 3.9 (UNESCO, 1985).

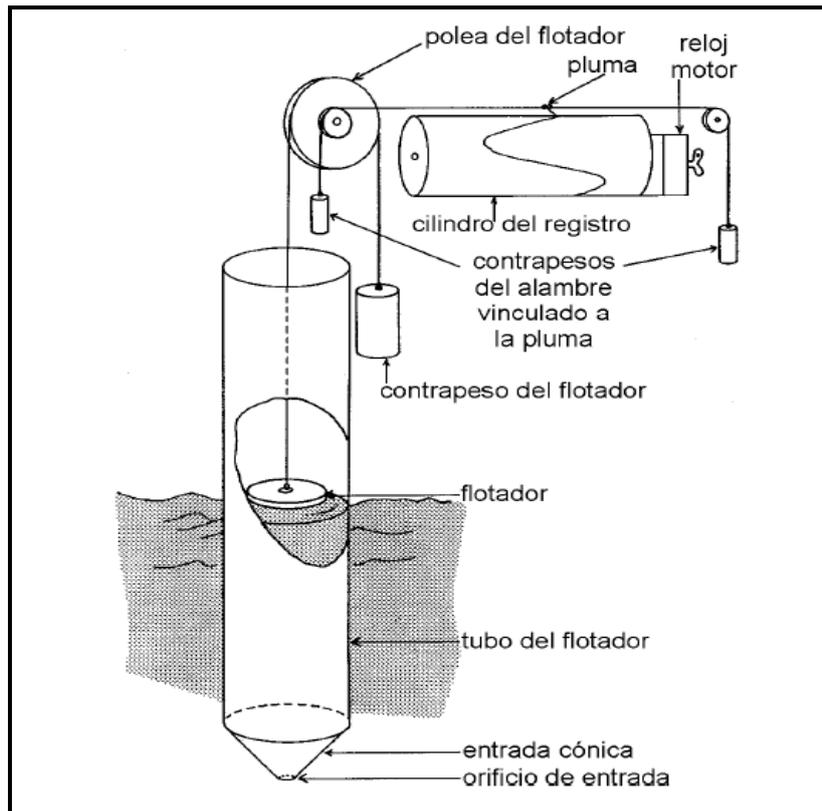


Figura 3.9. Esquema básico de un mareógrafo a flotador (UNESCO, 1985).

La estación **Torre Oyarvide** (SHN) se encuentra ubicada al sudoeste y a 1,2 millas del eje del canal Punta Indio, entre km 136 y 133,4 (Pares N°26 y 27) (Figura 3.10). Consiste en una torre, constituida por cuatro pilotes, con una plataforma en su parte superior, sobre la cual hay una casilla que contiene un equipo registrador marca Stevens AxSys MPU (Figura 3.11).



Figura 3.10. Lancha Hidrográfica ARA "Cormorán" en Torre Oyarvide.



Figura 3.11. Equipo Stevens AxSys MPU.

En la estación mareográfica **Bernal** las mediciones fueron realizadas con un instrumento Interocean System modelo S4 (Figura 3.12). Este no posee partes móviles y fue diseñado fundamentalmente para medir la intensidad y la dirección de la corriente horizontal en cualquier medio acuoso (mar, ríos o lagunas). También registra marea con un sensor de presión.

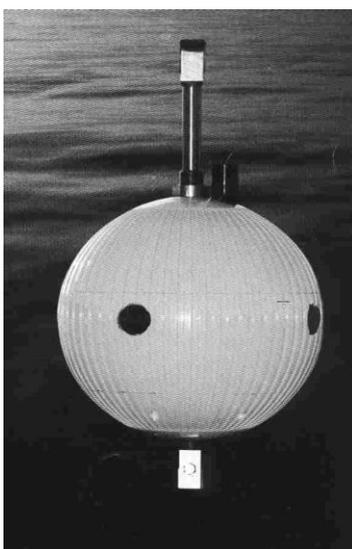


Figura 3.12. Instrumento Interocean System modelo S4.

Los datos de marea de las estaciones **Tigre, Banco Ortiz y Banco Inglés**, se obtuvieron con un sensor de presión AANDERAA WLR7 (Figura 3.13).



Figura 3.13. Sensor AANDERAA WLR7.

El mareógrafo WLR7 es un registrador de marea autocontenido fondeable, de reducido tamaño (aproximadamente 45 cm de alto y 12,8 cm de diámetro) y bajo peso (alrededor de 15 kg fuera del agua y de 11 kg sumergido), de alta precisión, capaz de operar dentro de un amplio rango de profundidades y temperaturas) (D'Onofrio et al., 1982). Las variaciones del nivel de agua, temperatura y tiempo son registradas en una memoria de estado sólido. Las profundidades máximas de operación varían según los modelos dentro del rango 200m/6000m, y las temperaturas deben encontrarse dentro del rango $-3^{\circ}\text{C}/35^{\circ}\text{C}$. La precisión del registro es de 0,01% del rango de profundidades y la resolución del registro es de 0,001% del rango de profundidades. El tiempo se mide con un reloj de cristal de cuarzo que tiene una precisión de ± 2 seg por día para una temperatura de 0 a 20°C . El tiempo de integración de la señal: es de 40seg (para filtrar la ola).

La estación **Pilote Torre Norden**, perteneciente a Riovia S.A., está montada como lo dice su nombre sobre un pilote de hormigón armado (Figura 3.14). Posee un sensor de presión y temperatura marca Aanderaa, modelo

WLTS 3791. Estos sensores, están preparados para medir la presión y la temperatura del agua.



Figura 3.14. Pilote Torre Norden.

La estación mareográfica **San Clemente del Tuyú** está montada sobre el muelle de pescadores (Figura 3.15). Consta de un registrador marca Leupold Stevens (Figura 3.16), conectado a un Telemark y este último a un teléfono que permita la interrogación remota (registradores telemétricos).



Figura 3.15. Vista de la estación mareográfica San Clemente del Tuyú.

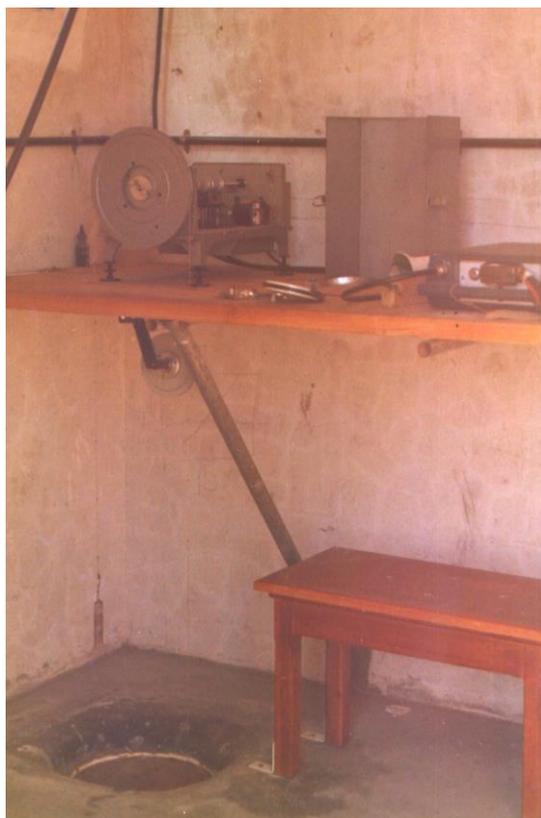


Figura 3.16. Mareógrafo Leupold Stevens.

3.2- Cartas náuticas utilizadas

En este trabajo se necesita disponer de las costas y las isobatas de 5 m en formato electrónico, ya que la misma da una buena representación de los bancos del Río de la Plata. Esta información se encuentra en cartografía en papel, la cual se describe a continuación en forma concisa. Para cada carta se brinda el nombre y número de la misma, el tipo de proyección, la escala, las unidades en las que se presentan las profundidades, los límites geográficos, el año y el número de edición.

Nombre: Río de la Plata Medio y Superior.

Carta Náutica H-116.

Proyección: Mercator.

Escala: 1/250.000 (en latitud media)

Profundidades: en metros.

Límites:	Norte:	33° 50' S.
	Sur:	35° 35' S.
	Este:	55° 50' W.

Oeste: 58° 54' W.

Año: 1999.

Edición: 4a.

Compilación de levantamiento integral del área del Río de la Plata (1964)
Decreto Ley 8984-63.

Levantamientos de los Servicios de Hidrografía Naval Argentino y Uruguayo
hasta 1994.

Restitución aerofotogramétrica con apoyo del Servicio de Hidrografía Naval
hasta 1992.

Actualización de cartas de imagen satelital del Instituto Geográfico Militar hasta
1994.

Nombre: **Río de la Plata Exterior.**

Carta Náutica H-113.

Proyección: Mercator.

Escala: 1/250.000 (en latitud media).

Profundidades: en metros.

Límites:	Norte:	34° 42' S.
	Sur:	36° 26' S.
	Este:	54° 20' W.
	Oeste:	57° 25' W.

Año: 1999.

Edición: 2a.

Compilación de levantamiento integral del área del Río de la Plata (1964)
Decreto Ley 8984-63.

Levantamientos de los Servicios de Hidrografía Naval Argentino y Uruguayo
hasta 1994.

Restitución aerofotogramétrica con apoyo del Servicio de Hidrografía Naval
hasta 1992.

Actualización de cartas de imagen satelital del Instituto Geográfico Militar hasta
1994.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA A APLICAR

4-1. Digitalización de cartas náuticas

Para la digitalización de las cartas mencionadas en el ítem 3.2 se utiliza un tablero digitalizador marca “Summa Grid” modelo “GTCO Calcomp Peripherals SG53648”, facilitado por la Comisión Nacional para el Límite Exterior de la Plataforma Continental (COPLA).

La digitalización con tablero es sin duda la más utilizada y la que mejor calidad ofrece. La carta a digitalizar se fija al tablero digitalizador y sobre ésta se pasa un cursor electrónico plano con múltiples funciones que va capturando las coordenadas X e Y de cada punto que recorre.

Para la digitalización de isolíneas existen dos técnicas, una se basa en la digitalización automática y continua de puntos a intervalos regulares y, la otra, es la digitalización punto a punto de coordenadas seleccionadas (Moldes Teo, 1995). La primera de las técnicas, es la que se utilizó en este trabajo. A medida que el cursor recorre la isolínea va almacenando automáticamente las coordenadas de los puntos a intervalos regulares y prefijados de antemano. En cambio, en la segunda, se eligen los puntos cuyas coordenadas serán almacenadas.

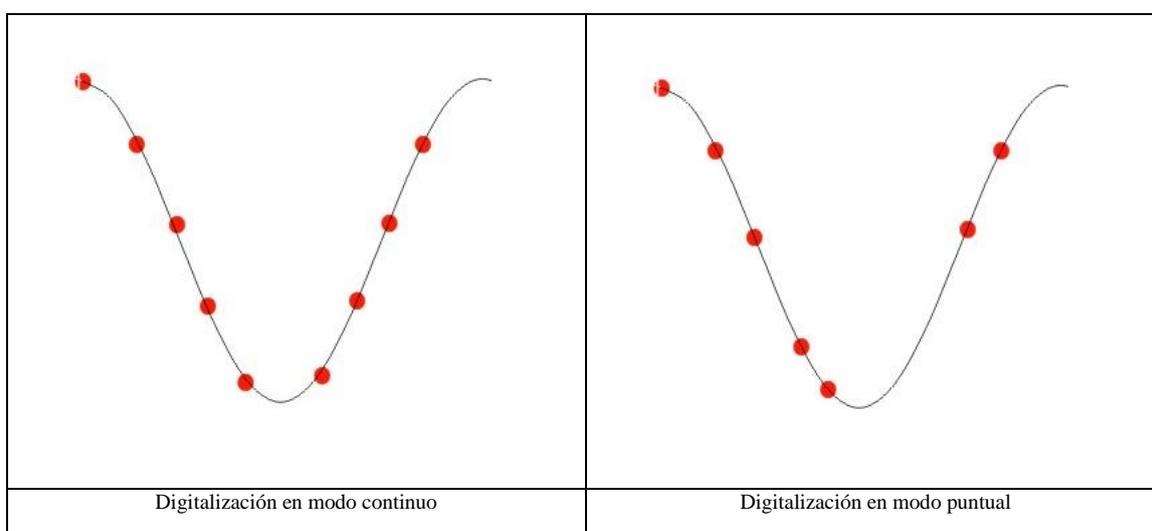


Figura 4.1. Técnicas para la digitalización de líneas.

En la Figura 4.1 se ilustran ambas técnicas. El gráfico del panel de la izquierda ejemplifica la técnica de digitalización automática o continua de coordenadas, observándose que la adquisición de datos se realiza a intervalos constantes previamente establecidos. Por otro lado, la figura del panel de la derecha corresponde a la técnica de digitalización punto a punto. En esta puede advertirse que el operador es el que decide qué puntos se digitalizan pulsando uno de los botones del cursor. Con ésta técnica, si el operador es metódico, las líneas quedan definidas de forma óptima.

Se adoptó el modo continuo o automático para la digitalización de costas e isobatas ya que, para este trabajo, se lo consideró más conveniente que el método de adquisición puntual por la magnitud de información a digitalizar.

4.2- Método de análisis armónico de marea

La teoría estática o de equilibrio de la marea se fundamenta en las siguientes hipótesis:

1. La Tierra es irrotacional, es decir, que se desprecia el giro sobre su propio eje.
2. La Tierra se considera una esfera sin continentes, cubierta por una capa de agua de espesor constante en estado no perturbado.
3. La inercia de las masas de agua se desprecia con lo cual se obtiene una respuesta inmediata a la acción de las fuerzas generadoras de marea.
4. No se considera la fricción.
5. Sobre las aguas actúan solamente las fuerzas generadoras de marea solar y lunar y la de atracción de gravedad terrestre.
6. Las aguas forman una superficie equipotencial donde las fuerzas anteriores están en equilibrio.

Schureman (1988) muestra que en el marco de la teoría de equilibrio, la altura de marea astronómica puede ser expresada por la suma de un cierto número de términos armónicos u ondas. Pero las hipótesis planteadas, producto de la simplificación de un problema complejo, hacen que los resultados obtenidos no concuerden con la marea astronómica real. Sin embargo los periodos de las componentes armónicas de la marea astronómica real, coinciden con los determinados utilizando la teoría de equilibrio.

De acuerdo con lo anterior las alturas de la marea astronómica real (y) pueden ser expresadas de la siguiente forma (Pugh, 1987):

$$y(t) = \sum_{j=1}^Q R_j \cdot \cos(\sigma_j t - \alpha_j) \quad [4.1]$$

Donde t es el tiempo de ocurrencia de la altura y , R_j la amplitud de la componente j , σ_j y α_j son la velocidad angular y la época (fase) de la componente j respectivamente.

Q = número de ondas componentes de la marea

La ecuación [4.1] constituye la base del análisis armónico de marea. De la teoría de equilibrio se conoce el valor de σ_j , $y(t)$ son alturas horarias de marea registradas por alguno de los métodos conocidos, siendo R_j y α_j las incógnitas.

Para vincular la ecuación [4.1] al datum de marea se le suma el nivel medio del mar (S_0) referido al mismo.

$$y(t) = S_0 + \sum_{j=1}^Q R_j \cdot \cos(\sigma_j t - \alpha_j) \quad [4.2]$$

La ecuación [4.2] presenta $2Q$ incógnitas. Luego para determinar los valores de las incógnitas se necesitan por lo menos la misma cantidad de ecuaciones. Se destaca que por cada altura horaria de marea observada se puede plantear una ecuación.

Cuando el número de ecuaciones es mayor que el número de incógnitas se puede aplicar el método de cuadrados mínimos para resolver el sistema de ecuaciones. En este trabajo se utiliza el método de análisis armónico de cuadrados mínimos de Foreman (1977). Para poder resolver el sistema así planteado, donde la incógnita α pertenece al argumento de un coseno, es necesario reescribir la ecuación [4.2] de la siguiente forma:

$$y(t) = \sum_{j=0}^Q (R_j \cdot \cos \sigma_j \cdot t \cdot \cos \alpha_j + R_j \cdot \sen \sigma_j \cdot t \cdot \sen \alpha_j) \quad [4.3]$$

En la ecuación [4.3] el nivel medio S_0 se introdujo en la sumatoria como una componente de amplitud $R_0 = S_0$, de velocidad angular $\sigma_0 = 0$ y de fase $\alpha_0 = 0$.

