

Mariela Fornerino
Jean-Marc Molines
Departamento de Hidráulica
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad del Zulia
Maracaibo, Venezuela

MODELO NUMERICO HIDRODINAMICO DEL GOLFO DE VENEZUELA

V Jornadas Nacionales de Ingeniería Hidráulica

RESUMEN

El presente trabajo muestra los primeros resultados obtenidos con la implementación de un modelo numérico hidrodinámico del Golfo de Venezuela. El modelo numérico utiliza un método de diferencias finitas, adaptado a la representación de los fenómenos no-lineales de las mareas litorales. El análisis de los datos generados por el modelo se hace en base a la representación armónica de las mareas.

Se presentan los resultados concernientes a los niveles y corrientes debidas a la marea. En particular, se muestra un ejemplo de mapas de corrientes instantáneas. Esta primera etapa de este estudio, involucra solo tres ondas de marea, las cuales son las más importantes. En una etapa posterior, se simularán las 15 ondas significativas de la zona.

ABSTRACT

This paper shows the first results obtained with the implementation of an Hydrodynamic Numerical Model of the Golfo de Venezuela. The numerical model uses finite differences, adapted to the non-linear phenomena representation of the litoral tides. The analysis of the data generated by the model was made based on the harmonic representation of the tides.

Results concerning the levels and currents due to the tide are presented. In particular, an example of the maps of the instantaneous currents is shown. This first stage, of the study, involved just three tidal waves, which are the most important. In a next stage, it will be simulated the fifteen significative waves in the area.

INTRODUCCION

Todos los problemas de contaminación y transporte de sedimentos que se encuentran en la zona del Lago de Maracaibo necesitan, para su solución, un estudio hidrodinámico del sistema global.

Este último no puede excluir al Golfo de Venezuela. El papel de éste en la recuperación de las aguas del Lago es preponderante. Por otro lado, es sabido que una buena parte de los sedimentos que se encuentran en el canal de navegación provienen del Golfo.

El golfo de Venezuela es una extensión del Mar Caribe. Puede limitarse por el norte con la línea que une los puntos más al norte de las penínsulas de la Guajira y de Paraguaná, la cual coincide, aproximadamente, con el límite de la plataforma continental. Al sur, se conecta con la Bahía del Tablazo, a través de tres pequeñas bocas: San Carlos, Cañonera y Cañonera. Siendo la primera la más importante, donde atraviesa el canal de navegación.

Las mareas en el Mar Caribe, en su conjunto, son de poca amplitud (KJERFVE, 1980). Pero las dimensiones del Golfo de Venezuela le atribuyen a este último un período propio tal, que las ondas de marea de período semidiurno entran en resonancia. Por ejemplo, la onda M_2 , la más importante del espectro, la cual posee una amplitud cercana de 10 cm. en Amuay, alcanza los 42 cm. en la entrada de San Carlos.

En toda la zona del Golfo, se dispone de dos mareógrafos permanentes: Amuay y Malecón (Boca de San Carlos). Existen también registros de algunos meses en Casusay y Punta Perret (figura n°2) (PAZ-CASTILLO, 1972). Las mediciones de niveles existen, entonces, solo en cuatro puntos, y las mediciones de corrientes son, de acuerdo a nuestro conocimiento, inexistentes.

A pesar de esta escasez de datos de campo, se implementó un modelo numérico de diferencias finitas para estudiar el comportamiento hidrodinámico, y especialmente, las corrientes de mareas.

II ECUACIONES DE LAS MAREAS LITORALES

Las ecuaciones de la mecánica de los fluidos aplicadas a las mareas litorales, toman la forma siguiente:

1) CONSERVACION DE LA MASA

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{U} = 0 \quad (1)$$

2) CONSERVACION DE LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \left(\frac{\vec{U} \cdot \vec{U}}{H} \right) + \vec{f} \times \vec{U} = -g H \vec{\nabla} \xi - \frac{D}{H} \vec{U} |\vec{U}| \quad (2)$$

con la siguiente notación :

$$\vec{U} = \int_{-h}^{\xi} \vec{u} \, dh \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Integral de la velocidad sobre la} \\ \text{profundidad instantánea} \\ \text{(caudal por unidad de ancho)} \end{array} \right.$$

\vec{u} = Vector velocidad

$H = h + \xi =$ profundidad media + marea

\vec{f} = Parámetro de Coriolis = $2\Omega \text{sen} \phi$.

