

Marianela Fornerino
Departamento de Hidráulica
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad del Zulia

Christian Le Provost
Institut de Mécanique de Grenoble
BP 64
38400 St Martin d'Heres
Francia

CORRIENTES RESIDUALES DEBIDAS A LAS MAREAS

*(Al Libertador Simón Bolívar,
en el bicentenario de su nacimiento)*

RESUMEN

Las corrientes residuales son responsables del transporte de sedimentos, contaminantes, etc. Las mareas en su propagación, debido a fenómenos no lineales, transmiten energía a la frecuencia nula. Las corrientes residuales debidas a las mareas se estudiaron a partir de una simulación numérica con un modelo de diferencias finitas que incluye los términos no lineales de las ecuaciones de Navier-Stokes. También fueron determinadas dos componentes no lineales de gran período (mensual y semi-mensual) que modulan las corrientes residuales,

ABSTRACT

Sediments and pollution transports are basically due to residual currents.

Non linear tidal propagation produce an energy transfer to the null frequency. Tidal residual currents are studied from a numerical simulation which uses finite differences method and includes non-linear terms of Navier-Stokes equations. Long period tidal components (monthly and semi-monthly) were also computed as they can be interpreted as fluctuations of the residual currents.

INTRODUCCION

La propagación de la marea en mares litorales engendra, por procesos no lineales, ondas de frecuencias diversas. En este trabajo, nuestro interés se centra en la componente media (frecuencia nula) que es engendada de la misma forma.

En el caso de las corrientes, esta componente

toma el nombre de corriente residual. Estas corrientes medias o residuales son las responsables de los transportes medios, y su estudio es por esto muy importante.

En efecto una partícula transportada por una corriente tendrá, durante un cierto período de tiempo, una deriva media o deriva lagrangiana (en cada instante, la partícula posee la velocidad local del fluido). Esta deriva lagrangiana se interpreta como la suma de dos derivas, producidas por procesos diferentes: deriva euleriana (corriente media en un punto dado) y la deriva de Stokes (efecto de los gradientes de velocidad en la dirección del transporte). La corriente residual es, desde el punto de vista práctico, la corriente que resta una vez filtradas las corrientes de período finito, en un punto.

Responsables de todos los fenómenos de transporte medio, las corrientes residuales interesan así a diferentes ramas de la oceanografía: geología, biología, ecología... (el transporte de sedimentos, de microorganismos, de algas, de contaminantes, etc., es de gran interés para las poblaciones costeras). De esta forma, el conocimiento completo de las corrientes instantáneas hace posible el establecimiento de un modelo de predicción de las trayectorias de un objeto que derive en el mar.

Presentaremos el resultado obtenido, a partir de una simulación numérica, de las corrientes residuales engendradas por la marea. Observaremos, sin embargo, que las corrientes residuales pueden tener tres orígenes diferentes: las mareas, los vientos y las corrientes de densidad. En este estudio hemos abordado únicamente aquellas producidas por el fenómeno de las mareas. La zona de aplicación es el Canal de la Mancha.

EL FENOMENO DE LAS MAREAS

Las mareas son un fenómeno bastante complicado (LE PROVOST 1974). Es engendrada en el océano debido a las fuerzas de atracción de los astros (la luna y el sol juegan un papel preponderante). Esta fuerza deriva de un potencial llamado potencial generador. Gracias a los trabajos de DARWIN (1883) y DOODSON (1921) se conocen las componentes espectrales de dicho potencial. En el océano se puede asociar a cada una de estas componentes espectrales un movimiento forzado del mismo período. DOODSON calculó efectivamente cerca de 400 componentes, lo que deja ver la riqueza de dicho espectro.

En los mares litorales (mares de poca profundidad a proximidad de los continentes) las fuerzas generadoras son despreciables debido a las dimensiones relativamente pequeñas de dichas zonas. Las mareas que allí se encuentran provienen de la propagación de la marea engendrada en los océanos que las bordean. Esta propagación en medios poco profundos se acompaña de fenómenos no-lineales importantes, y el espectro original se enriquece de nuevas frecuencias provenientes de la interacción de las componentes originales. LE PROVOST (1974) estudió el mecanismo de generación de las nuevas componentes. Una de ellas corresponde a la componente de frecuencia nula.