Si se efectúan los reemplazos, indicados como [4.4.], cuya representación gráfica puede observarse en la Figura 4.2, la ecuación [4.3] resulta:

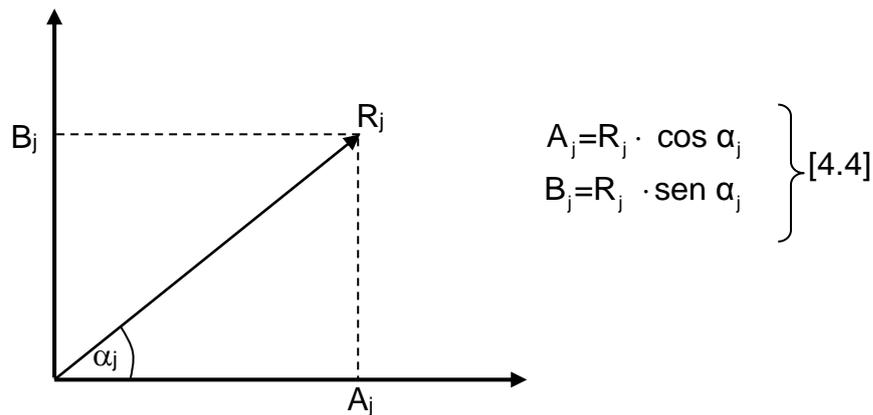


Figura 4.2. Relación entre A_j y B_j con R_j y α_j .

$$y(t) = \sum_{j=0}^Q (A_j \cos \sigma_j t + B_j \text{sen } \sigma_j t) \quad [4.5]$$

Donde las incógnitas pasan a ser B_j y A_j . Para obtener R_j y α_j una vez resuelto el sistema se utilizan las ecuaciones [4.6]:

$$\left. \begin{aligned} R_j &= \sqrt{A_j^2 + B_j^2} \\ \alpha_j &= \arctg \frac{B_j}{A_j} \end{aligned} \right\} [4.6]$$

Para plantear cuadrados mínimos se escribe en forma implícita la ecuación [4.5] y se la iguala a un desvío denotado por v , luego para la altura observada $h(t)$ se tiene:

$$h(t) - \sum_{j=0}^Q (A_j \cdot \cos(\sigma_j \cdot t) + B_j \cdot \text{sen}(\sigma_j \cdot t)) = v_t \quad [4.7]$$

Para cada altura de marea observada se plantea una ecuación similar a la [4.7] obteniéndose un sistema con más ecuaciones que incógnitas. Generalmente se elige un número impar de alturas de marea, con el propósito de que los resultados obtenidos para las incógnitas queden referidos al instante central de la serie analizada. Luego para $(2\tau + 1)$ alturas se elige $-\tau \leq t \leq \tau$.

Dado que por el método de mínimos cuadrados se verifica que $\sum_{t=-\tau}^{\tau} v_t^2 = \text{mínimo}$, resultan las siguientes ecuaciones normales, para la componente m, que resuelven el problema planteado:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sum_{t=-\tau}^{\tau} v_t^2}{\partial A_m} = \sum_{t=-\tau}^{\tau} 2 \cdot v_t \cdot \frac{\partial v_t}{\partial A_m} = 0 \\ \frac{\partial \sum_{t=-\tau}^{\tau} v_t^2}{\partial B_m} = \sum_{t=-\tau}^{\tau} 2 \cdot v_t \cdot \frac{\partial v_t}{\partial B_m} = 0 \end{cases} \quad [4.8]$$

Reemplazando [4.7] en [4.8] se tiene:

$$\begin{cases} \sum_{t=-\tau}^{\tau} \left[h(t) - \sum_{j=0}^Q (A_j \cdot \cos(\sigma_j \cdot t) + B_j \cdot \text{sen}(\sigma_j \cdot t)) \right] \cdot \cos(\sigma_m \cdot t) = 0 \\ \sum_{t=-\tau}^{\tau} \left[h(t) - \sum_{j=0}^Q (A_j \cdot \cos(\sigma_j \cdot t) + B_j \cdot \text{sen}(\sigma_j \cdot t)) \right] \cdot \text{sen}(\sigma_m \cdot t) = 0 \end{cases} \quad \text{con } j = 1, 2, \dots, m, \dots, Q \quad [4.9]$$

Las ecuaciones [4.9] corresponden a la componente m. Intercambiando las sumatorias y operando resulta:

$$\begin{aligned} \sum_{j=0}^Q \sum_{t=-\tau}^{\tau} (A_j \cdot \cos(\sigma_j \cdot t) \cdot \cos(\sigma_m \cdot t) + B_j \cdot \text{sen}(\sigma_j \cdot t) \cdot \cos(\sigma_m \cdot t)) &= \sum_{t=-\tau}^{\tau} h(t) \cdot \cos(\sigma_m \cdot t) \\ \sum_{j=0}^Q \sum_{t=-\tau}^{\tau} (A_j \cdot \cos(\sigma_j \cdot t) \cdot \text{sen}(\sigma_m \cdot t) + B_j \cdot \text{sen}(\sigma_j \cdot t) \cdot \text{sen}(\sigma_m \cdot t)) &= \sum_{t=-\tau}^{\tau} h(t) \cdot \text{sen}(\sigma_m \cdot t) \quad [4.10] \end{aligned}$$

En las ecuaciones [4.10] aparecen productos de senos y cosenos los cuales se analizan a continuación:

$$\sum_{t=-\tau}^{\tau} \cos(\sigma_j \cdot t) \cdot \cos(\sigma_m \cdot t) = \frac{1}{2} \cdot \sum_{t=-\tau}^{\tau} [\cos(\sigma_m + \sigma_j) \cdot t + \cos(\sigma_m - \sigma_j) \cdot t] \quad [4.11]$$

$$\sum_{t=-\tau}^{\tau} \sen(\sigma_j \cdot t) \cdot \cos(\sigma_m \cdot t) = \frac{1}{2} \cdot \sum_{t=-\tau}^{\tau} [\sen(\sigma_m + \sigma_j) \cdot t + \sen(\sigma_m - \sigma_j) \cdot t] = 0 \quad [4.12]$$

$$\sum_{t=-\tau}^{\tau} \cos(\sigma_j \cdot t) \cdot \sen(\sigma_m \cdot t) = \frac{1}{2} \cdot \sum_{t=-\tau}^{\tau} [\sen(\sigma_m + \sigma_j) \cdot t + \sen(\sigma_m - \sigma_j) \cdot t] = 0 \quad [4.13]$$

$$\sum_{t=-\tau}^{\tau} \sen(\sigma_j \cdot t) \cdot \sen(\sigma_m \cdot t) = -\frac{1}{2} \cdot \sum_{t=-\tau}^{\tau} [\cos(\sigma_m + \sigma_j) \cdot t - \cos(\sigma_m - \sigma_j) \cdot t] \quad [4.14]$$

Reemplazando [4.11], [4.12], [4.13] y [4.14] en [4.10] se tiene:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=0}^Q \frac{A_j}{2} \cdot \sum_{t=-\tau}^{\tau} [\cos(\sigma_m \cdot \sigma_j) \cdot t + \cos(\sigma_m - \sigma_j) \cdot t] = \sum_{t=-\tau}^{\tau} h(t) \cdot \cos \sigma_m \cdot t \\ \sum_{j=0}^Q -\frac{B_j}{2} \cdot \sum_{t=-\tau}^{\tau} [\cos(\sigma_m + \sigma_j) \cdot t - \cos(\sigma_m - \sigma_j) \cdot t] = \sum_{t=-\tau}^{\tau} h(t) \cdot \sen \sigma_m \cdot t \end{array} \right. \quad [4.15]$$

Esta última expresión se puede escribir en forma matricial de la siguiente forma:

$$\left. \begin{array}{l} \| A \| = \| a_{mj} \|^{-1} \cdot \| L \| \\ \| B \| = \| b_{mj} \|^{-1} \cdot \| L \| \end{array} \right\} [4.16]$$

Donde A y B son las matrices de las incógnitas y L la correspondiente al término independiente de las ecuaciones [4.15]. Los elementos de la matriz de los coeficientes de las incógnitas están dados por las ecuaciones [4.17].

$$\left. \begin{array}{l} a_{mj} = \frac{1}{2} \cdot \sum_{t=-\tau}^{\tau} [\cos(\sigma_m + \sigma_j) \cdot t + \cos(\sigma_m - \sigma_j) \cdot t] \\ b_{mj} = -\frac{1}{2} \cdot \sum_{t=-\tau}^{\tau} [\cos(\sigma_m + \sigma_j) \cdot t - \cos(\sigma_m - \sigma_j) \cdot t] \end{array} \right\} [4.17]$$

En este trabajo se utilizó esta forma de cálculo por ser más efectiva desde un punto de vista informático.

También se podrían haber encontrado los valores de las incógnitas a partir de las ecuaciones de condición dadas por [4.7], de la siguiente manera:

$$(A^t \cdot A) \cdot X = A^t \cdot L \quad [4.18]$$

Donde A es la matriz de los coeficientes de las incógnitas, L la de los términos independientes y X la de las incógnitas. Estas últimas se determinan haciendo:

$$X = (A^t \cdot A)^{-1} A^t \cdot L \quad [4.19]$$

Si bien esta forma de cálculo, no es óptima desde el punto de vista operativo, tiene la ventaja de que aparece la matriz de varianza covarianza como un paso intermedio, posibilitando así determinar los errores de las incógnitas.

$$\text{Matriz de varianza covarianza} = \sigma_0^2 (A^t \cdot A)^{-1} \quad [4.20]$$

Donde σ_0^2 es la varianza de los residuos (marea observada menos marea predicha).

Para obtener las constantes armónicas amplitud se debe dividir a las amplitudes obtenidas por el correspondiente factor nodal calculado para el centro de la serie utilizada. Las épocas se obtienen sumando a las fases obtenidas por análisis armónico el correspondiente argumento de equilibrio, calculado para el centro de la serie, (Schureman, 1988).

Este método permite utilizar series de alturas horarias de longitudes arbitrarias, aceptando además cualquier tipo de combinación de componentes, siempre que estas últimas estén de acuerdo con la longitud de la serie utilizada y el tipo de marea del lugar. Una vez elegidas las componentes puede ocurrir que no se logre separar algunas de ellas en el análisis armónico, si la serie de observaciones usada no contiene una cantidad suficiente de períodos de las mismas. En este caso se realiza el análisis armónico incluyendo solamente la componente más importante de cada grupo, desechando las otras. Como las constantes armónicas así determinadas van a estar contaminadas por las desechadas, se procede a descontaminar (Godin, 1972) e inferir a las contaminantes, utilizando para ello las relaciones existentes entre estas mismas constantes armónicas de un puerto patrón cercano. Se siguió la

metodología empleada por Godin (1972), utilizándose para el procesamiento de la información el sistema de programas presentado por D'Onofrio et al., (1983) y D'Onofrio, (1984).

4.3- Cartas de cotidales y de isoamplitudes

Una línea cotidal representa localidades donde la pleamar (o bajamar) debida a una onda componente de la marea se produce al mismo tiempo. Análogamente una línea de isoamplitud representa las localidades donde la amplitud de dicha onda es la misma. Ambas líneas permiten estudiar la dinámica de la onda de marea, pues posibilita tener una mejor visión de la distribución de las fases y amplitudes de cada onda.

Las cartas de líneas cotidales pueden realizarse de dos maneras. Una de ellas es representarlas en horas solares medias y otra en grados sexagesimales. En este trabajo se optó por emplear esta última representación. Para ello se utiliza el valor de la época de la componente, obtenida por análisis armónico, referido al meridiano de Greenwich.

Balay (1961) expresa el valor de las líneas cotidales en horas lunares después del pasaje de la Luna por el meridiano de Greenwich (H), utilizando la siguiente ecuación:

$$H = \frac{Em}{1.035} \pm G \quad [4.21]$$

Donde G es la longitud del lugar expresada en tiempo lunar referida a Greenwich y Em es el establecimiento de puerto medio.

4.4- Transformación de Coordenadas

Como se menciona en el Capítulo 3, las dos cartas náuticas utilizadas en este trabajo están producidas en proyección Mercator. Durante el proceso de digitalización se obtuvieron pares de coordenadas (x,y) referidas a un origen arbitrario fijado con anterioridad por el operador. En este caso el origen se fijó en el extremo inferior izquierdo del cánvas. Las coordenadas Mercator digitalizadas se transformaron a coordenadas geográficas (λ y ϕ) para poder conseguir un conjunto de datos homogéneos, referidos a un sistema de

coordenadas común. Luego con la totalidad de las coordenadas geográficas obtenidas se produjo una nueva carta que abarca la totalidad del Río de la Plata.

A continuación se muestran las ecuaciones que rigen la transformación Mercator (ver ejemplo, Haltiner, 1971).

$$x = a' \cdot \lambda \quad [4.22]$$

$$y = -a' \cdot \ln \frac{\cos \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad [4.23]$$

Donde a' representa el radio terrestre.

Para producir las cartas que se presentan en este trabajo se eligió la proyección Gauss Krüger, por ser compatible con los programas de graficado que se utilizaron. A continuación en 4.4.1 y 4.4.2 respectivamente se brinda una descripción sintética de las proyecciones Mercator y Gauss Krüger.

4.4.1- Proyección Mercator

Esta proyección es una de las más conocidas y utilizadas con fines náuticos, tomando el nombre de su creador, (Gerhard Kremer que la desarrolló en 1569). La idea de Mercator responde a las exigencias matemáticas de la proyección cilíndrica.

Esta proyección es conforme, es decir que para cualquier parte de la Tierra, comprendida en el área a cartografiar, la forma es la misma en la esfera que en el plano. Es decir un rectángulo en la esfera está representado por un rectángulo en el mapa. Para preservar los ángulos individuales que conforman la relación espacial de una forma, las líneas de la grilla que se interceptan a 90° en la esfera, se deben reproducir en el plano. El problema es que las deformaciones que se producen son grandes por lo cual ninguna proyección puede preservar forma en grandes áreas, es decir, las deformaciones aumentan a lo largo de los paralelos, a medida que la distancia medida desde el meridiano central se incrementa.

La característica más destacable de esta proyección es que tanto los meridianos como los paralelos son líneas rectas y se cortan

perpendicularmente. Los meridianos son líneas rectas paralelas entre sí dispuestas verticalmente a la misma distancia una de otros. Los paralelos son líneas rectas paralelas entre sí dispuestas horizontalmente pero aumentando la distancia entre ellos a medida que se alejan del Ecuador. Este aumento de distancia entre paralelos hace que no sea posible representar en el mapa las latitudes mayores de 80° Norte o Sur.

Otro aspecto importante a destacar de esta proyección es que la representación de una línea con un azimut (dirección) constante se dibuja completamente recta. La separación de los paralelos está calculada especialmente para que los ángulos entre meridianos y paralelos no sean distorsionados y para que la loxodrómica, se represente con una línea recta. De esta forma, para navegar de un sitio a otro, sólo hay que conectar los puntos de salida y destino con una línea recta, la misma intercepta a todos los meridianos con el mismo ángulo, de modo que con ella se puede navegar con un rumbo constante (Figura 4.3).

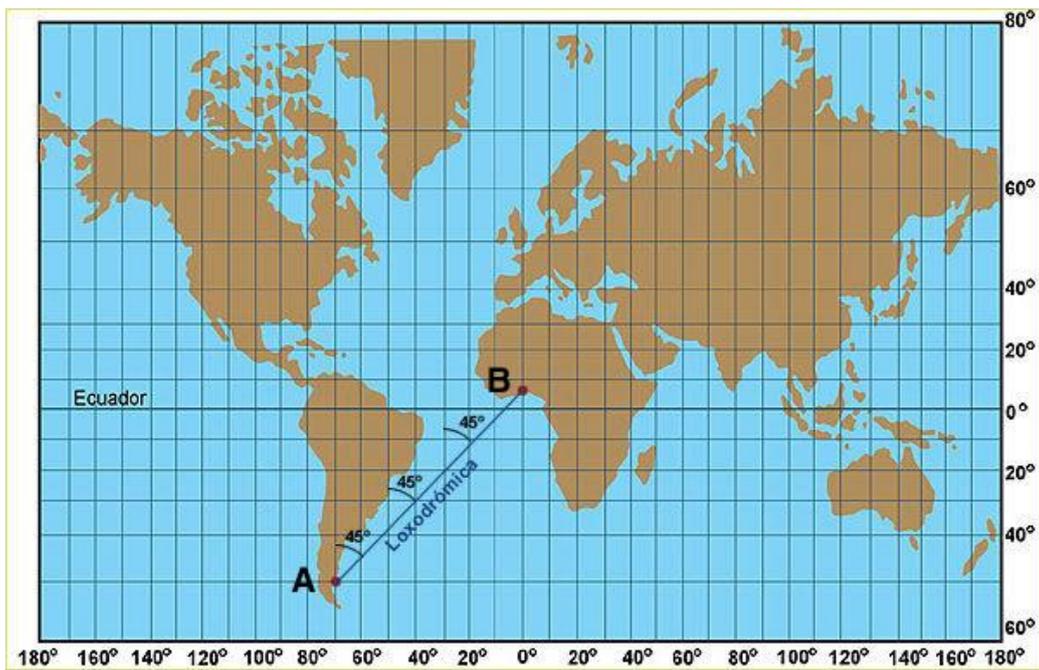


Figura 4.3. Mapamundi en Proyección Mercator.

Supongamos que un buque debe viajar entre los dos puertos indicados (A y B). La línea marcada en la carta de navegación es la derrota o camino que debe seguir el buque. En este caso, la línea resulta con un ángulo de 45° respecto a los meridianos. Como el compás siempre marca hacia el norte,

significa que la quilla del buque deberá mantenerse constantemente a 45° en relación al norte.

4.4.2- Proyección Gauss Krüger

Esta proyección es la que ha adoptado la República Argentina como proyección para la cartografía topográfica de base oficial. La misma es una variación de la mundialmente conocida proyección UTM (Universal Transverse Mercator) manteniendo las propiedades de conformidad de ésta, no así el factor de reducción de escala que no aparece como parámetro para esta proyección.

