

Propagando Ondas Largas por el Golfo de Nicoya Superior, Costa Rica

Fecha de recepción: 24/9/2009

Fecha de aceptación: 27/10/2009

Luis M. Murillo B.¹

Resumen

En este artículo se discute la hidrodinámica de ondas largas, como maremotos e inundaciones, en el Golfo de Nicoya Superior (GNS) y la forma en que se propaga una onda desde su entrada. Para tal fin se utilizan los resultados obtenidos por medio de un modelo hidrodinámico bidimensional, mediciones rudimentarias de corta duración (horas) y la parametrización de Goodwin (1974) para definir la importancia de los términos inerciales y de fricción en la ecuación unidimensional de conservación de la cantidad de movimiento. Gracias a esto se concluye que una onda larga extraordinaria de mar afuera se propagaría hacia el interior del GNS de forma prácticamente unidimensional con pocas pérdidas de energía y su propagación estaría dominada por los términos inerciales de la ecuación de momento hasta la Isla Chira. De este punto hasta la parte superior, la fricción comienza a dominar, lo que disminuye la altura del maremoto. El coeficiente inercial es generalmente mucho más grande que el coeficiente de fricción en el Golfo. Esto puede redundar en

amplificaciones de 30% a 50% en Punta de Piedra, con respecto a la entrada del GNS, que dependen de la magnitud inicial, las profundidades, el nivel de vorticidad existente y el nivel instantáneo de la marea en todo el GNS. En la cercanía de Punta Morales esta relación se comienza a invertir y la amplitud comienza a decaer hasta que en Puerto Moreno la fricción se vuelve dominante y la altura decae más fuertemente. El diagrama de fases muestra un cambio de gradiente en la cercanía de Punta Morales aunque esto depende de los niveles mareales instantáneos. Se predice un tiempo de propagación neto de 50 minutos para un maremoto típico de 1,4 m, con razones de propagación que van de 1,25 a 5 km/min en condiciones de marea media y sin vorticidad.

Abstract

Tidal hydrodynamics of long waves propagating in the interior of the Upper Gulf of Nicoya (GNS) are discussed. Numerical model predictions for the inundation and short term measurements and the dimensional analysis of Goodwin (1974)

1. SNAME (Sociedad de Ingenieros Marinos, USA). Correo electrónico: bola@racsaco.cr.

are used in defining inertial and frictional effects in the equation of motion.

A typical wave of 1.4 m at the head of the GNS without vorticity is used as an example. Inertial propagation occurs initially amplifying the wave up to the Isla de Chira. From there on frictional effects dominate and the amplitude of the wave can reach a final maximal amplification near 30 to 50% at the head depending on initial conditions like ambient vorticity, entrance angle and instantaneous tidal level in the entire Gulf. Total propagation time is computed to be 83 minutes for a minor 1.4 m wave propagating with a mean tide and entering without rotation. Propagation rates vary between 1.25 to 5 km/min. Precise values are dependent on initial conditions at the mouth and sea level throughout the Golfo de Nicoya.

Introducción

El Golfo de Nicoya es uno de los cuerpos de agua interiores más importantes de Centroamérica. Sus zonas interiores no están densamente pobladas, particularmente aquellas zonas bajas y planas en su interior que serían las más afectadas por una onda extraordinaria que arribara al GNS en su fase de inundación desde mar afuera. En su parte superior, cerca de Puerto Moreno, se encuentra un puente de gran envergadura y, por lo tanto, se requerirá conocer los posibles valores de los niveles extremos del agua para planificar la protección del pie de la estructura y evitar la erosión de su base. El oleaje incidente es, por lo general, generado localmente e inferior al metro y la probabilidad de olas gigantes cortas es poca (Murillo, 1996); sin embargo, los niveles extraordinarios de olas largas, como un maremoto, sí pueden afectar de forma directa las estructuras y desarrollos civiles que se encuentren en el Golfo de Nicoya Superior, o GNS, en los años por venir. Recordemos que las fuerzas ejercidas por una ola rompiente de

un metro son de una tonelada por metro cuadrado o incluso más.

Existen pocos estudios hidrodinámicos sobre el Golfo de Nicoya, por ejemplo, Murillo (1993) estudió la propagación de la ola de marea típica y predijo una amplificación neta posible del 50%, que depende de las condiciones iniciales en la boca del Golfo y la marea. En otros trabajos Murillo (1981, 1991) aplicó un modelo hidrodinámico bidimensional para computar el campo de corrientes y alturas en todo el Golfo debido a una marea típica. Sin embargo, la posible propagación de una onda larga o un maremoto por estas aguas nunca se ha estudiado. Murillo (1993), usando las características morfológicas y la parametrización de Goodwin (1974), definió la importancia de los términos inerciales y de fricción de la ecuación unidimensional de momento. Asimismo, Murillo en sus trabajos de 1981 y 1991 aplicó un modelo hidrodinámico para predecir la propagación de la marea en el Golfo de Nicoya Superior (GNS) y concluyó que su comportamiento era básicamente longitudinal con velocidades que mayormente apuntan en dirección al eje del Golfo. No obstante, variaciones en la vorticidad local o planetaria en la entrada al Golfo de Nicoya crean sistemas de circulación muy diferentes en la parte inferior del Golfo o GNI (Murillo, 2006).