Ω = Velocidad angular de rotación de la tierra

ϕ = Latitud del lugar en estudio

D = Factor de fricción.

3) HIPOTESIS

Estas ecuaciones escritas así, toman en cuenta las hipótesis siguientes :

i) Hipótesis de ondas largas.

Las velocidades son esencialmente horizontales (no hay componente vertical de la velocidad). Esta hipótesis se justifica totalmente para una onda de marea que tiene una longitud de onda de varias centenas de Kms. y una amplitud que está en el orden del metro. ($a/\lambda \ll 1$)

ii) Se trabaja con la velocidad integrada sobre la vertical.

Esto permite no hacer suposiciones sobre la distribución vertical de las velocidades. Esta última es muy difícil de evaluar, pues depende de la distribución espacio-temporal de la viscosidad turbulenta, sobre la cual se aboca la investigación en nuestros días.

iii) La densidad se supone uniforme, espacialmente y temporalmente.

iv) La fuerza de fricción en el fondo es simulada por una fuerza de fricción en toda la masa según la fórmula de Chézy.

4) COMENTARIOS

En la ecuación (2) se reconocen los siguientes términos :

*) Convectivo: $\vec{\nabla} \cdot \vec{U} \cdot \vec{U}$, no-lineal

***) De presiones debido a la pendiente de la superficie libre : $-gH\vec{\nabla}\xi$

****) De Coriolis debido a la rotación de la Tierra : $\vec{f} \times \vec{U}$

*****) De fricción : $-\frac{D}{H} \vec{U} |\vec{U}|$, no-lineal.

III) ALGORITMO NUMERICO DE RESOLUCION DE LAS ECUACIONES

1) METODO PREDICTOR-CORRECTOR :

Se utiliza un esquema de diferencias finitas explícito. El método utilizado, llamado Predictor-Corrector (RONDAY, 1977), resuelve las ecuaciones en dos pasos :

- El primero (Predictor) utiliza el esquema de derivadas descentradas para la discretización de los términos de convección. Tiene la característica de ser incondicionalmente estable, pues introduce implícitamente un término de viscosidad, pero su precisión es tan solo de primer orden.

- El segundo (Corrector) corrige los resultados del Predictor utilizando el esquema de derivadas centradas para discretizar los términos de convección. La precisión es de segundo orden, es decir mejor, pero el esquema es inestable, ya que introduce un término de difusión negativo. Para eliminar esta inestabilidad, hay que introducir un término de viscosidad artificial (positivo) de la forma $\nu(\partial^2 u / \partial x^2 + \partial^2 v / \partial y^2)$ donde ν es la viscosidad artificial.

En las zonas litorales, los términos no-lineales son importantes. De allí se deriva la importancia en la forma de discretizar el término de convección. La conjunción de los dos métodos, en los dos pasos, se presenta como una buena alternativa para la representación de los fenómenos no-lineales encontrados en las zonas litorales.

2) MALLA ESPACIAL DE CALCULO :

La malla utilizada, la mejor adaptada a problemas oceanográficos (BATTEN & HAN, 1981), es una malla descentrada y se muestra en la figura n°1.

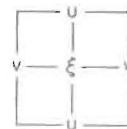


Figura No. 1

3) CONDICIONES LIMITES :

La malla de cálculo utilizada posee la ventaja adicional de que permite imponer en las fronteras una sola de las tres variables ξ , U ó V .

i) En la costa : (frontera cerrada)

Se impone una condición de impermeabilidad, es decir que la velocidad normal a la costa sea nula.

ii) En las fronteras abiertas :

Se impone la variable ξ . La variación de nivel se conoce mejor que las velocidades a partir de datos de campo. Se utiliza la representación armónica de la marea, es decir, que la variación de nivel ξ , puede ser representada así :

$$\xi(t) = \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t - \phi_i) \quad (3)$$

donde :

A_i , ϕ_i , ω_i : amplitud, fase y pulsación de la onda i

N : número de ondas tomadas en cuenta

t : tiempo

Los valores de A_i y ϕ_i se conocen a partir de análisis armónicos de datos de campo (MOLINES y FORNERINO, 1985). ω_i se conoce a partir de cálculos astronómicos e hidrodinámicos (DOODSON, 1928).