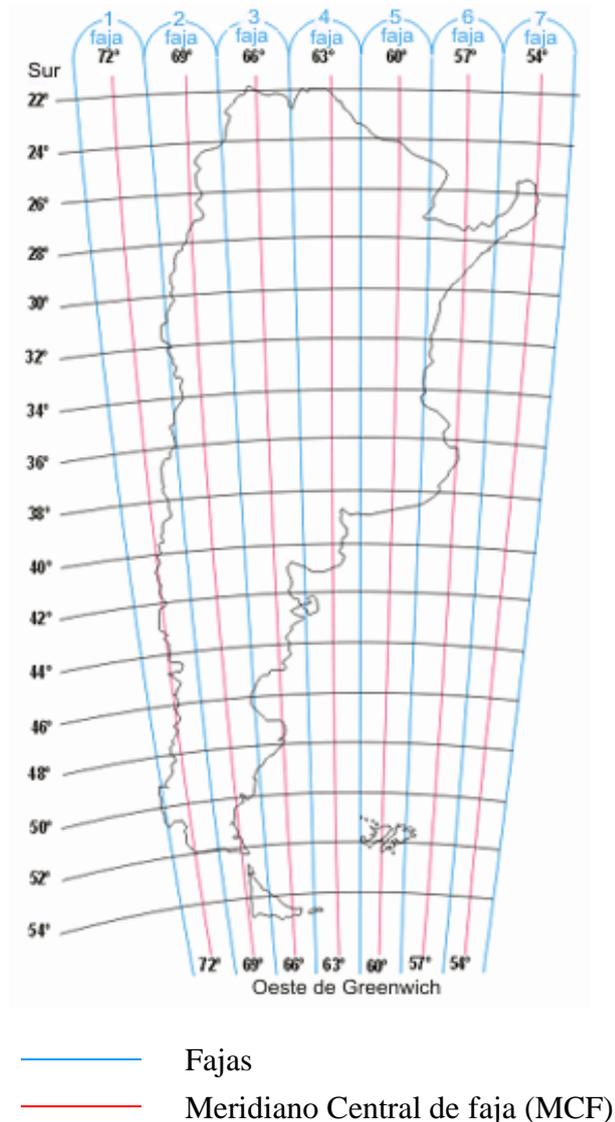


Figura 4.4. Fajas Gauss Krüger correspondientes a la República Argentina.

Es una proyección cilíndrica del tipo transversa (perpendicular al Ecuador) y tangente es decir solamente hace contacto con la superficie terrestre en un solo meridiano, también se denomina Meridiano Central de Faja

(MCF). El cilindro utilizado cubre la totalidad del país en sentido Norte-Sur pero es de limitado desarrollo longitudinal (Este-Oeste) abarcando solamente 3° (1°30' a cada lado del MCF).

En ésta proyección no se busca la representación del elipsoide entero, sino una faja comprendida entre dos meridianos no muy distanciados. Por esta razón, en la República Argentina, se han utilizado 7 cilindros generando las “7 fajas” que conforman la proyección en su totalidad (Figura 4.4). Cada una de estas fajas hace tangencia en un meridiano diferente cubriendo de esta manera el país en su totalidad.

Teóricamente se podría representar el elipsoide entero en ésta forma, pero serían inevitables grandes dilataciones lineales, a medida que los puntos se apartan del meridiano central.

Estas fajas se numeran de acuerdo a la siguiente Tabla 4.1:

Faja	Meridiano Central de Faja	Meridiano central en coordenadas Gauss-Krüger (Valores ordenadas Y)	Meridianos Límites de Faja
1	-72°	(1.500.000)	70° 30'W - 73°30'W
2	-69°	(2.500.000)	67° 30'W - 70°30'W
3	-66°	(3.500.000)	64° 30'W – 67°30'W
4	-63°	(4.500.000)	61° 30'W – 64°30'W
5	-60°	(5.500.000)	58° 30'W – 61°30'W
6	-57°	(6.500.000)	55° 30'W – 58°30'W
7	-54°	(7.500.000)	52° 30'W - 55°30'W

Tabla 4.1. Fajas Gauss Krüger en la República Argentina

Como puede apreciarse en la Tabla 4.1, la cifra que indica los millones de estas coordenadas indica el número de faja en la que se encuentra el punto proyectado.

El sistema Gauss Krüger posee ejes cartesianos como modo de representación de las coordenadas proyectadas al plano generándose un X, Y Gauss Krüger.

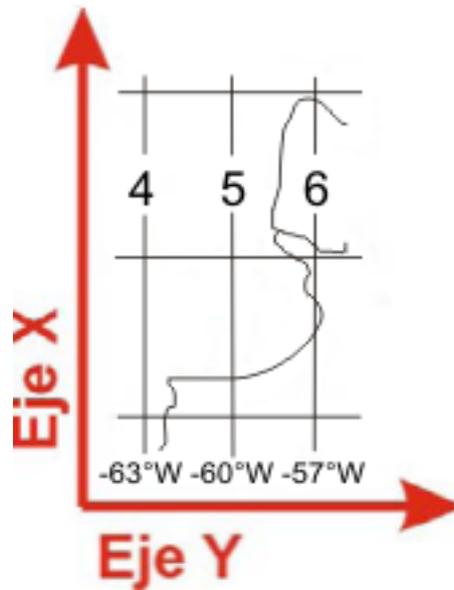


Figura 4.5.

Eje X: Representa el eje NORTE de la proyección (al revés de los ejes cartesianos matemáticos) (Figura 4.5), y su origen o valor 0 (cero) se encuentra en el Polo Sur (Latitud 90° Sur). De esta manera la coordenada X de un punto expresado en Gauss Krüger indicará siempre la cantidad de metros que lo separa del Polo Sur.

Eje Y: Representa el eje ESTE de la proyección y su origen está dado por cada Meridiano Central de Faja (Figura 4.5). En él, el valor que adopta la coordenada Y es 500.000 (expresado en metros). Este valor arbitrario distinto de 0 (cero) se adoptó simplemente para evitar los valores negativos en las coordenadas.

Las coordenadas planas (X, Y) Gauss Krüger de un punto dado, cuyas coordenadas geográficas son φ y λ , se calculan mediante las siguientes expresiones (ver, por ejemplo, D'Alvia, 1988).

$$\begin{aligned}
 X = S + & \frac{(1 \cos \varphi)^2 \cdot N \cdot t}{2} + \frac{(1 \cos \varphi)^4 \cdot N \cdot t}{24} (5 - t^2 + 9\eta^2 + 4\eta^4) + \\
 & + \frac{(1 \cos \varphi)^6 \cdot N \cdot t}{720} \cdot (61 - 58t^2 + t^4 + 270\eta^2 - 330t^2\eta^2)
 \end{aligned}
 \tag{4.24}$$

$$Y = n \cdot 1.000.000 + 500.000 + 1 \cdot \cos \varphi \cdot N + \frac{(1 \cos \varphi)^3 \cdot N}{6} (1 - t^2 + \eta^2) + \frac{(1 \cdot \cos \varphi)^5 \cdot N}{120} \cdot (5 - 18t^2 + 14\eta^2 - 58t^2\eta^2) \quad [4.25]$$

donde:

S: representa la longitud del arco de meridiano entre el Polo Sur y el punto dado.

N: es el radio normal.

t: es la tangente de φ .

η : se define como $\sqrt{e^2 \cos^2 \varphi}$, donde $e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{b}}$ es la segunda excentricidad del elipsoide, siendo a y b los semiejes mayor y menor del elipsoide de referencia.

n: es el número de faja.

4.5- Método de interpolación espacial

Con los datos obtenidos de la digitalización de las cartas náuticas (ver 3.2) y mediante la aplicación de técnicas de interpolación espacial se genera una grilla representada por una matriz de 500 columnas por 500 filas, donde cada celda es de 21" en latitud por 29" en longitud para toda la extensión del Río de la Plata. Cuando se realiza una interpolación espacial se debe tener en cuenta la anisotropía. La anisotropía se define como el comportamiento desigual, de la propiedad representada por el conjunto de puntos utilizados, en las diferentes direcciones del espacio. La anisotropía de un conjunto de datos se define con un parámetro de proporción y con el ángulo de la orientación o tendencia de los valores (Golden Software, 1999). En este trabajo las constantes armónicas de marea no presentan ninguna tendencia ni orientación espacial definida, por lo que se considera a los datos distribuidos isotrópicamente.

La resolución de la grilla queda determinada por la densidad de nodos creados. La medida de la resolución puede estar definida en unidades de longitud (m o km) o puede estar dada en grados de latitud. Generalmente los lados de las celdas son de forma rectangular. Se debe tener en cuenta que

para un área determinada la resolución de una grilla aumenta a medida que las dimensiones de la celdas disminuyen.

Se evaluaron distintas clases de métodos de interpolación espacial, optando por el de triangulación con interpolación lineal, ya que el mismo es un interpolador exacto y se ajusta a los requerimientos de este trabajo. Se entiende por interpolador aquel método que toma como exactos los valores de la información utilizada. A continuación se brinda una breve descripción de este método.

4.5.1- Triangulación con interpolación lineal

Este método utiliza la triangulación óptima de Delaunay (Yang et al., 2004). El algoritmo crea los triángulos a través del trazado de líneas entre los datos. Los puntos originales se conectan de tal manera que los lados del triángulo no se interceptan con los de otro triángulo. El resultado es un mosaico con las caras de los triángulos sobre la extensión de la grilla. Cada triángulo define un plano sobre los nodos de la grilla con una inclinación y elevación del mismo determinada por los tres puntos originales que definieron el triángulo. La triangulación con interpolación lineal trabaja mejor cuando los datos están uniformemente distribuidos sobre el área grillada (Yang et al., 2004).

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

5.1- Resultados de la digitalización de las cartas náuticas

Siguiendo la metodología expuesta en 4.5 se adoptó como intervalo de digitalización 0.2 mm. En la Tabla 5.1 se presentan las distancias reales entre coordenadas digitalizadas consecutivas, utilizando ΔS igual a 0.2 mm para distintas escalas.

Denominador de la escala	Distancia sobre el terreno (m)
50.000	10
100.000	20
150.000	30
200.000	40
250.000	50

Tabla 5.1. Distancia entre datos digitalizados utilizando ΔS igual a 0.2 mm.

Para justificar la elección de este intervalo es necesario recordar las características de propagación de las ondas de marea. Son ondas largas con períodos de 12 a 24hs y longitudes de onda de cientos de kilómetros. Las olas se concideran ondas largas cuando se cumple que el cociente entre la profundidad y la longitud de onda es menor o igual que un vigésimo. En el caso de la marea el mencionado cociente es mucho menor que 1/20 (Pugh, 1987), por lo que se considera a la marea como una onda larga. Las ondas largas viajan a una velocidad dada por:

$$c = \sqrt{g \cdot h} = \frac{L_0}{T} \quad [5.1]$$

donde h es la profundidad, g la aceleración de la gravedad, L_0 la longitud de onda y T el período. Las ondas largas tienen la propiedad de que la velocidad es independiente de la velocidad angular ω , dependiendo solamente de la gravedad g y de la profundidad del agua h. Entre 4000m y 20m de profundidad, la longitud de onda de la marea semidiurna varía entre 8860Km y 625Km,

desplazándose con velocidades de 715 km/h y 50 km/h respectivamente (Pugh, 1987).

Ya que la escala de las cartas digitalizadas (ver 3.3) es 1: 250.000. Por lo expuesto una incerteza de 50m no afecta a la representación de las líneas cotidales y de isoamplitudes, por ser la marea un fenómeno que presenta variaciones a escala mayor que 100 km. Por otra parte a una escala de 1: 250.000 esta incerteza no atenta a la representación cartográfica.

5.2- Control de calidad de las alturas de marea

Previamente a la realización de los análisis armónicos es necesario efectuar un control de calidad de las alturas de marea. El objetivo del mismo es la detección de anomalías presentes en los registros o en el volcado de la información en soporte magnético (cuando correspondiera). Para ello se utilizó un programa desarrollado por D'Onofrio (1984) que calcula el nivel medio, realiza un gráfico y aplica un filtro pasa bajos a las alturas de marea. El nivel medio es conocido, si bien tiene variación anual, es un buen indicador para comprobar que no se alteró el cero de la medición (D'Onofrio et al., 1981). Un gráfico en escala apropiada resulta un excelente auxiliar para detectar errores a simple vista. A diferencia del nivel medio permite detectar errores puntuales que aparecen como pulsos que alteran el desarrollo uniforme del mareograma. La razón de aplicar un filtro pasa bajos es eliminar la contribución de la marea astronómica y obtener la onda de tormenta presente en el registro de mareas. Estos resultados pueden ser correlacionados con mediciones del viento que los justifiquen.

También la comparación de gráficos correspondientes al mismo periodo, provenientes de distintas estaciones mareográficas, donde se conoce el retardo medio de la onda de marea, da una idea de la bondad de los registros obtenidos. Un ejemplo de esto se presenta en las Figuras 5.1 a 5.4 donde se puede apreciar la propagación de la onda de marea por el interior del estuario recorriendo las siguientes estaciones: Km239, Spar Brasileira Norte, Torre Oyarvide, Magdalena, La Plata, Puerto de Buenos Aires, Emilio Mitre Braga y Gauzú Desembocadura (Figura 3.1), para el periodo comprendido entre el 9 al 12 de Mayo de 2003. Como era de esperarse la onda de marea recorre el Río de la Plata desde el Km 239 hasta Guazú Desembocadura, notándose los correspondientes retardos en las pleamares y bajamares.

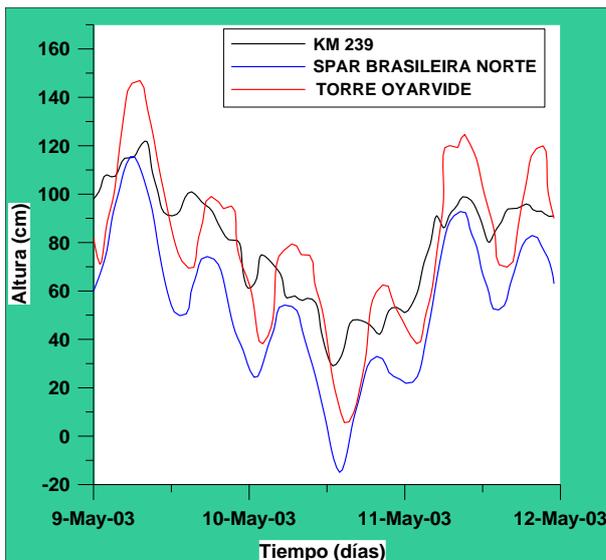


Figura 5.1. Nivel del río en Km 239, Spar Brasileira Norte y Torre Oyarvide.

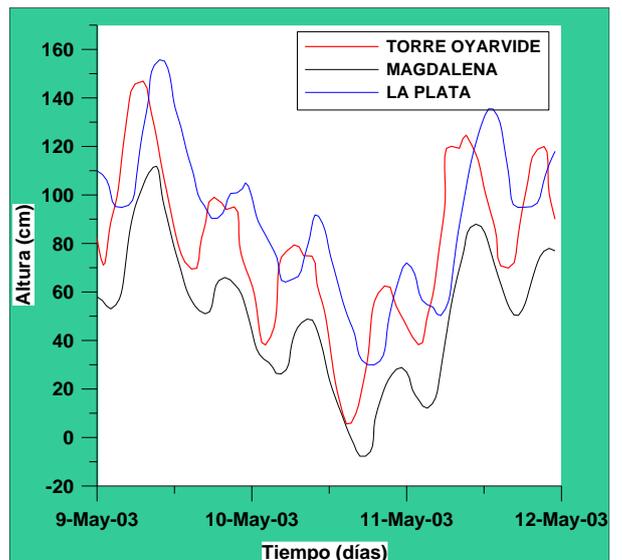


Figura 5.2. Nivel del río en Torre Oyarvide, Magdalena y La Plata.

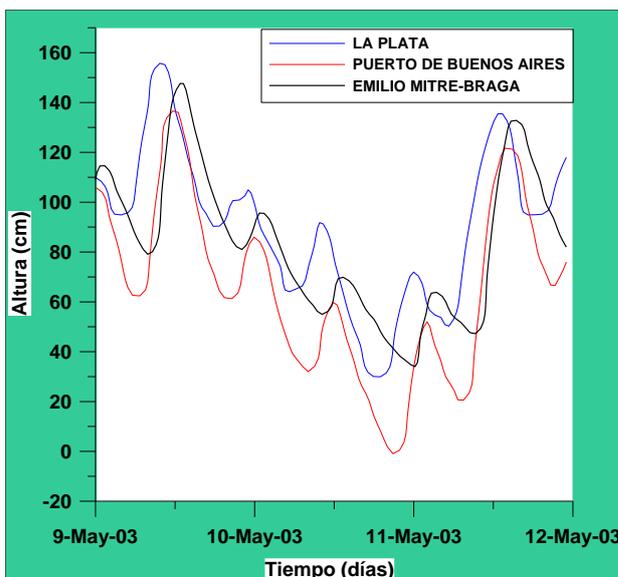


Figura 5.3. Nivel del río en La Plata, Puerto de Buenos Aires y Emilio Mitre Braga.

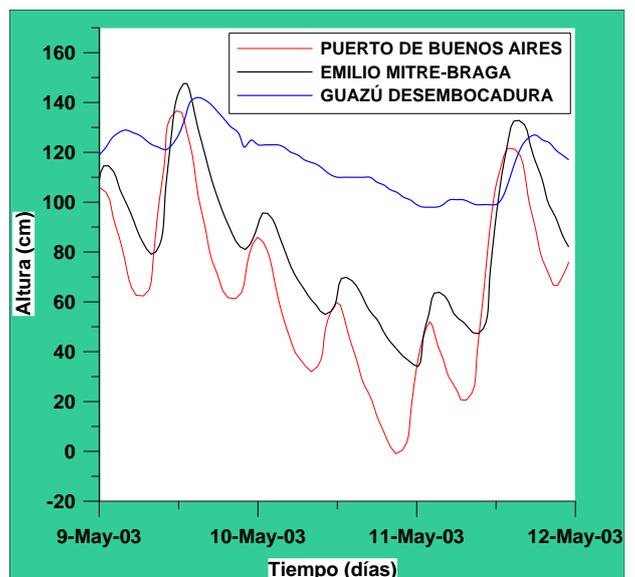


Figura 5.4. Nivel del río en el Puerto de Buenos Aires, Emilio Mitre Braga y Guazú Desembocadura.