MODELO NUMERICO UTILIZADO

Este modelo ya ha sido descrito en otras publicaciones (FORNERINO y LE PROVOST (1982), FORNERINO (1982)), nos limitaremos ahora a recordar ciertas características:

a) Ecuaciones:

Se utilizan las ecuaciones de Navier-Stockes, incluyendo las hipótesis aceptadas para las mareas litorales y utilizando el formalismo de transporte de aguas integrado con la profundidad definido de la forma siguiente:

$$\vec{U} = \int_{-h}^{\xi} \vec{u} d\xi$$

donde: $\vec{u} = u\vec{i} + v\vec{j}$, $\vec{U} = U\vec{i} + V\vec{j}$, $H = h + \xi$

Así se obtienen las ecuaciones:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{U} = 0$$

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{H} \vec{U} \vec{U}) + \vec{k} \times \vec{U} = -gH\vec{\nabla} \xi - \frac{D}{H^2} \vec{U} |\vec{U}|$$

con las notaciones:

\vec{i} y \vec{j} : Vectores unitarios en un sistema de ejes (x,y).

ξ : Variación del nivel de la superficie libre del mar.

h : Profundidad media.

u y v : Componentes de la velocidad según x e y respectivamente.

U y V : Componentes del transporte integrado con la profundidad (según x e y respectivamente).

g : Aceleración de la gravedad.

f : Parámetro de Coriolis

D : Coeficiente de fricción.

b) Método numérico empleado

Se trata de un esquema predictor-corrector (RONDAY, 1977). La precisión del esquema es de segundo orden en el espacio y el tiempo, lo cual es necesario para reproducir los procesos no lineales (que son responsables de la generación de las corrientes residuales, entre muchas otras componentes).

La malla espacial es de 10 km. x 10 Km. Como el esquema numérico es explícito, la condición de estabilidad prescribe un paso de tiempo máximo de 184 segundos.

c) Discretización del área de estudio

El canal de la Mancha fué discretizado tal como se representa en la Figura 1. Existen dos fronteras abiertas AB de Roscoff (Francia) a Devonport (Inglaterra) y de Ramsgate (Inglaterra) a Ostende (Bélgica).



d) Condiciones límites

a) En las fronteras costeras se impuso la condición de no deslizamiento.

b) En las fronteras abiertas se introdujo la variación temporal del nivel del mar. Esta es una de las principales dificultades del problema ya que no se poseen observaciones de campo. La información se obtuvo del conocimiento de las componentes armónicas en los puertos que limitan el área estudiada. Para la distribución de las amplitudes y fases de los componentes entre los puertos, se utilizaron los resultados obtenidos a partir de un modelo hidráulico (CHABERT D'HIERES y LE PROVOST 1978).

Se llevó a cabo una simulación de la evolución de la marea en un mes para poder representar las modulaciones mensuales y semimensuales. Esto implica el imponer una variación del nivel del mar en las fronteras abiertas, basada en un número suficiente de componentes armónicas. Nosotros simulamos 21 componentes armónicas: diurnas (O_1, K_1, Q_1), astronómicas semidiurnas ($M_2, S_2, N_2, \mu_2, L_2, \epsilon_2$), no lineales semidiurnas ($MNS_2, 2MS_2, 2MN_2, 2SM_2, MSN_2$), cuarto-diurnas (M_4, MS_4, MN_4), sexto-diurnas ($M_6, 2MS_6, 2MN_6, 2MSN_6$).

La evolución de la superficie libre del mar y las velocidades medias fueron obtenidas durante un mes en cada nudo de la malla. Mediante un análisis armónico (BERTHERAT, 1981, LE PROVOST, 1978), se obtuvo una serie de cartas que sintetizan los resultados concernientes las componentes armónicas de los niveles y de las corrientes en toda el área estudiada (FORNERINO (1982)).