Para esta primera etapa del estudio, se introdujeron solo tres ondas : M_1 , M_2 y M_4 . M_2 es la onda principal lunar (de período : 12 horas y 25 minutos) la más importante en toda la zona. M_4 es su primera armónica, resultante de los fenómenos no-lineales de propagación. La onda M_1 es en realidad una aproximación de la onda K_1 astronómica (la onda diurna más importante de la zona), de período igual a 23 horas y 56 minutos. El período se toma en esta simulación como de 24 horas y 50 minutos, de tal forma que corresponda a dos veces el período de M_2 y facilitar así el análisis armónico de los resultados.

4) CONDICIONES DE ESTABILIDAD :

El esquema utilizado es explícito. Se aplica la condición de estabilidad de Courant-Friedrich - Levy (CFL), de acuerdo a la cual la velocidad de cálculo debe ser superior a la velocidad de propagación de la onda, multiplicada por $\sqrt{2}$, en cualquier punto. En consecuencia debe cumplirse que :

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} > (\sqrt{2gH} + u)_{\max}$$

IV IMPLEMENTACION DEL MODELO

1) DISCRETIZACION UTILIZADA : (figura n°2)

La dimensión de la malla es $\Delta x = \Delta y = 9,58$ Kms. Para cumplir con la condición de estabilidad, $\Delta t = 245.604$ seg.



— Figura N° 2 —

2) FRONTERAS ABIERTAS :

NORTE : Debido a la no existencia de datos de campo sobre la frontera norte natural del Golfo, el modelo se delimitó por la línea propuesta por (KJERFVE, 1981), a lo largo de la cual la onda M_2 es constante e igual a 10 cm. Esta línea parte de Punta Espada en la Guajira y llega a Punta Salinas en Paraguaná.

SUR : Comunicación con la Bahía el Tablazo en el lugar de la Boca de San Carlos. Esta frontera abierta tiene la dimensión de una malla de cálculo.

3) CALIBRACION

La teoría espectral de marea, permite imponer en las fronteras abiertas la variación de nivel en función de los parámetros armónicos (ecuación 3). La calibración del modelo consistiría, así, en un ajuste del coeficiente de fricción de Chézy y de la viscosidad numérica, a fin de obtener una buena coincidencia de las componentes armónicas de niveles, dentro del dominio, con los datos de campo. La escasez de registros de campo dificulta

grandemente la calibración del modelo. La posibilidad de situar la frontera sobre la línea que une a Punta Perret con Amuay (donde existen registros de niveles), fue estudiada en un principio. Pero de esta forma, el control de calibración se situaría únicamente en Casusay. A partir de los datos de campo, (Tabla n°1), existe una cierta desconfianza con respecto a la fase de la onda M_2 obtenida en Casusay. Este resultado implicaría que dicha onda se encuentra en avance, en este sitio, con respecto a Punta Perret. Lo cual, desde el

punto de vista hidrodinámico resulta ilógico. Esta fue la razón que determinó la frontera norte definitiva del modelo. De esta forma, Punta Perret y Amuay pasan a ser puntos de control, y las condiciones límites, en dicha frontera, parámetros de calibración. Los resultados de este ajuste se muestran en la tabla n°1. Es de observar que la onda M_1 no corresponde sino a una primera aproximación de K_1 , ya que poseen casi una hora de diferencia en su período. La calibración se hizo básicamente controlando la onda M_2 .