5.3- Análisis armónico de marea

En la Tabla 5.2 se presentan las principales ondas componentes de marea obtenidas de los análisis armónicos realizados con los datos de la Tabla 3.1. Para cada estación se presentan la latitud, longitud y las correspondientes coordenadas Gauss Krüger.

ESTACIONES	LATITUD (S)	LONGITUD (W)	Xg	Yg	M2		S2		K1		O1	
					H (cm)	G (°)	H (cm)	G (°)	H (cm)	G (°)	H (cm)	G (°)
PUERTO DE PUNTA DEL ESTE	34°57'42"	54°57'06"	6129150.76	6687230.43	5.8	347.1	1.2	83.3	0.1	293.4	4.6	151.1
SAN CLEMENTE DEL TUYU (Muelle)	36°21'30"	56°42'30"	5988645.50	6525465.53	36.3	10.3	6.2	93.3	6.3	261.1	17.5	121.9
KM 239.1	35°05'00"	55°59'00"	6117654.89	6592717.12	9.2	87.9	2.6	172.2	2.6	320.0	8.5	165.5
PUERTO DE MONTEVIDEO	34°54'30"	56°13'30"	6136337.72	6571582.26	13.9	118.8	3.5	192.0	1.8	335.5	7.6	179.4
CANAL PUNTA INDIO (KM. 201.6 / ex Par Uno)	35°10'00"	56°22'00"	6108698.80	6557698.76	17.6	102.8	3.1	183.6	-----	-----	10.3	167.5
SPAR BRASILEIRA NORTE	35°10'30"	56°37'00"	6108815.19	6534922.78	24.8	114.5	3.9	198.0	4.9	345.4	12.3	171.6
CANAL PUNTA INDIO (Torre Oyarvide)	35°06'00"	57°08'00"	6116270.55	6487843.07	31.9	144.9	5.4	233.9	4.9	364.0	13.3	191.4
BANCO ORTIZ	34°40'00"	57°10'00"	6164361.89	6484744.95	20.0	186.6	4.2	294.2	4.2	30.1	11.3	238.2
MAGDALENA	34°56'00"	57°27'00"	6134676.38	6458886.89	22.4	185.6	5.3	276.1	6.4	33.8	13.4	212.6
PUERTO LA PLATA	34°50'00"	57°53'00"	6145506.88	6419197.83	22.3	243.6	5.2	336.2	7.6	55.8	13.6	242.4
MUELLE PLATERO	34°26'30"	57°38'30"	6189930.72	6441737.69	13.6	243.7	2.3	341.4	6.7	63.5	11.4	262.3
TORRE NORDEN	34°38'00"	57°55'00"	6167667.66	6415946.33	19.1	265.7	3.7	357.2	4.4	70.7	12.8	255.1
COLONIA DEL SACRAMENTO	34°28'30"	57°51'00"	6186210.68	6421903.92	15.1	286.4	2.8	13.6	5.9	85.2	12.9	266.1
BERNAL	34°40'55"	58°13'33"	6161973.30	6387661.60	26.8	271.2	4.6	9.9	12.3	160.0	15.6	258.3
PUERTO DE BUENOS AIRES (Dársena F)	34°33'45"	58°24'00"	6174575.77	6373051.49	26.5	303.8	4.2	40.6	8.4	78.0	13.8	267.3
OLIVOS	34°30'00"	58°29'00"	6180924.78	6364288.99	26.9	315.3	4.5	411.2	9.9	87.0	15.6	275.1
SAN FERNANDO	34°26'00"	58°34'00"	6189169.70	6359060.58	26.1	328.6	4.1	66.3	11.7	88.0	16.4	277.5
TIGRE	34°25'00"	58°34'30"	6190954.46	6354844.05	25.8	322.1	4.3	83.7	7.0	89.3	13.6	278.8
CANAL EMILIO MITRE DESTACAMENTO BRAGA	34°19'00"	58°30'00"	6200332.43	6363494.57	22.0	338.7	3.6	78.9	10.2	98.2	13.0	281.6
MARTÍN GARCÍA	34°11'00"	58°15'00"	6217261.90	6384764.30	19.2	350.0	3.4	70.0	6.2	105.1	11.5	294.7
CONCHILLAS	34°12'30"	58°04'30"	6214672.51	6400927.31	15.7	340.7	3.3	89.6	4.5	97.9	8.8	281.4

GUAZÚ DESEMBOCADURA	34°00'00"	58°25'00"	6237399.36	6369116.51	7.4	23.2	0.9	122.6	4.1	128.4	5.0	312.3
CARMELO	34°00'00"	58°18'00"	6237542.29	6379895.89	5.4	22.1	1.2	63.3	2.7	168.7	6.8	309.2
NUEVA PALMIRA	33°52'30"	58°25'00"	6251266.13	6368925.06	5.9	51.5	1.0	125.5	1.5	156.4	4.1	345.1

Tabla 5.2. Componentes armónicas obtenidas.

Las amplitudes (H) se presentan en centímetros y las épocas referidas al meridiano de Greenwich (G) se brindan en grados. Del análisis de la Tabla 5.2 surge que la componente más importante es la M_2 siguiéndole en importancia la O_1 . Con respecto a las componentes S_2 y K_1 varían su importancia según la estación considerada. También del estudio de la Tabla 5.2 se puede inferir que en San Clemente del Tuyú (Muelle) se presenta la mayor amplitud de marea, mientras que en Punta del Este la menor.

Según la importancia de estas ondas componentes de marea es posible deducir el régimen de la misma. Para clasificar a la marea Stok (1897) adoptó tres tipos principales, basados en el resultado obtenido al hacer el cociente entre la suma de las ondas diurnas K_1 y O_1 y las semidiurnas M_2 y S_2 . El resultado obtenido (F) será un número más pequeño que 1 si predominan las componentes semidiurnas y más grande que 1 si predominan las diurnas.

$$F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2} \quad [5.2]$$

Posteriormente Courtier (1938) incrementó a cuatro los tipos de marea. Esta clasificación es la que se adopta mayormente en la actualidad y se explica a continuación:

- Si se cumple que $F < 0,25$; la marea es semidiurna. Se producen 2 bajamares y 2 pleamares por día, que alcanzan prácticamente la misma altura. Además los intervalos entre el pasaje de la Luna por el meridiano y la ocurrencia de la pleamar se mantienen aproximadamente constantes para una localidad.
- Si se cumple que $0,25 \leq F < 1,5$; la marea es mixta preponderantemente semidiurna. En la mayoría de los casos solamente se producen dos pleamares y dos bajamares por día, con una importante desigualdad diurna, aunque en ciertas ocasiones pueden presentarse una pleamar y una bajar por día. Este último caso se produce cuando la declinación de la Luna es máxima.
- Si se cumple que $1,5 \leq F < 3$; la marea es mixta preponderantemente diurna. Se producen tanto una pleamar y una bajar por día (cuando la Luna alcanza su máxima declinación), como dos pleamares y dos

bajamares con una importante desigualdad diurna (cuando la Luna pasa por el Ecuador).

- Si se cumple que $3 \leq F$; la marea es diurna. Se produce una pleamar y una bajamar por día.

Al aplicar la fórmula de Courtier (1938) a las estaciones de la Tabla 5.2 se obtiene en todos los casos que el régimen de marea es mixto preponderantemente semidiurno.

5-4. Obtención de constantes armónicas para una grilla en el Río de la Plata

Para determinar las dimensiones de las celdas de la grilla se tuvo en cuenta la velocidad de propagación y el gradiente de amplitud de las ondas seleccionadas. Para la zona de estudio se construyó una grilla representada por una matriz de 500 columnas por 500 filas, donde cada celda es de 21" en latitud por 29" en longitud que cubre el Río de la Plata. Esto equivale a celdas de 648m por 895m sobre el terreno. Sobre las cartas náuticas utilizadas (ver 3.2) las dimensiones de las celdas son de 2,45mm por 2,90mm. De estos resultados se infiere que no hay cambios significativos en la marea entre nodos consecutivos.

Para la obtención de las constantes armónicas de las componentes M_2 , S_2 , O_1 y K_1 en los nodos de la mencionada grilla, se utilizó el método de triangulación con interpolación lineal (ver 4.5.1).

En las Figuras 5.5 a 5.12 se brindan las proyecciones Gauss Krüger para amplitudes y épocas referidas a Greenwich para las componentes de marea M_2 , S_2 , O_1 y K_1 .

RÍO DE LA PLATA

Componente M2 - Época Referida a Greenwich (°)

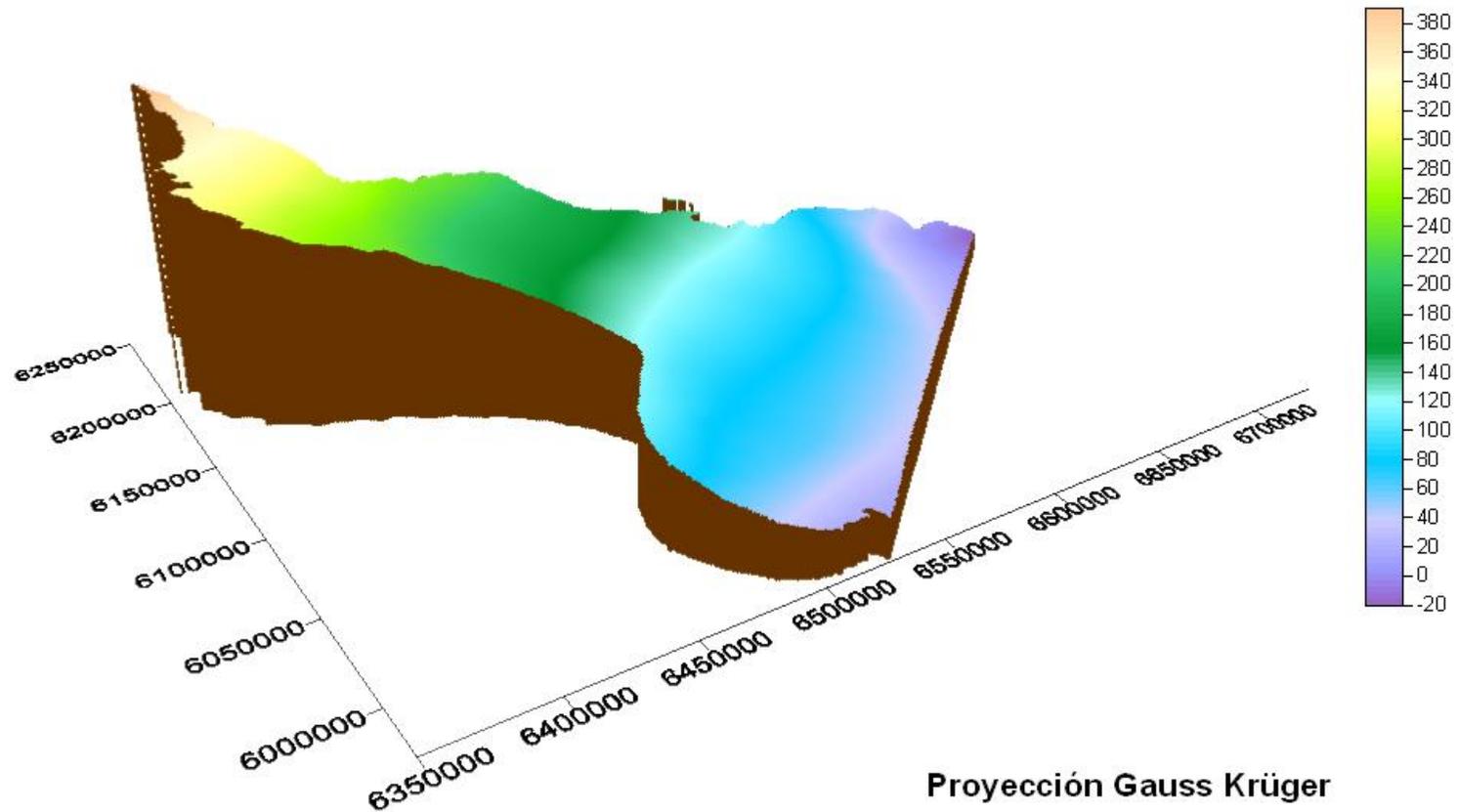


Figura 5.5

RÍO DE LA PLATA

Componente M2 - Amplitud (cm)

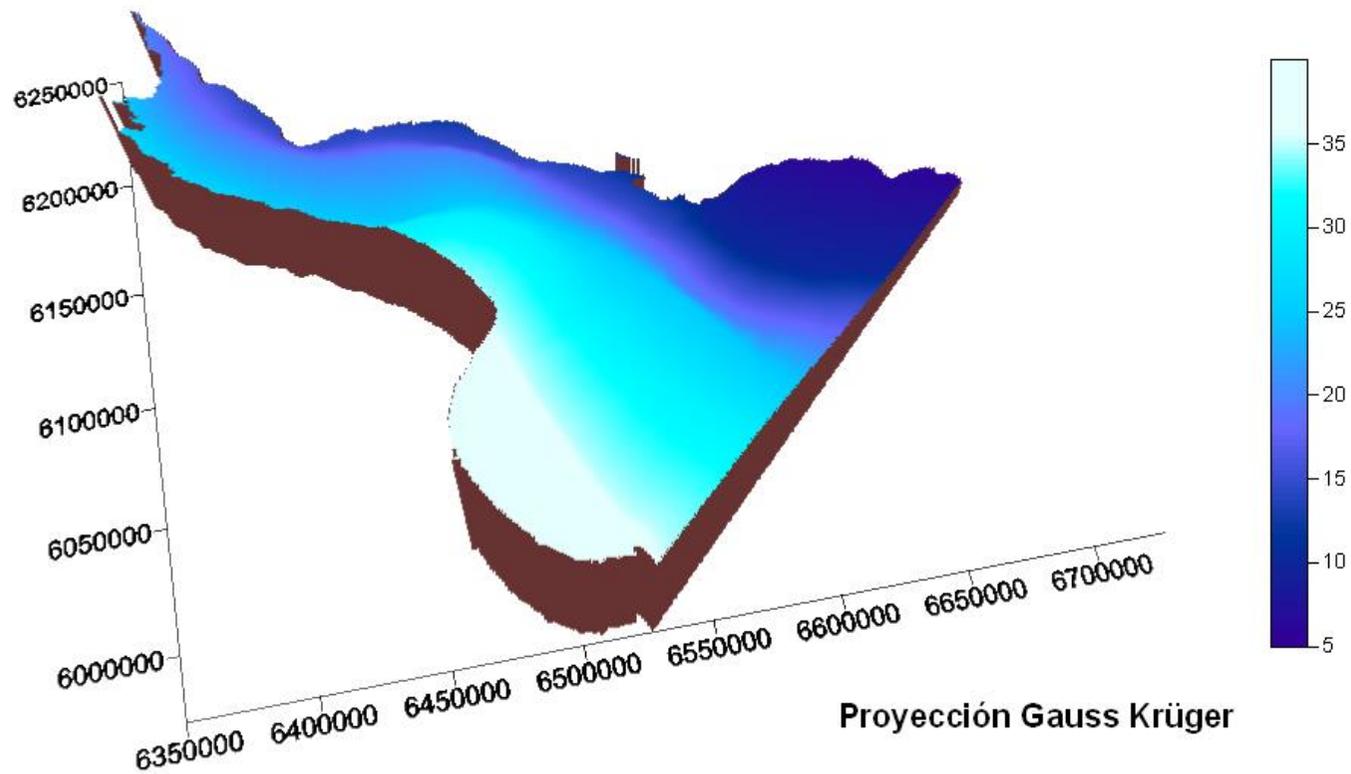


Figura 5.6

RÍO DE LA PLATA

Componente S2 - Época Referida a Greenwich (°)

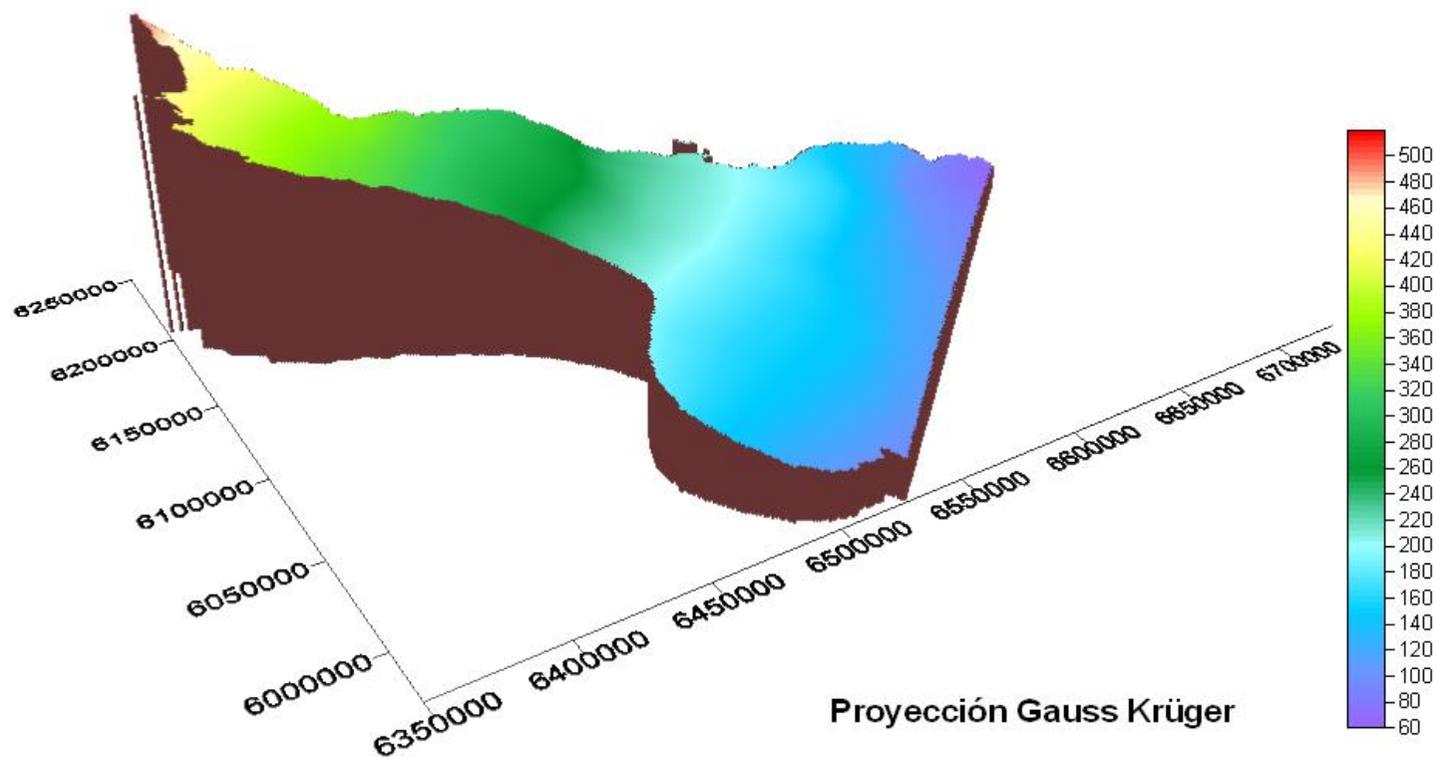


Figura 5.7

RÍO DE LA PLATA

Componente S2 - Amplitud (cm)