Una de las aplicaciones directas de estos resultados fue la predicción, con bastante precisión de niveles y corrientes de marea, en cualquier punto y cualquier instante en el Canal de la Mancha (FORNERINO, 1982).

a) Las corrientes residuales

En la Figura 2, se muestran los resultados que conciernen las corrientes medias o residuales obtenidas de la simulación numérica durante un mes. En una simulación con la presencia de diversas ondas de diferentes períodos, la media de las corrientes no tiene ninguna significación; las ondas cuyo período no es submúltiplo del período simulado aportan, a esta media, una contribución que falsea el verdadero valor de las corrientes de frecuencia nula. El cálculo de las corrientes residuales a partir de una simulación tal se hace de la manera siguiente:

1. A partir de las componentes armónicas calculadas con un análisis armónico de las series numéricamente simuladas, se calcula una serie aproximada Sub tal que:

$$Sub_{(x,y,t)} = \sum_{i=1}^N S_i(x,y) \cos(\omega_i t - \gamma_i(x,y))$$

donde:

N : número de componentes armónicas

$S_i(x,y)$, ω_i y $\gamma_i(x,y)$: Amplitud, frecuencia y fase de la componente i respectivamente.

Esto se hace para cada componente u y v de la velocidad en toda el área de estudio.

2. El residuo $\epsilon_{(x,y,t)}$ se calcula de la forma siguiente:

$$\epsilon_{(x,y,t)} = S_{sim}(x,y,t) - Sub_{(x,y,t)}$$

donde: $S_{sim}(x,y,t)$: es la serie bruta resultante de la simulación numérica.

3. La componente residual (S_o) se define así como la media del residuo ϵ en un mes.

$$S_o = \frac{1}{T} \int_0^T \epsilon_{(x,y,t)} \cdot dt \approx \frac{\sum_{n=1}^{Np} \epsilon_{(x,y,n\Delta t)} \cdot \Delta t}{Np \cdot \Delta t}$$

donde:

T : es el período de la serie

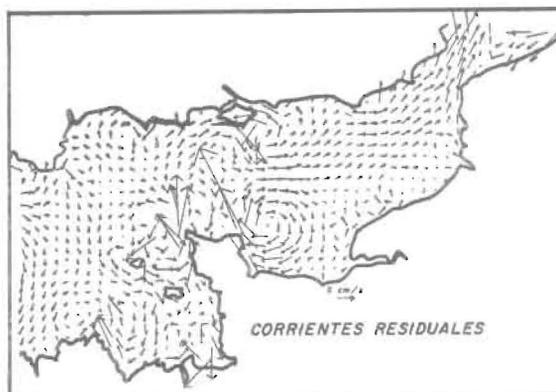
Np : es el número de la serie temporal

t : es el paso de tiempo de la serie simulada

De esta forma se está seguro de haber filtrado las componentes armónicas analizadas, que son además, las más importantes en magnitud.

Es remarcable la existencia de torbellinos de mayor o menor extensión e importancia (ver Figura 2).

En la bibliografía se encuentran numerosos estudios sobre el mecanismo de generación de las corrientes residuales y sobre todo sobre el origen de los torbellinos.



Estas estructuras de torbellinos han sido observadas experimentalmente en modelos numéricos que tomen en cuenta los términos no lineales de advección (PINGREE y MADDOCK (1977), LOMER (1978), en lo que concierne el Canal de la Mancha; muchos otros autores las han observado en modelos de otros mares.

Estudios más fundamentales sobre el origen de estas estructuras han sido realizadas por NIHOUL y RONDAY (1974) y ZIMMERMAN (1978), por ejemplo. Estos estudios muestran que son principalmente las irregularidades de la topografía, las responsables de la transferencia de vorticidad de las frecuencias de las mareas a la frecuencia nula. ZIMMERMAN muestra que la producción de corrientes residuales depende grandemente de la elongación de las corrientes de marea en relación con la escala de las irregularidades del fondo, lo cual explica la gran influencia de las dimensiones del tamaño de la ma-

Del análisis armónico se obtuvo, además de las componentes armónicas introducidas en las fronteras abiertas, dos componentes adicionales de origen no lineal de período grande: semimensual (onda MS_0) y mensual (onda MN_0). Estas corresponden a fenómenos de interacción entre las ondas M_2 y S_2 y M_2 y N_2 respectivamente. Los valores de los parámetros armónicos de estas ondas se presentan en las Figuras 3 y 4. Estas componentes son pequeñas pero de la misma magnitud que las corrientes residuales, correspondiendo así a modulaciones semi-mensuales y mensuales de estas mismas.

