

# LAS MAREAS: ANÁLISIS Y PRONÓSTICO

Rodolfo Ramírez Xicotencatl, Manuel Mendoza Grande, Edy Nelson Sánchez Blanco  
[rramirez@imt.mx](mailto:rramirez@imt.mx), [mmendoza@imt.mx](mailto:mmendoza@imt.mx), [esanchez@imt.mx](mailto:esanchez@imt.mx)

## INTRODUCCIÓN

Las mareas y los cambios del nivel del mar influyen en muchos de los procesos biológicos y geológicos marinos, y a largo plazo tienen incidencia sobre la ocupación de las costas, es un indicador importante del cambio climático y los procesos relacionados.

La medición del nivel del mar es el procedimiento a través del cual se reúne la información de las variaciones de la elevación del mar debido a las fuerzas de atracción gravitacional del sol y la luna, así como las originadas por perturbaciones meteorológicas.

Dado que la medición del nivel del mar es aplicable en temas prácticos como la construcción de infraestructura costera, el transporte marino y la erosión costera, la elevación de las mareas se calcula tomando como referencia una elevación base, nivel o plano de referencia, que cada país adopta según las características de cada costa. Los planos de referencia de mareas varían según el lugar y se definen en términos de cierta fase de la marea. Los niveles de referencia se dan con respecto a puntos que se han medido y marcado sobre tierra firme mediante bancos de nivel fijos. Debido a la gran variación de las mareas, todos los planos de referencia de mareas son locales y no se deben extender a grandes distancias.

## PLANOS DE REFERENCIA EN MÉXICO

En México, se han establecido los correspondientes planos de marea que a continuación se describen:

- **Altura Máxima Registrada:** Nivel más alto registrado en la estación por efecto de algún tsunami o ciclón.
- **Pleamar Máxima Registrada:** Nivel más alto registrado debido a las fuerzas de marea periódica o a los efectos de condiciones meteorológicas.
- **Nivel de Pleamar Media Superior (N. P. M. S.):** Promedio de las más altas de las dos pleamares diarias, durante el período considerado en cada estación.
- **Nivel de Pleamar Media (N. P. M.):** Promedio de todas las pleamares durante el período considerado en cada estación.
- **Nivel Medio del Mar (N. M. M.):** Promedio de las alturas horarias durante el período considerado en cada estación.
- **Altura Mínima Registrada.** Nivel más bajo, registrado en la estación por efecto de algún tsunami.
- **Bajamar Mínima Registrada.** Nivel más bajo registrado debido a las fuerzas de marea periódica, o a los efectos de condiciones meteorológicas.
- **Nivel de Bajamar Media Inferior (N. B. M. I.):** Promedio de la más baja de las dos bajamares diarias, durante el período considerado en cada estación. Este plano es el que se utiliza como plano de referencia para el pronóstico de mareas en la costa del Pacífico y Golfo de California.

- Nivel de Bajamar Media (N. B. M.). Promedio de todas las bajamares durante el período considerado en cada estación.
- Nivel de Media Marea. Plano equidistante entre la pleamar y bajamar medias, se obtiene promediando estos dos valores.

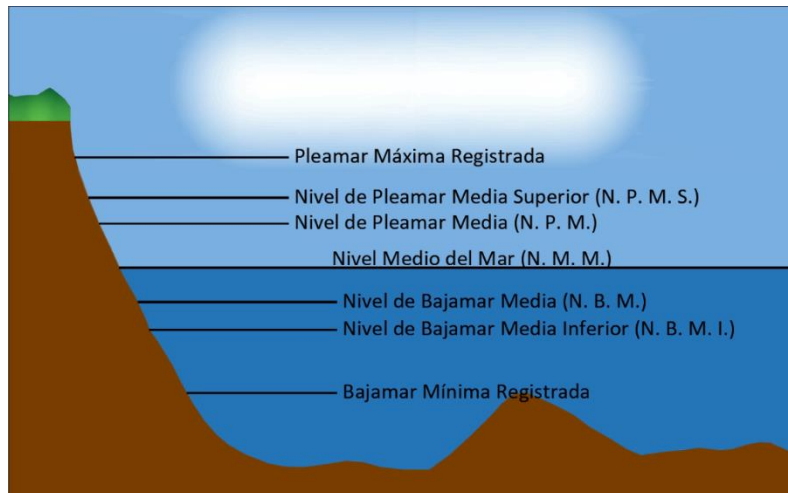


Figura 1. Definición de los planos de referencia en México

A partir de la información de las mediciones del nivel de mar es posible determinar mediante un análisis armónico, las características de la marea astronómica como lo son: tipo, niveles horarios y constantes armónicas.