	ONDA M_1				ONDA M_2			
	Amplitud (cm)	Fase (Grados)	Campo	Modelo	Amplitud (cm)	Fase (Grados)	Campo	Modelo
AMUAY	12.4	11	243	242	10.3	11.1	252	248
PUNTA PERRET	11.0	13	243	242	24.1	22.7	241	248
CASUSAY	14.8	14	244	246	39.6	40.1	240	260
MALECON	13.6	13.6	245	245	40.7	40.6	272	272

Tabla No. 1

VI RESULTADOS

1) NIVELES :

En las figuras n°3 se muestran los mapas de iso-valores de las amplitudes y fases de las ondas M_1 y M_2 . A partir de estas se pueden hacer ciertas observaciones :

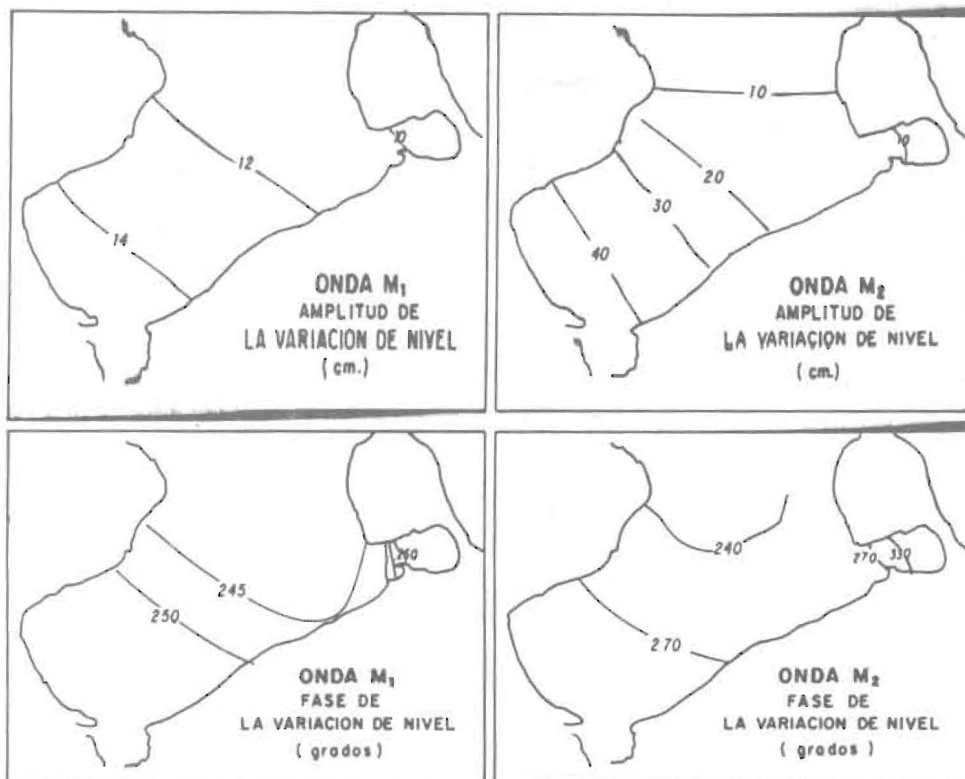
- El modelo representa la fuerte resonancia de la onda M_2 , evidenciada por los datos de campo que le asignan una amplitud de 10 cm en Amuay y 42 cm en Malecón.
- La amplificación de M_1 es mucho menor. La resonancia se presenta a nivel de las ondas de período semi-diurno, lo cual le asigna un carácter netamente semi-diurno a las mareas en el Golfo.
- La variación de fase para las ondas M_1 y M_2 es pequeña en todo el dominio. Esto es debido al carácter estacionario de estas ondas.

2) CORRIENTES :

Siendo la velocidad una cantidad vectorial, deberían presentarse 4 parámetros armónicos: las amplitudes y las fases de dos componentes de la ve-

locidad (u y v). Se ha preferido la representación con otros cuatro parámetros : módulo, fase y dirección de la corriente máxima, y elipticidad de la rosa de corriente. En efecto, esta manera de representar los resultados sobre las corrientes es totalmente equivalente a la primera, pero la interpretación física es más evidente. Para una onda de marea, la rosa de corriente asociada, es un elipse (Figura n°4). Ella se define entonces, por su semi-eje mayor (corriente máxima), su dirección y su fase, así como también la relación entre el eje menor y mayor (elipticidad).