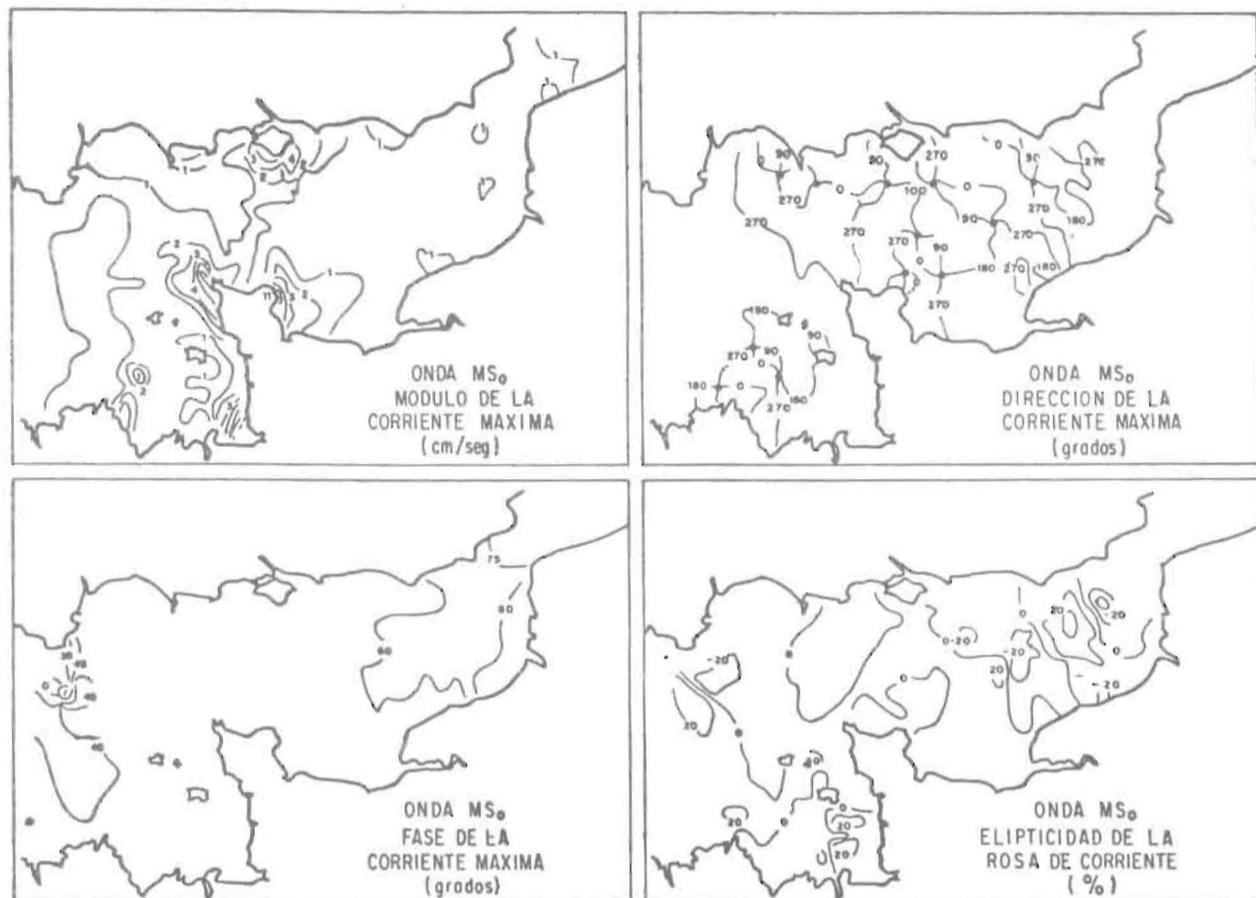


Fig. 3

lla, en los modelos numéricos, para la simulación de las corrientes residuales.