## ANÁLISIS ARMÓNICO DE LAS MAREAS

El análisis armónico de la marea es el procedimiento por el cual los niveles del mar se separan en términos de los llamados componentes de marea, que son las variaciones oscilatorias con frecuencias específicas que contribuyen a la fuerza generadora de marea, y las cuales tienen su origen en la atracción gravitacional de la luna (70% de las amplitudes mareales) y el sol sobre el agua del mar (30 % de las amplitudes)

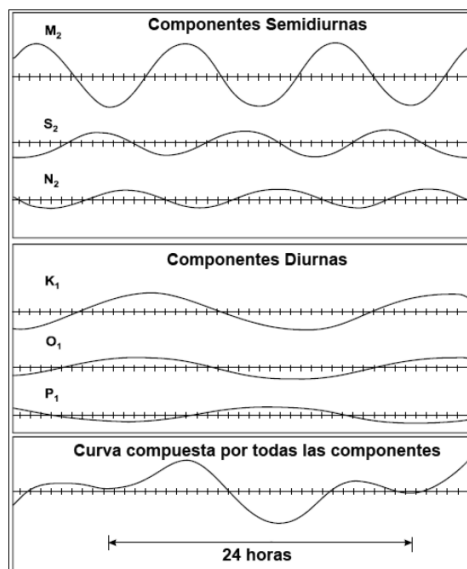


Figura 2. Representación gráfica de las componentes de marea

Por ejemplo, la declinación del eje terrestres introduce las componentes mareales  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $O_1$  y  $P_1$ , de los cuales  $K_1$  con  $O_1$  expresa el efecto de la declinación de la luna,  $K_1$  con  $P_1$  el efecto de la declinación del sol, la componente  $K_2$  modula la amplitud y frecuencias de las principales componentes  $M_2$  (debida a la declinación de la luna) y  $S_2$  (debida a la declinación del sol). Los componentes  $N_2$  y  $Q_1$  describen las variaciones en la distancia de la luna a la tierra debido a que la órbita lunar es elíptica y no es fija.

Cuando el sol, la tierra y la luna están alineadas (luna nueva y luna llena) los efectos de las fuerzas gravitacionales se refuerzan entre sí generando las mareas con mayor amplitud o mareas vivas, mientras que, cuando el sol y la luna están desfasadas en  $90^\circ$  (luna menguante y creciente), sus efectos se restan lo que originan las marea con la menor amplitud o mareas muertas. Debido a que las órbitas de la luna alrededor de la tierra y de la tierra alrededor de sol no están en un plano ecuatorial, las variaciones de la marea en un día no son iguales.

En el análisis armónico de las mareas, hay otros factores que hacen que el proceso sea más complejo:

- El eje de la Tierra está inclinado  $23.5^\circ$  respecto de la perpendicular al plano de la eclíptica, lo que hace que el ángulo formado por el plano ecuatorial y el plano de la eclíptica varíe en  $\pm 23.5^\circ$  a lo largo del año.
- Las órbitas de la Luna alrededor de la Tierra y de la Tierra alrededor del sol son elípticas, por lo que la distancia Tierra – luna y Tierra – sol no es constante