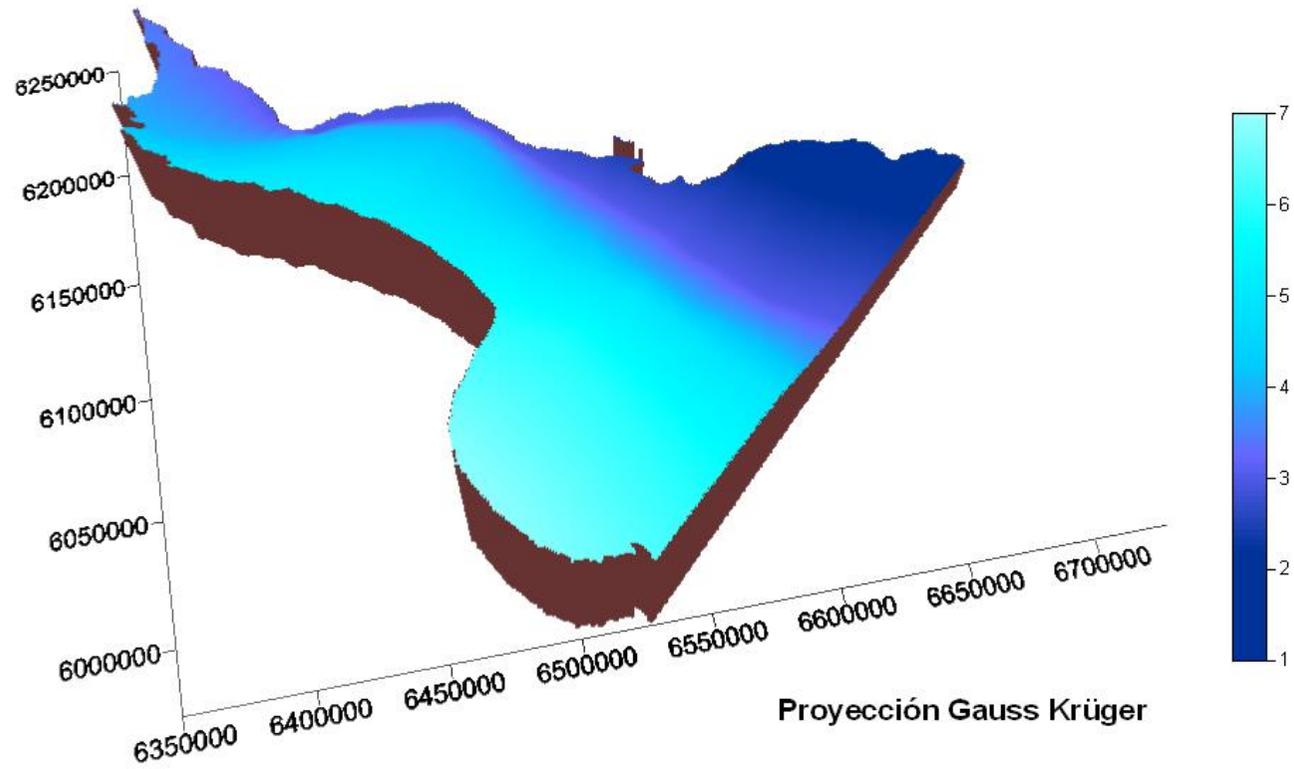
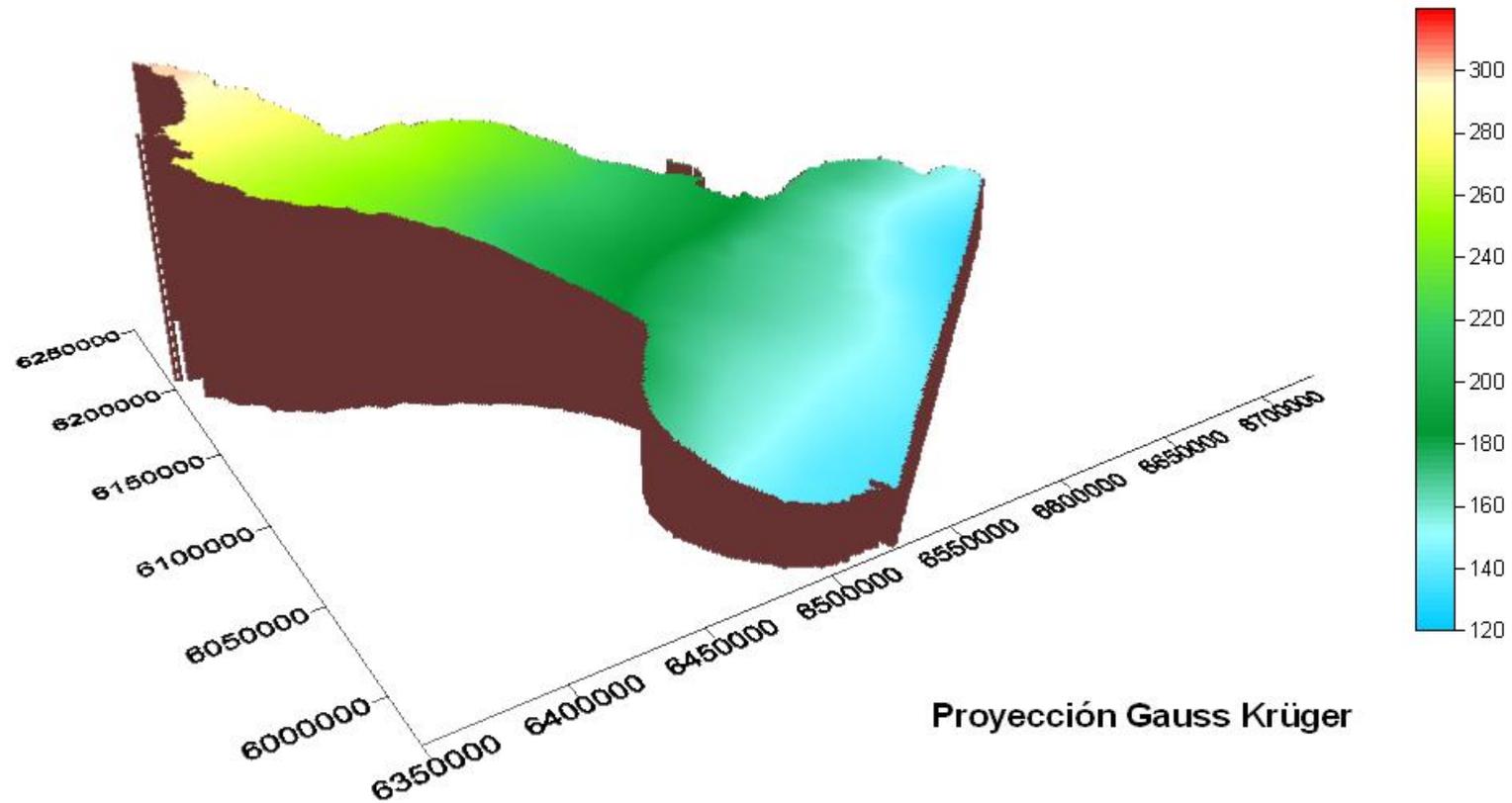


Figura 5.8

RÍO DE LA PLATA

Componente O1 - Época Referida a Greenwich (°)



Proyección Gauss Krüger

Figura 5.9

RÍO DE LA PLATA

Componente O1 - Amplitud (cm)

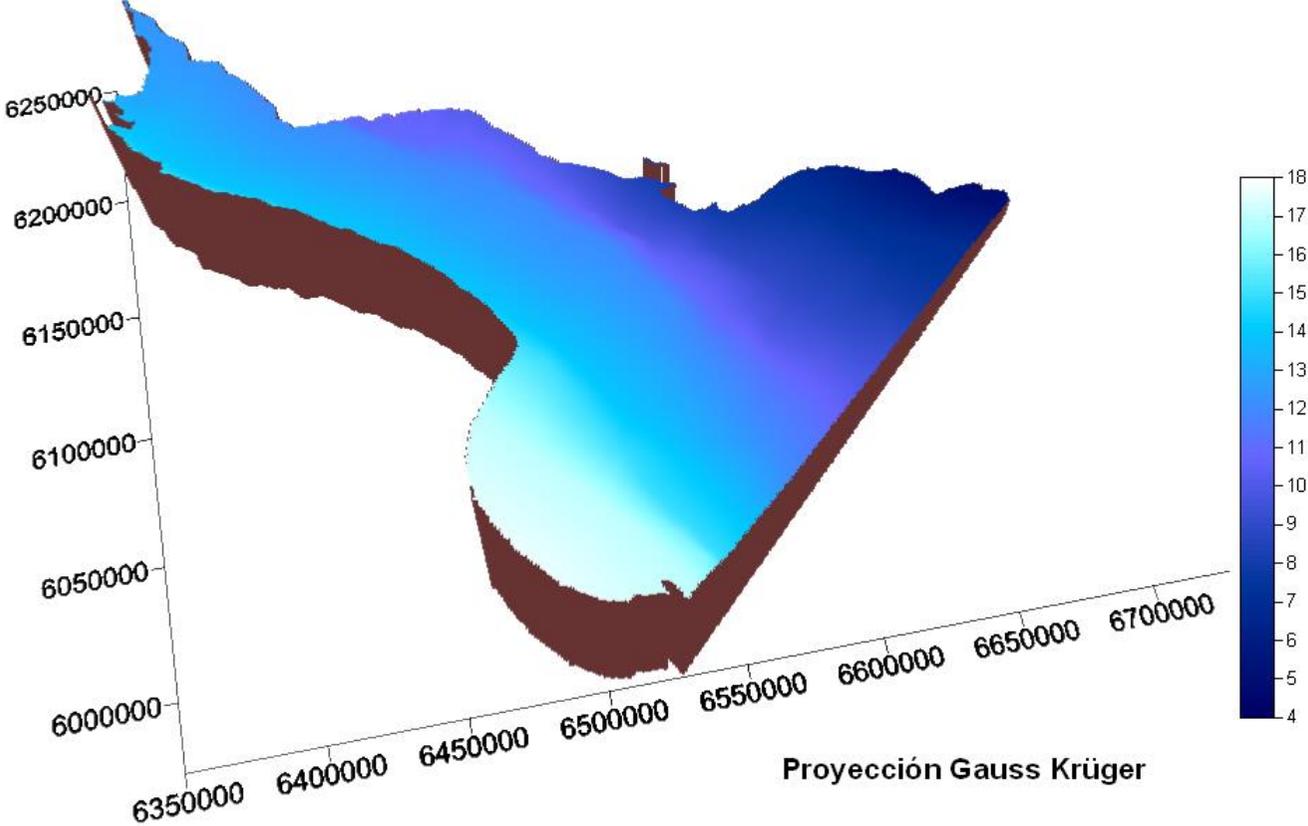


Figura 5.10

RÍO DE LA PLATA

Componente K1 - Época Referida a Greenwich (°)

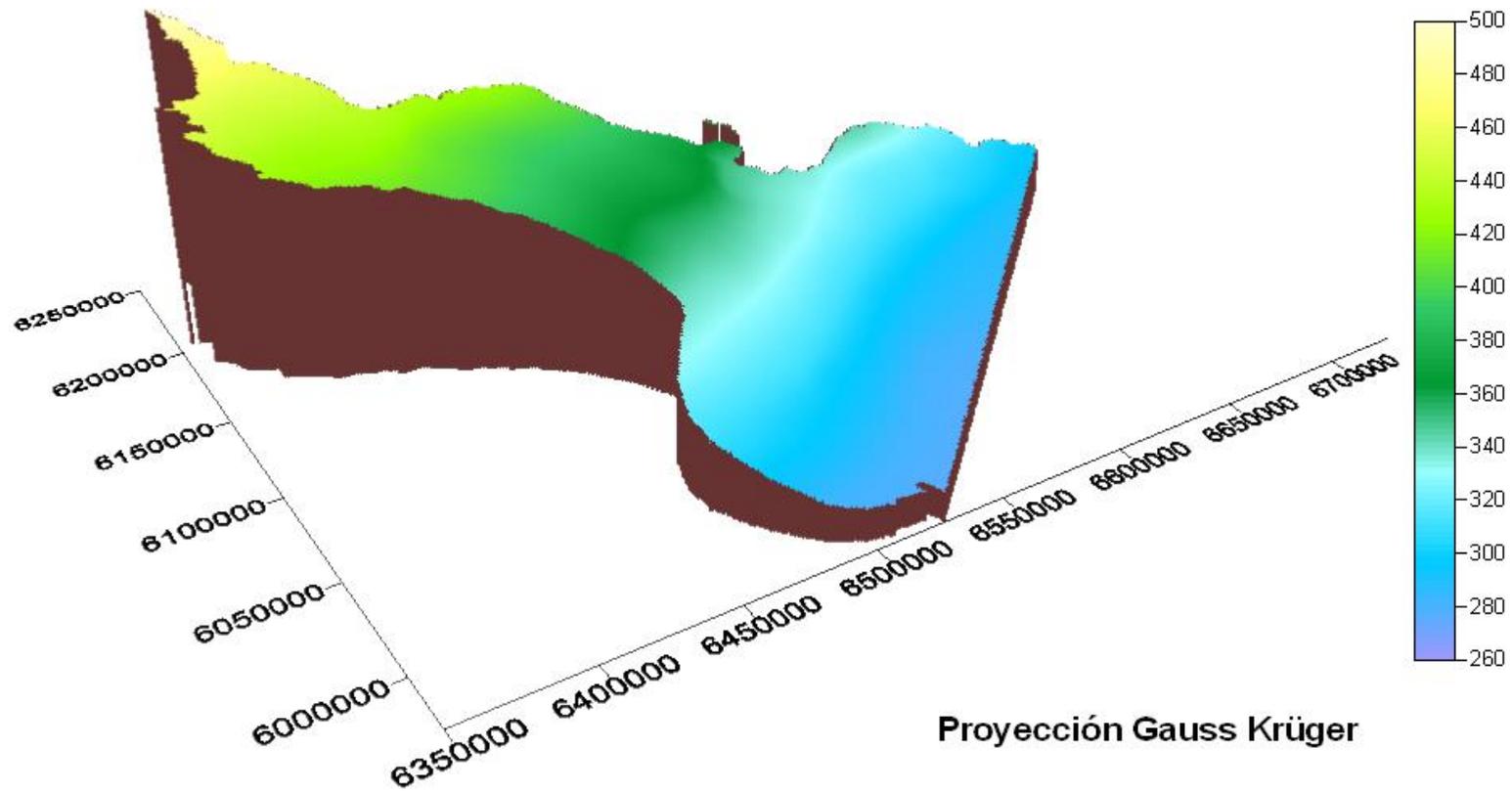


Figura 5.11

RÍO DE LA PLATA

Componente K1 - Amplitud (cm)