Algunos de los torbellinos obtenidos por nuestra simulación numérica han sido observados a partir de datos de campo (CUQ, MADEC, THOMAS y ZBINDEN (1982), BERTHERAT, CARCEL y LE PROVOST (1981), GUEGUENIAT (1982)).

b) Modulaciones mensuales y semimensuales de las corrientes residuales

Se observa a partir de la carta de direcciones de la corriente máxima, ciertas características particulares a estas ondas de gran período. Existen puntos alrededor del cual las líneas de igual dirección de corriente máxima pivotean, quedando la fase constante. De esta forma, estando las corrientes en fase, los máximos y los mínimos se alcanzan simultáneamente en estas zonas (en el punto mismo el módulo es nulo). La dirección se cambia de 180° para puntos diametralmente opuestos. Esto permite cernir estructuras de torbellinos que coinciden de

manera sorprendente con los observados a la frecuencia nula. Todo esto, a pesar de ser sorprendente, es lógico ya que el origen de las componentes de frecuencia nula y de períodos grandes es el mis-

males de advección de las ecuaciones de Navier-Stokes.

Estas corrientes son fundamentales en el estu-

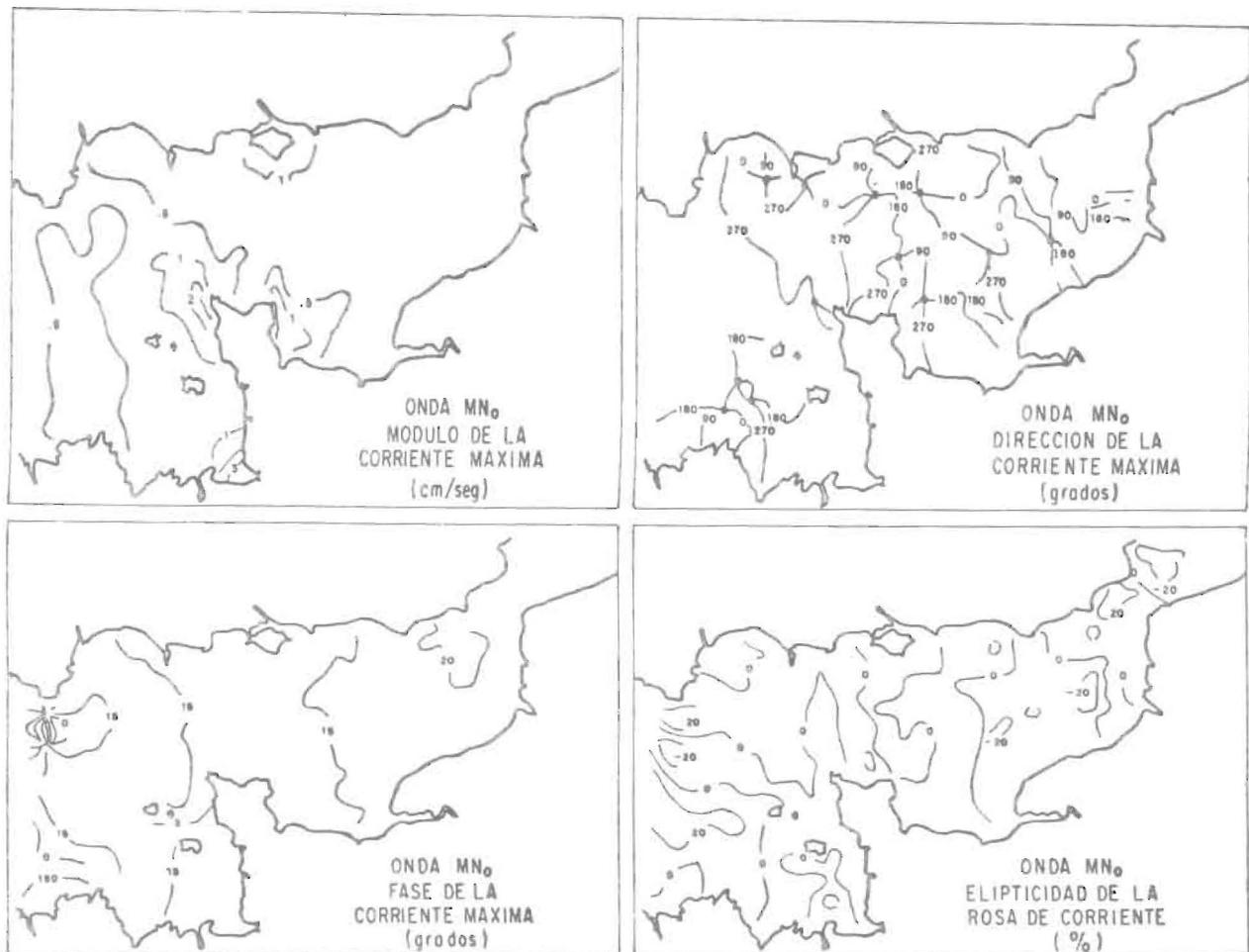


Fig. 4

mo. Estos torbellinos se desarrollan en un sentido y luego en el otro, durante un período de la onda respectiva.

CONCLUSIONES

A partir de la simulación numérica realizada, hemos podido obtener el valor de las corrientes residuales en toda el área de estudio y sus modulaciones semi mensuales y mensuales (ondas MNO y MSo).

Esto se debe a la precisión del modelo numérico utilizado, que toma en cuenta los términos no li-

dio de transporte realizado por las masas marinas (sedimentos, contaminantes, etc.)...

Este estudio permitió también detectar la existencia de torbellinos relacionados primordialmente con los accidentes topográficos. (El centro de los torbellinos, puntos de velocidades nulas, son lugares de depósito frecuente de materiales transportados por el mar).

Estos patrones de corrientes residuales debidos a las mareas, pueden servir de base a aplicaciones específicas en las ramas de la ecología, geología, etc...