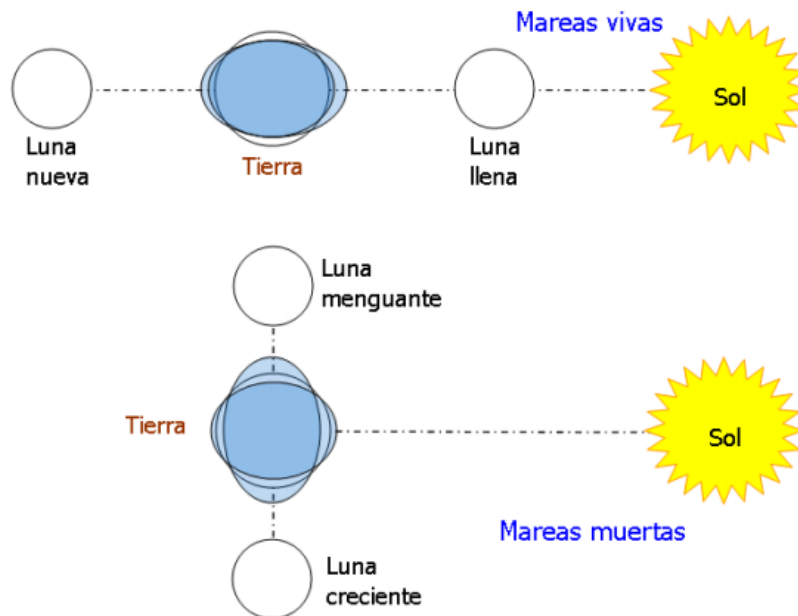


Figura 2. Definición de las mareas vivas y mareas muertas

En resumen, la marea puede tratarse como una variación sinusoidal semidiurna del nivel del agua modificada con una variación quincenal de la amplitud de las mareas vivas y mareas muertas, y con una desigualdad diaria que varía con la ubicación geográfica (latitud) así como con el ciclo mensual y anual.

Hay 37 constantes armónicas que normalmente describen el mayor efecto sobre las mareas, estas constantes solo se pueden calcular mediante datos de cuanto menos 30 días a fin de observar la mayoría de los ciclos lunares y solares, sin embargo, se necesita de un año de datos para observar directamente los 37 movimientos periódicos de las mareas, cada una de las cuales pueden representarse como curvas de coseno

Las principales componentes armónicas de la marea para un determinado lugar e intervalo de tiempo se caracterizan por los siguientes factores.

- Amplitud. Definida como la diferencia en altura entre el nivel más alto o el nivel más bajo, respecto al nivel promedio o de referencia.
- Período. Corresponden al tiempo requerido en horas para que para que ocurra una componente de marea en un ciclo completo
- Ángulo de fase. Fase de retraso o época de la componente en el intervalo entre el nivel de marea al inicio de la predicción y la siguiente pleamar.

Constante	Movimiento periódico generador
$S_a$	Componente solar anual
$S_{sa}$	Componente solar semi-anual
$M_m$	Componente lunar mensual
$M_{sf}$	Componente luna/sol sinódica quincenal
$M_f$	Componente luna/sol quincenal
$Q_1$	Componente lunar elíptica mayor diurna
$O_1$	Componente lunar diurna
$P_1$	Componente diurna solar
$K_1$	Componente diurna luna/sol
$J_1$	Componente lunar elíptica menor diurna
$2N_2$	Componente lunar elíptica semidiurna segundo orden
$MU_2$	Componente de variación
$N_2$	Componente lunar elíptica mayor semidiurna
$NU_2$	Componente lunar mayor
$M_2$	Componente semidiurna lunar
$L_2$	Componente lunar elíptica menor semidiurna
$T_2$	Componente solar elíptica mayor semidiurna
$S_2$	Componente semidiurna solar
$K_2$	Componente semidiurna lunar/sol
$M_3$	Componente lunar tercio diurna
$M_4$	Componente lunar cuarto en aguas poco profundas
$MS_4$	Componente cuarto diurna en aguas poco profundas
$M_6$	Componente lunar sexta en aguas poco profundas
$2MS_6$	Componente sexta diurna lunar en aguas poco profundas
$2SM_6$	Componente sexta diurna solar en aguas poco profundas
$M_8$	Componente lunar en aguas poco profundas

## TIPOS DE MAREAS

La importancia relativa de los constituyentes diurnos y semidiurnos se puede expresar en términos del denominado factor de forma, que no es más que el cociente entre la suma de las amplitudes de los dos armónicos principales diurnos en el numerador y semidiurnos en el denominador.

$$F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2}$$

Donde:

$K_1, O_1$  Representan las amplitudes de las principales constantes armónicas diurnas.  
 $M_2, S_2$  Representan las amplitudes de principales constantes armónicas semidiurnas.

Según el valor de F, la clasificación del tipo de marea se realiza de acuerdo con los siguientes criterios:

F = desde 0 a 0.35, marea semidiurna  
 F = desde 0.35 a 1.5, marea mixta con predominio semidiurno.  
 F = desde 1.5 a 3, marea mixta con predominio diurno.  
 F = mayor que 3, marea diurna

### CÁLCULO DE LAS COMPONENTES ARMÓNICAS

El cálculo de las componentes armónicas se realiza mediante la serie de Fourier que involucra solo senos y cosenos de un ángulo variable de acuerdo con la siguiente expresión:

$$h = H_0 + \sum_{i=1}^{37} a_i \cos(i\theta) + \sum_{i=1}^{37} b_i \sin(i\theta)$$

Donde:

h Nivel de marea en cualquier tiempo t (m)  
 $H_0$  Nivel promedio de las elevaciones del agua de mar (m)  
 $a_i, b_i$  Amplitud media de la marea i de cada término (m)  
 $\theta$  Ángulo que cambia con el tiempo y que completa el ciclo de 360° en un día constituyente.