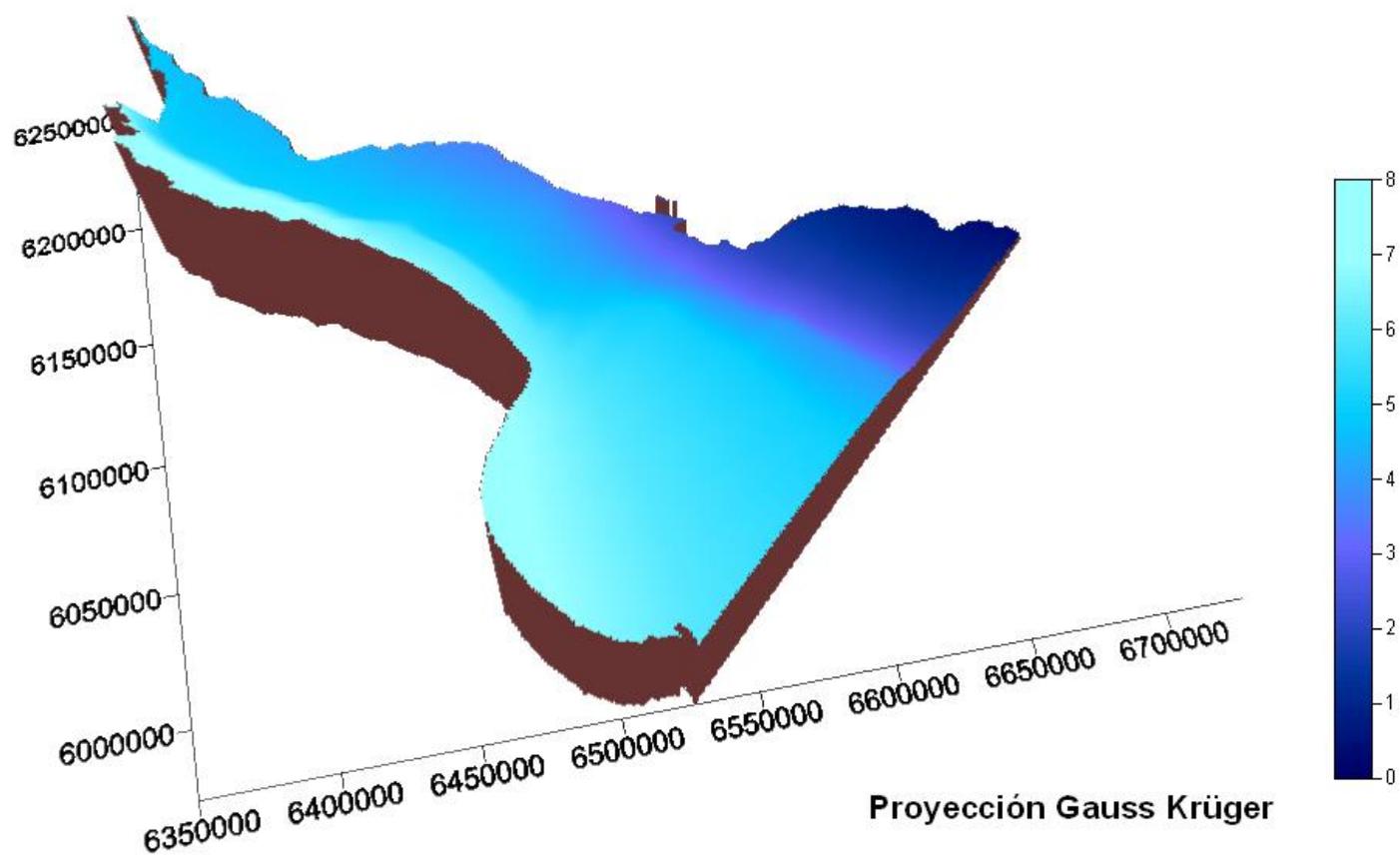


Figura 5.12

5.5- Cartas de cotidales y de isoamplitudes

Utilizando las constantes armónicas de la Tabla 5.2 se confeccionaron cartas cotidales y de isoamplitudes (Figuras 5.13 a 5.20) para las componentes semidiurnas S_2 y M_2 y para las diurnas O_1 y K_1 , que son las más representativas dentro de sus especies para esta zona, como surge de D'Onofrio et al.,(1999). En todas las cartas cotidales se representa la época G en grados. Cuando alcanza el valor de 360° se continua incrementando el valor de la época G. Se utiliza esta convención para evitar discontinuidades en la representación geográfica de G.

5.5.1- Análisis de los resultados para las componentes de marea M_2 y S_2

Del análisis de la Figura 5.13 surge que la onda M_2 tarda 12h 5min en recorrer el Río de la Plata, desde el punto medio del límite exterior hasta el km 0 Punta Gorda (Figura 2.1), produciéndose situaciones simultáneas de pleamar y bajamar en distintos lugares del río. Las líneas cotidales de esta componente se disponen perpendicularmente a la costa. De la misma forma del análisis de la Figura 5.14 puede deducirse que la onda de marea S_2 tarda en recorrer la totalidad del río en aproximadamente 13 h y también las líneas cotidales de esta componente se ubican perpendiculares a la costa. La velocidad de propagación de ambas ondas no es uniforme, disminuyendo ésta en profundidades mas bajas. Esto se puede observar en las Figuras 5.13 y 5.14 como una disminución de las distancias entre las líneas cotidales en la parte superior del río.

Las líneas de isoamplitudes de las componentes M_2 y S_2 se disponen en forma aproximadamente paralela a la costa y la amplitud decrece de la costa argentina a la uruguaya, como se puede apreciar en las Figuras 5.15 y 5.16.

5.5.2- Análisis de los resultados para las componentes de marea O_1 y K_1

Las líneas cotidales de las componentes O_1 y K_1 (Figuras 5.17 y 5.18) se distribuyen, de igual forma que las componentes M_2 y S_2 , es decir, perpendiculares a la costa y avanzando a lo largo del Río de la Plata. Las ondas correspondientes a las componentes O_1 y K_1 , tardan en recorrer la totalidad del Río de la Plata $12^h 55^{min}$ y $13^h 57^{min}$, respectivamente. Al igual que para las componentes semidiurnas, las líneas de isoamplitudes

correspondientes a las componentes O_1 y K_1 (Figuras 5.19 y 5.20), se disponen paralelas a la costa y la amplitud de la onda decrece desde la costa argentina a la uruguaya.

RÍO DE LA PLATA

Componente M2 - Época Referida a Greenwich (°)

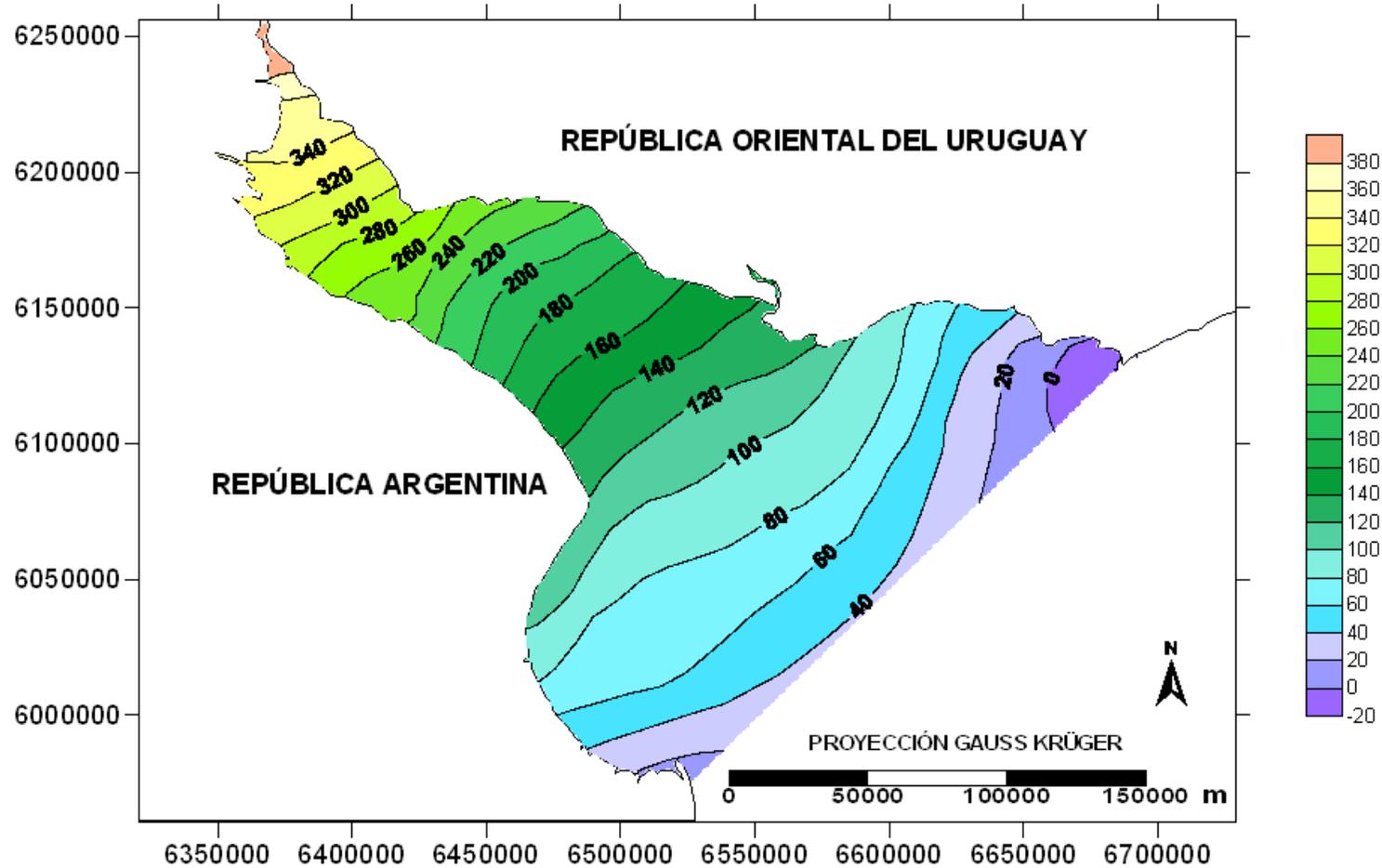


Figura 5.13

RÍO DE LA PLATA

Componente S2 - Época Referida a Greenwich (°)

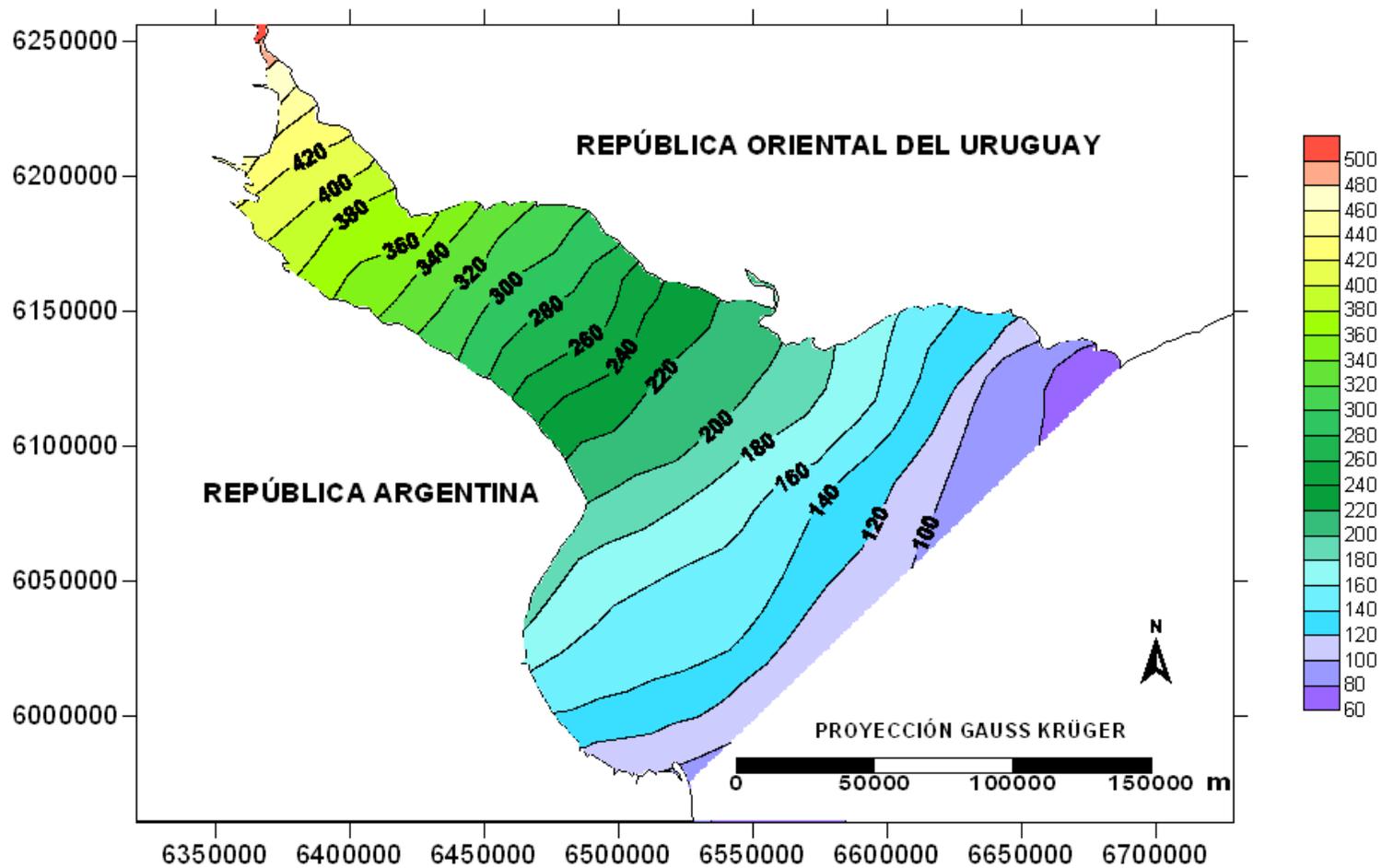


Figura 5.14

RÍO DE LA PLATA

Componente M2 - Amplitud (cm)

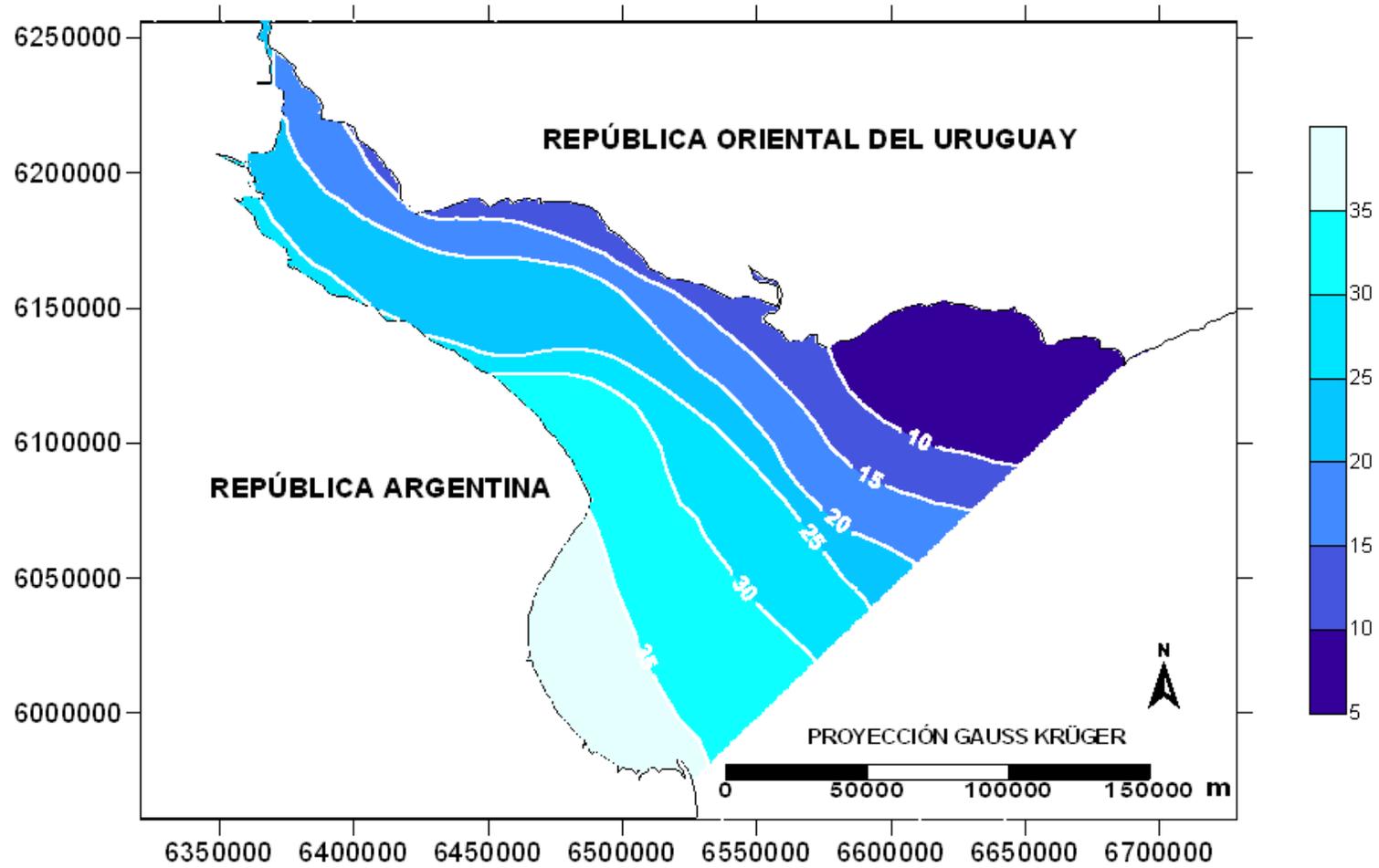


Figura 5.15

RÍO DE LA PLATA

Componente S2 - Amplitud (cm)