BIBLIOGRAFIA

1) BERTHERAT: "Sur l'analyse et la prédiction des marées a partir d'enregistrements de courte

durée". These 3eme cycle USMG-INPG, Grenoble, 1981.

- 2) BERTHERAT, CARCEL y LE PROVOST: "Analyse de courants et niveaux en Baie de Seine". Rapport final, contrat CNEXO No. 79/6041, 1981.
- 3) CHABERT D'HIERES, C. y LE PROVOST: "Atlas des composantes harmoniques de la marée dans la Manche". Annales Hydrographiques vol. 6, fas. 3, 1978.
- 4) CUQ, MADEC, THOMAS y ZBINDEN: "Télédétection de la dynamique des suspensions en Baie de Seine par analyse d'images Landsat". Communication présentée au Colloque de Greco-Manche, Paris, 15 Nov., 1982.
- 5) DOODSON: "The harmonic development of the Tide Generating Potential". Proceeding of the Royal Society A, vol. 100, pp. 305-328, 1921.
- 6) DARWIN: "Report on harmonic analysis of tidal observation". Brit. Ass for adv. Sci, Reo. pp. 48-118, 1883.
- 7) FORNERINO: "Modelisation des courants de marée dans la Manche". Tesis de doctorado. Instituto Politécnico de Grenoble, 1982.
- 8) FORNERINO y LE PROVOST: "Modelaje de las mareas predicción de corrientes". XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. México, 1982.
- 9) LE PROVOST: "Contribution a l'etude des marées dans les mers littorales". Application a la Manche, These Docteur-es-Sciences Phys. USMG, INPG, Grenoble, 1974.
- 10) LE PROVOST: "Analyse harmonique d'enregistrements de marées". Rapport interne, Institut de Mécanique de Grenoble, 1978.
- 11) NIHOUL y RONDAY: "The influence of the tidal stress on the residual circulation". Tellus , XXVII, 5, 1975.
- 12) PINGREE y MADDOCK: "Tidal residuals in the English Channel". J. Mar. Biol. Ass. U.K., 57 (2) pp. 339-354, 1977.
- 13) RONDAY: "Courants des marées et circulation résiduelles dans la Manche". Rapport Interne, Institut de Mécanique de Grenoble, 1977.
- 14) ZIMMERMAN: "Topographic generation of residual circulation by oscillatory (tidal) currents". Geophys. Astrophys. Fluid Dynamics, Vol. 11, pp. 35-47.

Recibido el 14 de junio de 1983