Las constantes armónicas  $A_i, K_i$  para cada una de las componentes se determinan de acuerdo con

$$A_i = [a_i^2 + b_i^2]^{1/2}$$

$$K_i = -\tan^{-1}\left(\frac{b_i}{a_i}\right)$$

Donde:

$A_i$  Amplitud de la marea (m)  
 $K_i$  Ángulo de la fase de la marea (°)

### PREDICCIÓN DE MAREAS

Las predicciones de mareas son un cálculo que suma los efectos de cada una de las curvas coseno para producir la curva más compleja que son las mareas. La fórmula para ese cálculo es:

$$h = H_0 + \sum_{i=1}^{37} f_i A_i \cos[a_i t + (V_0 + u)_i - K_i]$$

Donde:

- h Altura de la marea en cualquier momento t.  
 H<sub>0</sub> Altura media del nivel del agua por encima del punto de referencia utilizado para la predicción.  
 f Factor para ajustar la amplitud media A al año de la predicción.  
 a Velocidad del constituyente A (°/hr).  
 t Tiempo calculado a partir de alguna época inicial, como el comienzo del año de las predicciones.  
 (V<sub>0</sub>+u) Valor del argumento de equilibrio del constituyente i cuando t = 0.

Las mareas se pueden referir a la línea cotidal, que se define como la línea que une a todos los puntos en los cuales ocurre la marea al mismo tiempo, en este sentido, la marea local se deberá referir al meridiano de Greenwich.

$$\text{Tiempo de Greenwich}(t_0) = \text{Tiempo local } (t_0) + \frac{S}{15}$$

Donde:

- S Longitud Oeste del meridiano del tiempo local (°).

La relación de fases del argumento (V<sub>0</sub>+u) entre la fase Greenwich y la fase local es:

$$\text{local}(V_0 + u) = \text{Greenwich}(V_0 + u - pL)$$

Por lo que para referir el nivel de marea local al nivel de marea del meridiano de Greenwich se utiliza la siguiente ecuación:

$$h_{LOCAL} = H_0 + \sum_{i=1}^{37} f_i A_i \cos \left[ a_i t + \text{Greenwich}(V_0 + u) - pL + \frac{a_i S}{15} - K_i \right]$$

Donde:

- L Longitud Oeste de la localidad para la cual se desea realizar la predicción de mareas (°)  
 P Adopta el valor de 0 cuando se refiere a componentes de largo período (M<sub>f</sub>, M<sub>Sf</sub>, M<sub>m</sub>, S<sub>Sa</sub>, S<sub>a</sub>)  
 Adopta el valor de 1 cuando se refiere a componentes diurnos (Q<sub>1</sub>, O<sub>1</sub>, M<sub>1</sub>, TK<sub>1</sub>, P<sub>1</sub>, K<sub>1</sub>, J<sub>1</sub>)  
 Adopta el valor de 2 cuando se refiere a componentes semidiurnos (2N<sub>2</sub>, μ<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, v<sub>2</sub>, M<sub>2</sub>, L<sub>2</sub>, T<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>)

Adopta el valor de 3 cuando se refiere a la componente lunar tercio diurna ( $M_3$ )  
Adopta el valor de 4 cuando se refiere a la componente lunar cuarto y cuarto diurna en aguas poco profundas ( $M_4$ ,  $MS_4$ )  
Adopta el valor de 6 cuando se refiere a la componente lunar sexta, sexta diurna lunar, sexta diurna solar ( $M_6$ ,  $2MS_6$ ,  $2SM_6$ )  
Adopta el valor de 8 cuando se refiere a la componente lunar en aguas poco profundas ( $M_8$ )

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Engineer Manual, No. 1110-2-1100, Engineering and Design, Chapter 5 Water levels and long waves, Department of the Army, US Army Corps of Engineers, EEUU (2003)
- Judith Bosboom & Marcel J.F. Stive. Coastal Dynamics. Delft University of Technology, (2021)
- R. Pawlowicz, B. Beardsley, and S. Lentz, "Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE", Computers and Geosciences 28 (2002), 929-937
- Sato, S. & Esquivel, S. Análisis armónico y pronóstico de marea. Instituto Mexicano del Transporte, México (1995)
- US Army Coastal Engineering Research Center, Shore Protection Manual, Vol. 1, Department of the Army, US Army Corps of Engineers, EEUU (1984)