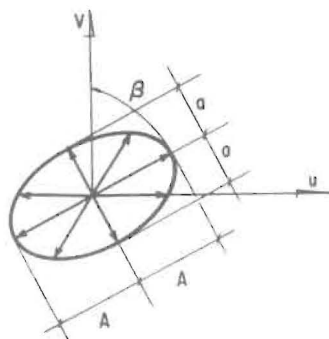
En este trabajo se muestran solamente las características de la onda principal M_2 (figura n°5). Se observan fuertes corrientes cerca de la península de la Guajira. Las corrientes máximas están prácticamente en fase en toda la zona. Como la elipticidad es muy pequeña, se deduce que las corrientes son unidireccionales, en la dirección longitudinal del Golfo. Sólo cerca de las entradas del Lago de Maracaibo y del Golfete de Coro, las corrientes son giratorias y alcanzan una elipticidad de 25%. Otra manera de presentar estos resultados, quizás mucho menos concisa, pero más evidente, son los mapas de corrientes referidas a un instante dado. Se presenta un ejemplo de los mismos en la figura n°6.



— Figura N° 3 —

CARACTERISTICAS DE LA VARIACION DE NIVEL DE LAS ONDAS M₁ Y M₂

Figura No. 4



PARAMETROS QUE DEFINEN LA ROSA DE CORRIENTE CORRESPONDIENTE A UNA ONDA DE MAPEA

- 1) A : corriente máxima
- 2) B : dirección de la corriente máxima (con respecto al Norte)
- 3) Fase de la corriente máxima
- 4) Elipticidad : $R = 100 (\%)$ donde a : corriente mínima.