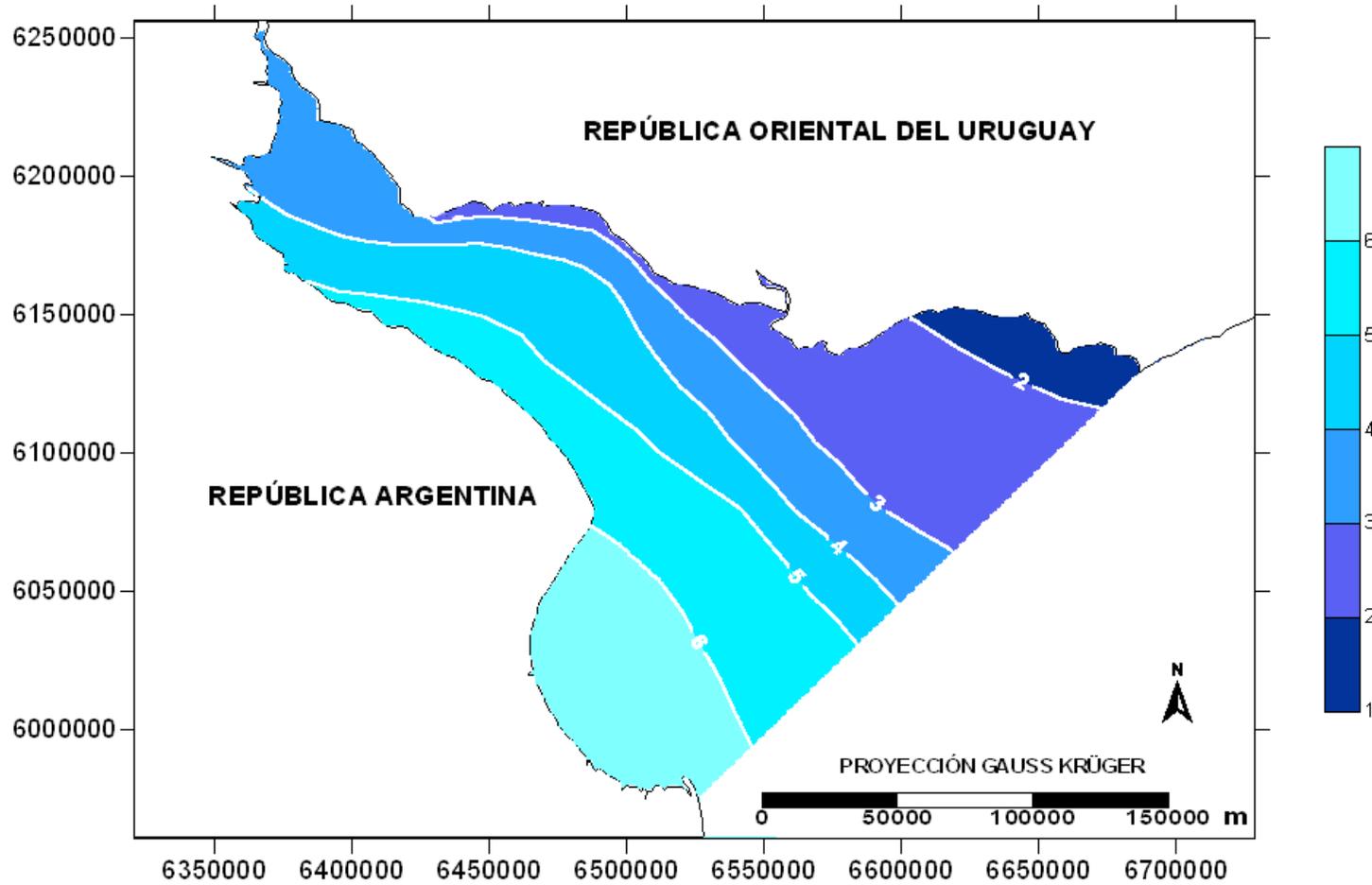


Figura 5.16

RÍO DE LA PLATA

Componente O1 - Época Referida a Greenwich (°)

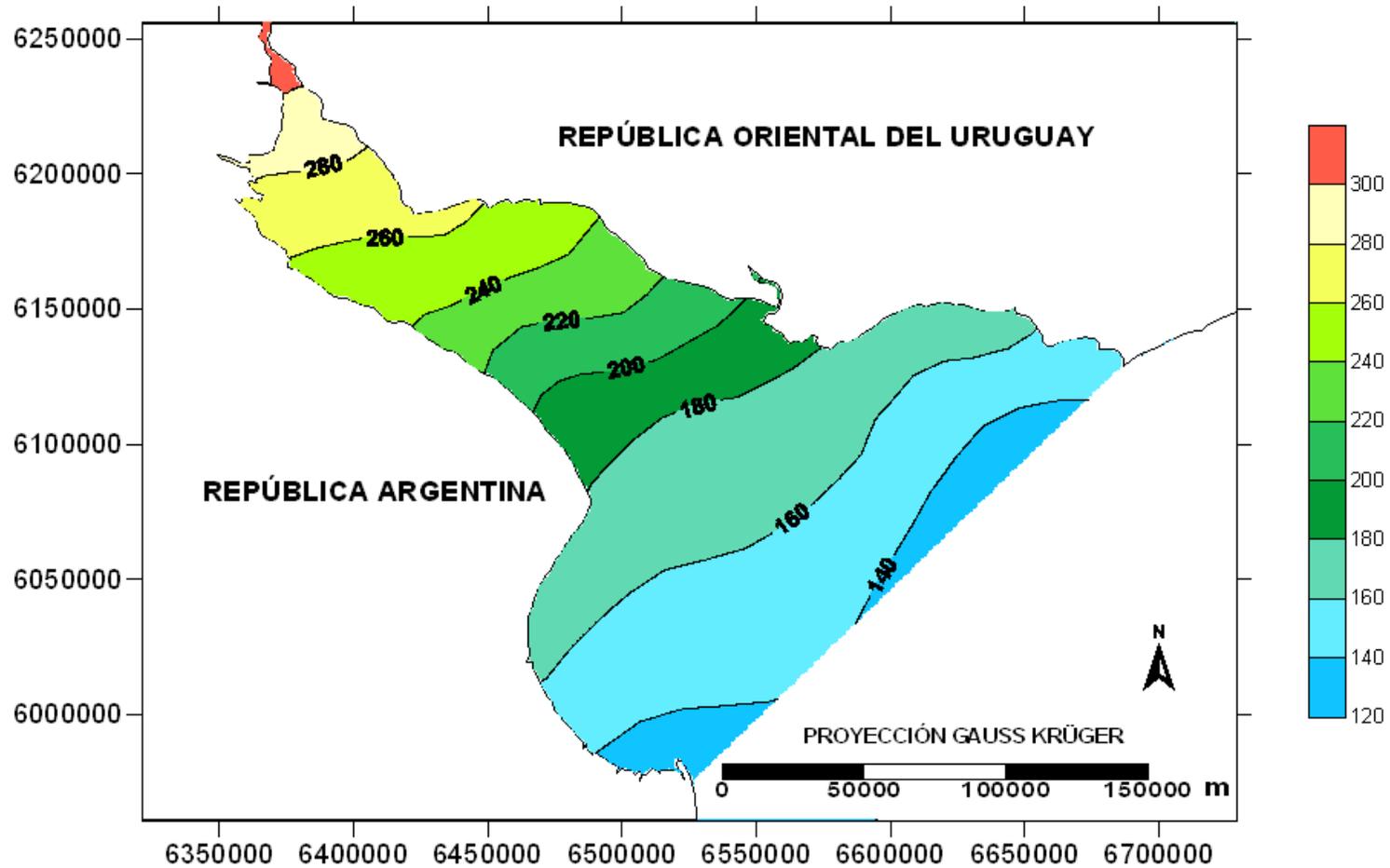


Figura 5.17

RÍO DE LA PLATA

Componente K1 - Época Referida a Greenwich (°)

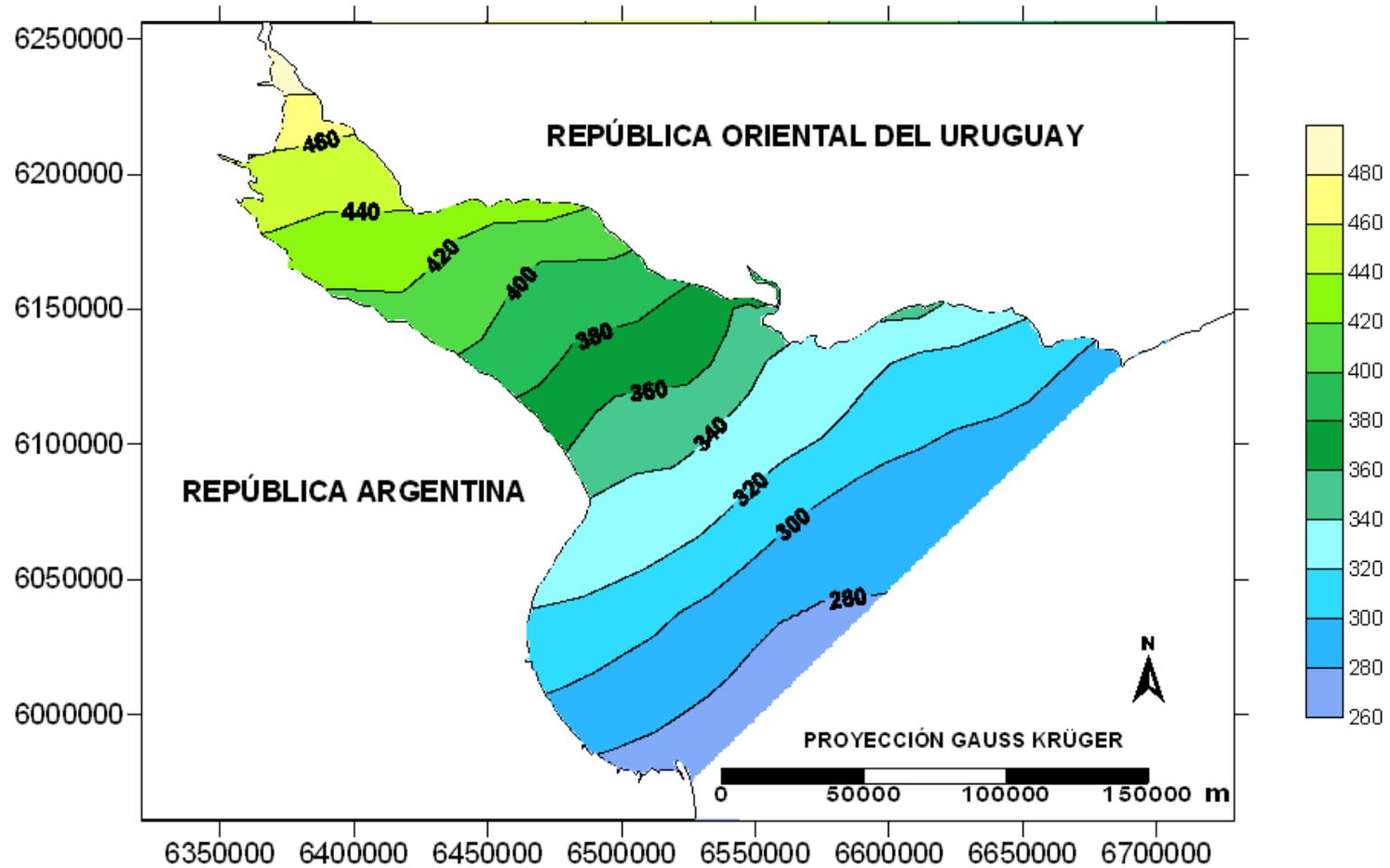


Figura 5.18

RÍO DE LA PLATA

Componente O1 - Amplitud (cm)

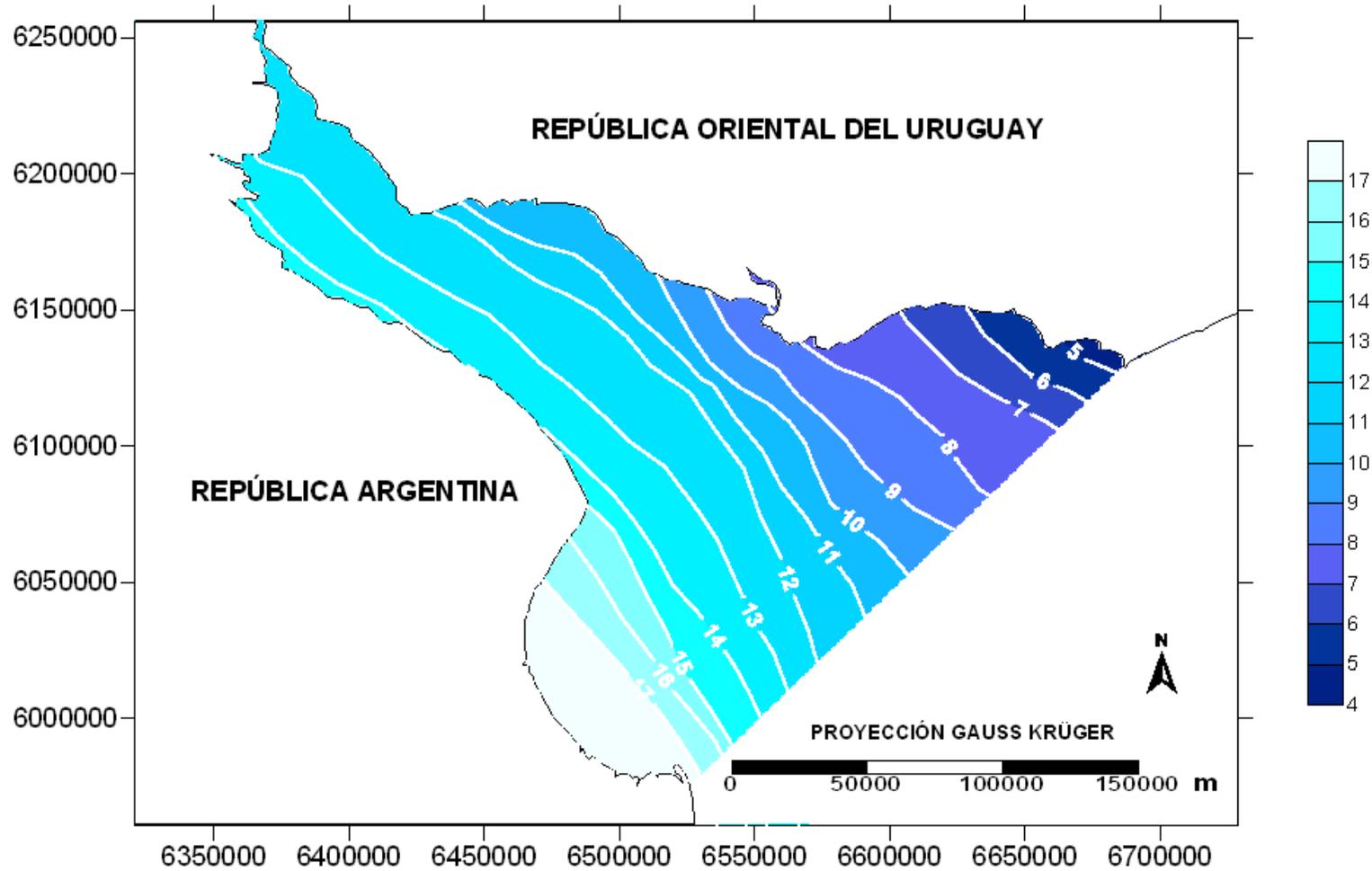


Figura 5.19

RÍO DE LA PLATA

Componente K1 - Amplitud (cm)

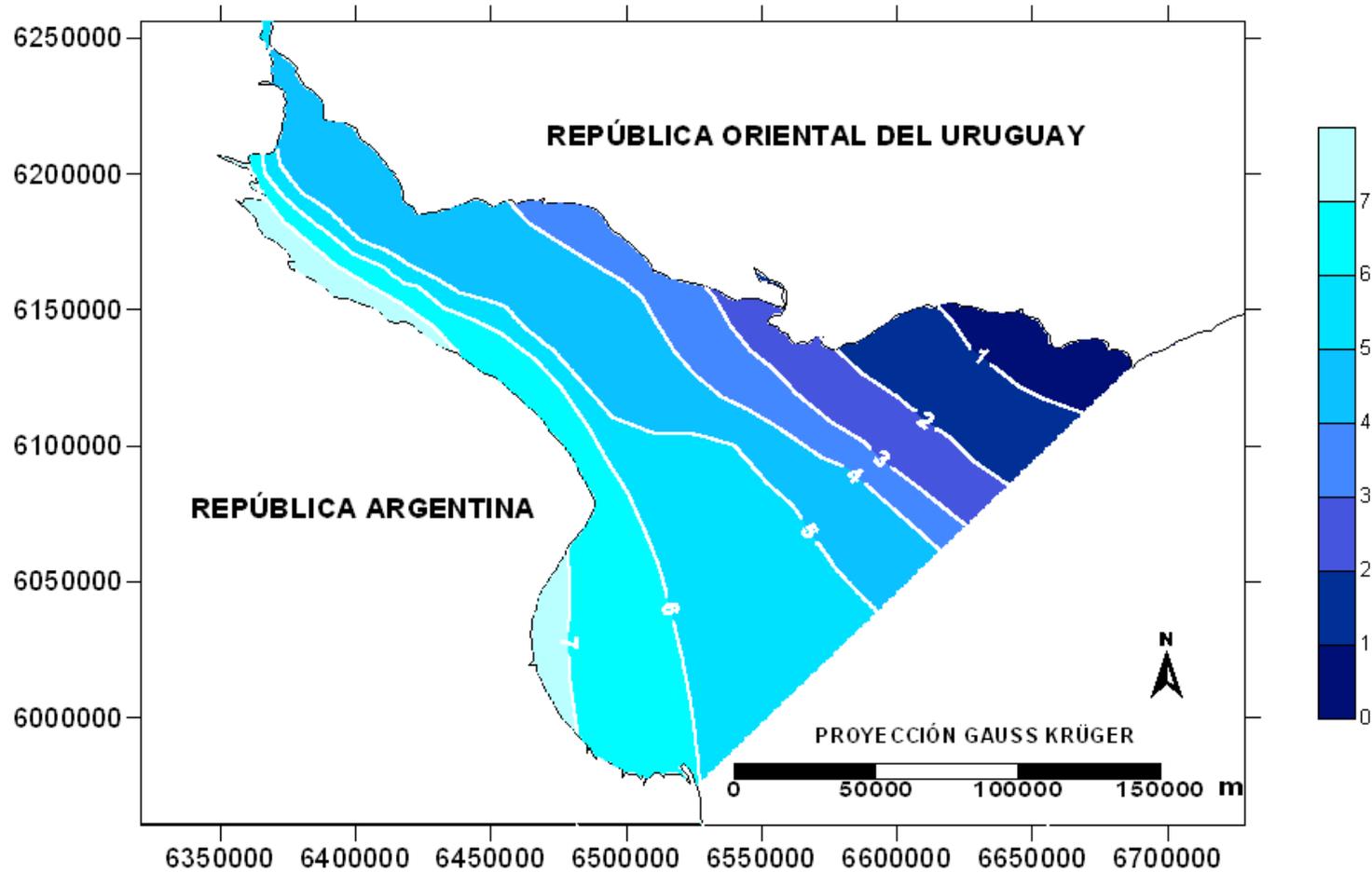


Figura 5.20

CAPÍTULO 6

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se utilizan datos de marea provenientes de 24 estaciones para elaborar cartas cotidales y de isoamplitudes. Como se ha indicado precedentemente (Capítulo 3) los datos de niveles aquí presentados provienen de estaciones de marea equipadas con instrumental de muy variada tecnología. El cuidadoso control de calidad aplicado y los resultados del análisis armónico revelaron la alta consistencia entre las diferentes series de datos correspondientes a los distintos sitios del Río de la Plata. En consecuencia se concluye que las constantes armónicas obtenidas son apropiadas y suficientes para la confección de cartas cotidales y de isoamplitudes.