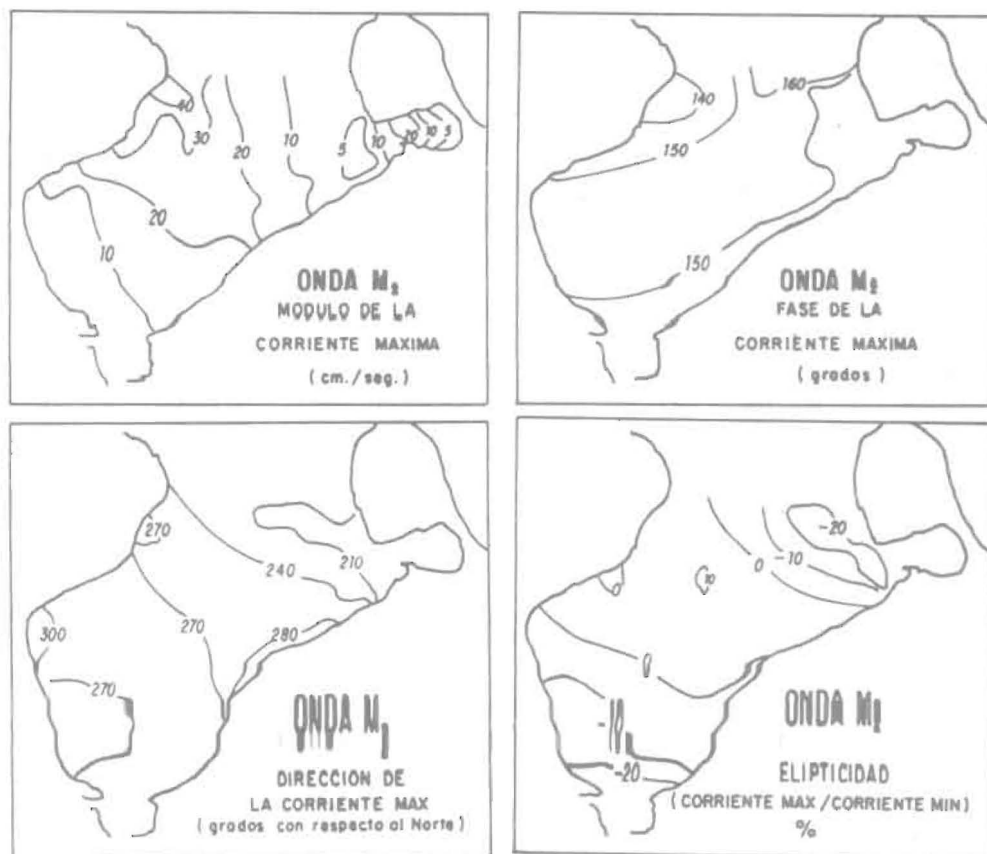


Figura No. 5

CARACTERISTICAS DE LAS CORRIENTES DE LA ONDA M₂

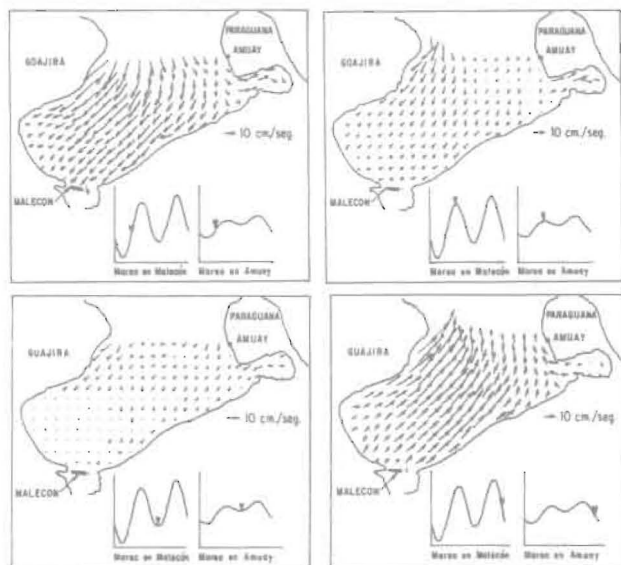


Figura No. 6

MAPAS DE CORRIENTES INSTANTANEAS

El tiempo de ocurrencia está referenciado con respecto a la marea en Amuay y Malecón

VII CONCLUSIONES

Estos resultados sobre corrientes de marea en el Golfo son, a nuestro conocimiento, los primeros que informan sobre la circulación en dicha zona.

En esta primera etapa del estudio, se logró la representación de 3 ondas de marea. El espectro de marea en esta zona tiene alrededor de 15 ondas significativas. La exclusión de las ondas restantes obedece simplemente a fines de reducir el tiempo de cálculo en la calibración: el análisis armónico de los resultados con las 3 ondas necesita solo series simuladas durante 24 horas y 50 minutos, en cambio, con las 15 ondas significativas se necesita una simulación mínima de 1 mes. La continuación de este estudio consiste, entonces, en la simulación de todas estas ondas. Este método dió excelentes resultados en la predicción de corrientes en el Canal de la Mancha (FORNERINO, 1982)

VIII BIBLIOGRAFIA

- 1) BATEN and HAN : "On the computational noise of finite-differences Schemes used in Ocean Models" *Tellus* 33 pp. 387-396, 1981.
- 2) DOODSON ; "The analysis of tidal observations". *Phil. Trans. Roy. Soc. A* 227 pp. 90-108, 1926.
- 3) FORNERINO : "Modélisation des courants de marée

dans la Manche". Tesis de doctorado. Universidad de Grenoble. Francia, 1982.

- 4) KJERFVE : "Tides of the Caribbean Sea". *Journal of Geophys. Res.* 86(C5) pp. 4243-4247, 1981.
- 5) MOLINES, FORNERINO : "Predicción de mareas en el Lago de Maracaibo". *Rev. Téc.* Vol. 8, No.1, pp. 9-18, 1985.
- 6) RONDAY : "Courants de marée et circulation résiduelle dans la Manche". Informe Interno I.M.G. Grenoble, Francia, 1977.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se lleva a cabo bajo el convenio firmado entre la Universidad del Zulia y el Instituto para el Control y la Conservación de la Cuenca del Lago de Maracaibo (ICLAM). Su realización ha sido posible gracias al apoyo institucional de la primera y al aporte financiero de la segunda. Los Autores agradecen también la ayuda técnica desinteresada del Ing. Nelson Velazco del Centro de Cálculo de Computación de LUZ y al Dr. Christian Le Provost del Instituto de Mecánica de Grenoble (Francia), por las interesantes discusiones con él sostenidas.

Los datos de campo fueron suministrados por la Dirección de Cartografía Nacional del MARNR y por el Instituto Nacional de Canalizaciones.

Recibido el 22 de abril de 1986