La cartografía de base para la representación de las líneas cotidales y de isoamplitudes, se genera utilizando dos cartas náuticas del SHN (ver 3.2). Para la digitalización de las costas y de la isobata de 5m (se optó por esta isobata por ser la más representativa de los bancos en el Río de la Plata) se adoptó la técnica continua de puntos a intervalos regulares de 0.2mm. Este último valor produce una incerteza de 50m en el terreno para una escala 1:250.000, error que no afecta a la representación de las líneas cotidales y de isoamplitudes como fue demostrado en 5.1.

Teniendo en cuenta la velocidad de propagación y el gradiente de amplitud de las cuatro ondas de marea seleccionadas (M_2 , S_2 , O_1 y K_1), se construye una grilla representada por una matriz de 500 columnas por 500 filas, donde cada celda es de 21" en latitud por 29" en longitud. Estas dimensiones hacen que la variación de las constantes armónicas de marea entre nodos consecutivos sea despreciable a los efectos de realizar una predicción de marea, por lo que la totalidad de la grilla constituye una excelente base de datos para tal propósito.

Del análisis de la onda de marea M_2 surge que la misma tarda $12^h 5^{min}$ en recorrer la totalidad del Río de la Plata, desde el punto medio del límite exterior hasta el km 0, produciéndose situaciones simultáneas de pleamar y bajamar en distintos lugares. De la misma forma se infiere que la onda de

marea S_2 tarda en recorrer la totalidad del río en aproximadamente 13 h. Por otra parte las ondas correspondientes a las componentes diurnas O_1 y K_1 , tardan en recorrer la totalidad del Río de la Plata en $12^h 55^{min}$ y en $13^h 57^{min}$, respectivamente.

Las líneas cotidales de la totalidad de las componentes se disponen en forma perpendicular a la costa y avanzan siguiendo el eje central del Río de la Plata. Las líneas de isoamplitudes de las componentes estudiadas se disponen en forma paralela a la costa y la amplitud decrece de la costa argentina a la uruguaya.

Si se compara este trabajo con el de Legal (1995) se observa que es coincidente la orientación de las líneas cotidales y de isoamplitudes, notándose en este trabajo una mayor respuesta a las zonas donde los principales bancos del Río de la Plata hacen decrecer la profundidad. Esto se pone de manifiesto en una disminución de la distancia entre las líneas cotidales. Esta diferencia puede deberse a que en este trabajo se utilizó más del doble de información que en el realizado por Legal (1995).

Por otra parte comparando las cartas cotidales y de isoamplitudes generadas por Balay (1961) con las obtenidas en este trabajo se advierte que las líneas cotidales y de isoamplitud son en rasgos generales coincidentes. Balay trazó líneas cotidales y de isoamplitudes para la componente M_2 y las presentó en forma horaria, es decir para una equidistancia de 30° mientras que en este trabajo la equidistancia es de 20° , por lo que se observa mayor detalle.

Finalmente, con el objeto de optimizar las predicciones de marea este trabajo será continuado con la realización de grillas de resolución similar para las componentes N_2 , P_1 , Q_1 , M_4 , S_a y M_f , que siguen en importancia a las aquí calculadas.

AGRADECIMIENTOS

Por la colaboración prestada a la Dra. Claudia Simionato, Investigadora Asistente del CIMA/CONICET y a la empresa Hidrovía S.A.

Además mi reconocimiento a la Comisión Nacional para el Límite Exterior de la Plataforma Continental por haberme facilitado el instrumental para realizar la digitalización de las cartas náuticas.

También deseo expresar mi agradecimiento en general al Departamento Oceanografía y en especial a la Sección Mareas por las facilidades brindadas.

Este trabajo ha sido realizado en el marco de las actividades previstas en los siguientes proyectos:

- Desarrollo de un modelo zonal de predicción armónica de marea astronómica en el Río de la Plata (Sección Mareas, Departamento Oceanografía, Servicio de Hidrografía Naval).
- Estudio de la dinámica oceánica y atmosférica del Estuario del Río de la Plata mediante un sistema de modelado numérico integral (PICT - 2002, 07-12246).

REFERENCIAS

AA-AGOSBA-ILPLA-SHN (1997). Calidad de las Aguas de la Franja Costera Sur del Río de la Plata (San Fernando-Magdalena). Consejo permanente para el monitoreo de la calidad de las Aguas de la Franja Costera Sur del Río de la Plata. (Ed.) 157 pág.

Albarracín, J. I. (1987). Análisis de la hidrodinámica del Río de la Plata a partir de una simulación numérica, LHA-INCYTH -065-001-88, 141 pág.

Backhaus, J. O. (1983). A semi-implicit scheme for the shallow water equations for application to shelf sea modelling. *Continental Shelf Research*, 2(4), 243-254.

Backhaus, J. O. (1985). A three dimensional model for simulation of shelf sea dynamics. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*. 38(H.4), 164-187.

Backhaus, J. O. and Hainbucher (1987). A finite difference general circulation model for shelf sea and its applications to low frequency variability on the North European Shelf. In: Three dimensional model of marine and estuarine dynamics. J. C. Nihoul and B. M. Jamars, (Eds.). Elsevier Oceanographic Series. 45, Amsterdam, 221-244.

Balay, M. A. (1961). El Río de la Plata entre la Atmósfera y el Mar, Publicación H-601, Servicio de Hidrografía Naval, Armada Argentina. 153 pág.

Bazán, J. M. y Arraga, E. (1993). El Río de la Plata, un Sistema Fluvio-Marítimo Frágil?. Acercamiento a una Definición de la Calidad de sus Aguas. Conf. de Limnología, Instituto de Limnología “Dr. R.A. Ringuelet”, La Plata, 71-82.

Bazán, J. M. y Janiot, L. J. (1991). Zona de Máxima Turbidez y su Relación con Otros Parámetros del Río de la Plata. Informe Técnico No. 65/91, Servicio de Hidrografía Naval, Buenos Aires. 22 pág.

Boschi, E. E. (1988). El ecosistema estuarial del Río de la Plata (Argentina y Uruguay). Anales Instituto de Ciencias del mar Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, 15, 159-182.

CARP. (1989). Estudio para la Evaluación de la Contaminación en el Río de La Plata. Informe de Avance. Comisión Administradora del Río de La Plata. 421 pág.

Courtier, A. (1938). Marees. Serv. Hydr. Marine, París. Ed. S.H.O.M.
9-15

Cousseau, M. B. (1985). Los peces del Río de La Plata y su Frente Marítimo. IN: Yañez-Arancibia, A. (ED). Fish Community Ecology in Estuaries and Coastal Lagoons: towards and ecosystem integration. UNAM Press México. 515-534 pp.

D'Alvia, A. (1988). Cartografía Matemática, Publicación del Centro Argentino de Cartografía, Ciudad de Buenos Aires, 65 pág.

D'Onofrio, E. E., Frutos, H. C. y Balay, C. E. (1981). Nivel Medio del Mar en el Litoral Argentino. Informe Técnico, Departamento Oceanografía, Servicio de Hidrografía Naval. 63 pág.

D'Onofrio, E. E., Balay, C. E. y Balestrini, C. F. (1982). Manual de medición de marea. Informe Técnico N°11/82, Departamento Oceanografía, Servicio de Hidrografía Naval. 120 pág.

D'Onofrio, E. E. y Ricino, M. (1983). Sistema de Programas de Análisis Armónico y Predicción de Marea para una Computadora Hewlett Packard 21 MX, Informe Técnico N°06/83, Departamento Oceanografía, Servicio de Hidrografía Naval. 166 pág.

D'Onofrio, E. E. (1984). Desarrollo de un nuevo sistema de procesamiento de información de marea. Informe Técnico N°25/84, Departamento Oceanografía, Servicio de Hidrografía Naval. 167 pág.

D'Onofrio, E. E., Fiore, M. M. E. y Romero, S. I. (1999). Return Periods of Extreme Water Levels Estimated for Some Vulnerable Areas of Buenos Aires. *Continental Shelf Research*, 19, 1681-1693.

D'Onofrio, E. E., Fiore, M. M. E. y Valladares, J. A. (2002). Mareas e Inundaciones en la Ciudad de Buenos Aires. *Ciencia Hoy*, 12, 67, 38-45.

Doodson, A. T. (1921). Harmonic development of the tide-generating potential. *Proceedings of the Royal Society of London*, A100, 305-29.

Dragani, W. C. and Romero, S. I. (2004). Impact of possible local wind change on the wave climate in the upper Río de la Plata. *Int. J. Climatol.* 24; 1149-1157. DOI: 10.1002/joc.1049.

Felicísimo Pérez, A. M., Morán López, R., Sánchez Guzmán, J. M. y Pérez Mayo, D. (2001). Elaboración de un Atlas climático de Extremadura mediante un sistema de información geográfica, *GeoFocus*, N° 1, 17-23.

Foreman, M. G. M. (1977). Manual for tidal heights analysis and prediction. *Pac. Mar. Sci. Rep.* 77-10, 97pp, Inst. of Ocean Sci., Patricia Bay, Sidney, B. C. Canadá.

García, S. (2001). Vía Navegable Troncal Santa Fe – Océano. Sistema de adquisición de alturas hidrométricas, II Congreso Argentino de Ingenieros Portuarios. Asociación Argentina de Ingenieros Portuarios (AADIP), octubre de 2001. 10 pág.

Glorioso, P.D. and Simpson, J. H. (1994). Numerical modelling of the M₂ tide on the northern Patagonian shelf. *Continental Shelf Research*, 14, 267-278.

Glorioso, P. D. and Flather, R. A. (1995). A barotropic model of the currents off SE South America. *Journal of Geophysical Research*, 100, 13427-13440.

Glorioso, P. D. and Flather, R. A. (1997). The Patagonian Shelf tides. *Progress in Oceanography*, 40, 263-283.

Glorioso, P. D. (2000). Patagonian Shelf 3-D tide and surge model. *Journal of Marine Systems*, 24, 141-151.

Godin, G. (1972). *The Analysis of Tide*, Liverpool, University Press. 260 pp.

Golden Software, Inc. (1999). *Surfer User's Guide*, Golden Software, Inc, Colorado, 619 pp.

Guerrero, R. A., Acha, E. M., Framiñan, M. B. and Lasta, C. A. (1997). Physical Oceanography of de Río de la Plata Estuary, Argentina. *Continental Shelf Research*, 17, 7, 727-742.

Haltiner, G. J. (1971). *Numerical Weather Prediction*, John Wiley & Sons, Inc, New York, 317 pp.

Legal, N. (1995). Desarrollo de un Modelo Zonal de Predicción de Marea Utilizando Cartas Cotidales. Primer Informe. Beca de Perfeccionamiento. CONICET. 53 pág.

Moldes Teo, F. J. (1995). *Tecnología de los Sistemas de Información Geográfica*, Ra-Ma, 1ª Ed., Madrid.190 pág.

Molinari, G. N. (1986). Simulación numérica de la circulación en el Río de la Plata. LHA-INCYTH -S5-017-86, 116 pág.

Morillo Barragán, J., Pozo Baselga, J., Pérez Preciado, F., Rodríguez Gordillo, M. y Rebollo Castillo, F. J. (2002). Análisis de calidad de un modelo digital de elevaciones generado con distintas técnicas de interpolación, XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica, Santander, España 5-7 de junio de 2002. 12 pág.

Nagy, G. J., Martinez, C. M., Caffera, R. M., Pedraloza, G., Forbes, E. A., Perdomo, A. C. and Laborde, J. L. (1997). The Hydrological and Climatic Setting of the Río de la Plata In: The Río de la Plata, an Environmental Review, An EcoPlata Project Background Report. Dalhausie University, Halifax, Nova Scotia. 17-68.

O'Connor, W. P. (1991). A numerical model of tides and storm surges in the Río de la Plata estuary". *Continental Shelf Research*, 11, 1491-1508.

Olalde, A. (1988). Simulación numérica de la corriente de deriva en el Río de la Plata. LHA-INCYTH -065-002-88, 91 pág.

Palma, E. D., Matano, R. P. y Piola A. R. (2004). A numerical study of the Southwest Atlantic Shelf circulation: Barotropic response to tidal and wind forcing. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109, C08014, doi: 10.1029/2004jc002315,2004.

Perillo, G. M. E., Piccolo, M. C. y Pino Quivira, M. (1999). Estuaries of South America: their geomorphology and dynamics. *Environmental Sciences Series*, Springer-Verlag, Berlín 1-13.

Pineda Rojas, A. L. (2003). Depósito seco de dióxido de nitrógeno emitido en la Ciudad de Buenos Aires sobre aguas del Río de la Plata. Tesis de Licenciatura en Oceanografía. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. 126 pág.

Pugh, D. T. (1987). Tides, Surges and Mean Sea-Level. John Wiley & Sons Ltd. 472 pp.

Rodríguez, I. y Alvarez E. (1991). Modelo tridimensional de Corrientes. Condiciones de aplicación a las costas españolas y análisis de resultados para el caso de un esquema de mallas anidadas. *Clima Marítimo Report*, 42, 65 pp.

Schureman, P. (1988). Manual of armonic análisis and prediction of tides. U.S. Govt. Printing Office, Whashington, 317 pp. (1st. edition 1924; reprinted 1940, 1958, 1976, 1988).

Servicio de Hidrografía Naval (1999). Río de la Plata Medio y Superior, Carta Náutica H-116, 4ª Ed., Servicio de Hidrografía Naval, Armada Argentina.

Servicio de Hidrografía Naval (1999). Río de la Plata Exterior, Carta Náutica H-113, 2ª Ed., Servicio de Hidrografía Naval, Armada Argentina.

Servicio de Hidrografía Naval (2001). Derrotero Argentino, Parte I, Río de la Plata. Servicio de Hidrografía Naval, Armada Argentina, H-201. 296 pág.

Servicio de Hidrografía Naval (2005). Tablas de Marea. Servicio de Hidrografía Naval, Armada Argentina, H-610. 625 pág.

Simionato, C. G. and Núñez, M. N. (2001). The Salinity Front of the Río de la Plata – a numerical case study for winter and summer conditions. *Geophysical Research Letters*, Vol. 28, No. 13, 2641-2644.

Simionato, C. G., Dragani, W. C., Núñez, M. N. and Engel, M. (2002). A Set of 3-d Nested Models for Tidal Propagation from the Argentinean Continental Shelf to the Río de la Plata Estuary – Part I M₂. *Journal of Coastal Research*. Vol. 20 No.3. 893-912.

Simionato, C. G., Dragani, W. C. and Núñez, M. N. (2003). Propagacion de la onda de marea semidiurna lunar principal en la plataforma continental

Sudamericana Sudoriental y Río de la Plata. Simposio FREPLATA dentro de las actividades de las V Jornadas Nacionales de Ciencias del Mar, 8 al 12 de diciembre de 2003, Mar del Plata, Argentina. 4 pág.

Stok, P. Van Der (1897). Wind, Weather, Currents, Tides and Tidal Streams of the East Indian Archipelago. Batavia. See also Med. Verh. Kgl. nederl. met. Inst. no. 102. Utrecht, 1910.

Stronach, J. A., Backhaus J. O. and Murty T. S. (1993). An update on the numerical simulation of oceanographic processes in the waters between Vancouver Island and the mainland: the GF8 model. *Oceanography and Marine Biology: An annual Review* 31, 1-86.

UNESCO (1985). IOC Manual and Guides Nro. 14, 83 pp.

Vieira, A. and Lanfredi, N. W. (1996). A hydrodynamic model for the Río de la Plata. *Journal of Coastal Research*, 12(2), 430-446.

Yang, Chin-Shung, Kao, Szu-Pyng, Lee, Fen-Bin and Hung, Pen-Shan (2004). Twelve Different Interpolation Methods: A Case Study Of Surfer 8.0. National Chung Hsing University, Feng Chia University, Taichung, Taiwan. 8 pp.
www.isprs.org/istanbul2004/comm2/papers/231.pdf.