Modelos hidrodinámicos basados en las ecuaciones fundamentales son útiles para efectos ingenieriles si se conocen todos los parámetros requeridos por el modelo. Sin embargo, el modelo adimensional discutido aquí, obvia mucho del requerimiento geomorfológico e hidrodinámico, y reproduce fielmente las características esenciales de la onda larga en todo el GNS como el tiempo de propagación y el grado de amplificación o decaimiento. En este caso es importante el concepto de escala, pues aquí se concibe la variación de las profundidades de la marea como dependiente de la latitud o la longitud de

un punto en la mesoescala. Además, se conceptualiza la oscilación mareal como independiente de elementos de escalas menores como las islas San Lucas, Caballo o Chira. Este nivel mareal es básico para los cálculos de las amplitudes de la onda que se propaga, asimismo, determina la dominancia de la inercia o la fricción. Al ser una onda larga, con longitud muy superior a la longitud del GNS, efectos difractorios son de menor importancia, o sea, la onda se deforma pero no difracta.

Las ecuaciones fundamentales

Según Murillo (1981, 1991, 1993), el comportamiento hidráulico del Golfo es unidimensional en su parte superior, es decir, más al noroeste de Puntarenas y a escalas de unos kilómetros o más. Por consiguiente es posible, en una primera aproximación, modelar la propagación del maremoto u otra onda larga con las versiones unidimensionales de la ecuación de conservación de masa y momento, tal y como lo hace Murillo (1993). Estas ecuaciones se pueden escribir de la siguiente manera (véase por ejemplo Sabersky y Acosta, 1964):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad 1.$$

y

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{BQ}{gA^2} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{b}{C^2 A^2} Q|Q| = 0 \quad 2.$$

En estas ecuaciones se entiende H como la altura de la onda larga, T su período, S el área plana horizontal y A el área transversal del Golfo; D es la profundidad total que se compone de profundidad media más el nivel instantáneo del mar, es decir, la profundidad media, la marea más la onda misma. La distancia x se mide a lo largo del eje del Golfo de Nicoya Superior, Q es el gasto, C es el coeficiente de fricción de Chèzy y G es la aceleración de la gravedad.

Mediante el análisis dimensional de Goodwin (1974) se pueden desarrollar los parámetros físicos para cada segmento, los cuales gobiernan la propagación de la ola por todo el GNS. Inicialmente se consideran sólo las profundidades medias, sin mareas u ondas extra, sin embargo, para esta investigación se suman las alturas de la marea a la altura propia de la onda. Esto se hace usando una onda de marea que se calcula para sitios a lo largo del Golfo, con una versión de la teoría de ondas estacionarias propuesta por el autor (Murillo, 1997). Este cálculo se discutirá más adelante y presenta niveles mareales que pueden ser aproximados por rectas con pendientes de hasta 30 cm por 50 km. El procedimiento de Goodwin inicia con la definición de los coeficientes. El primero de ellos es el Coeficiente de Fricción K_f

$$K_f = \frac{4\Pi bLS^2}{C^2 A^3 T^2} H \quad 3.$$

$$\frac{1}{gD} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = 0 \quad 4.$$

El segundo es el coeficiente inercial que se puede escribir como

$$K_i = \frac{4\Pi^2 SL}{gAT^2} \quad 5.$$

donde L es la longitud del segmento a lo largo del eje del golfo. De las ecuaciones de conservación de momento y masa (Murillo, 1993) se puede obtener la ecuación de onda para la altura H si se asume que el área transversal A es constante en cada segmento de cada condición hidrodinámica.

De manera similar se puede proceder para obtener una ecuación de onda para un maremoto u onda larga al eliminar la dependencia en la altura H. Para la velocidad de propagación se obtiene entonces

$$C_{ph} = \sqrt{gD} \quad 6.$$

Con la Ecuación 6 se puede calcular la fase de la marea según:

$$t = \int \frac{dx}{\sqrt{gD}} \quad 7.$$

Este cálculo debe realizarse con una actualización implícita de la profundidad para cada iteración con el fin de reflejar la profundidad real del agua incluyendo la profundidad de la marea y de la onda extraordinaria en todos los segmentos del GNS. La marea se calcula por aparte y depende de la latitud (o la longitud) del sitio. Esta altura mareal posee amplitudes máximas de poco más de 3 m, varía horariamente y desarrolla gradientes internos al Golfo que deben ser incluidos en los cálculos.

Cómputos de nivel del mar para varios sitios de longitud y latitud conocidas

Los cálculos de nivel se pueden hacer para cualquier instante o tiempo t . Primero se computa la marea para un rango de valores temporales $t+n*dt$ según los procedimientos clásicos ya presentados por el autor para cualquier sitio de la costa pacífica de Costa Rica (Murillo, 1994). Luego, mediante la teoría de ondas estacionarias propuesta por el autor, se generan los componentes armónicos del sitio particular con una latitud o una longitud conocidas. Es decir, en $h(x, y, t)$ el punto espacial x, y se reduce a $\lambda(x, y)$, entonces h es $h(\lambda, t)$. Murillo (1997) propone una estructura lineal para generar las amplitudes de los primeros siete componentes armónicos para cada latitud o longitud. Esta dualidad es posible porque la costa centroamericana se puede considerar alineada a una recta y cada punto x, y posee una sola latitud o longitud. Además, las variaciones morfológicas locales de la costa poseen una escala muy inferior a la longitud de onda de la marea, esto hace

que la marea no se refracte o difracte con cada recodo costero. Para cada armónico mayor, estas amplitudes armónicas se obtienen entonces, según Murillo (1997), por restas diferenciales sucesivas entre la Suma Parcial de Armónicos (SAP) Superior $SAP(n+1, \lambda)$ y la Inferior $SAP(n, \lambda)$, en donde λ es la longitud o latitud geográfica de la línea media de costa, que en la zona tiene una pendiente de 40,4 grados y $n \leq 7$. Entonces:

$$S_{ap}(n, \lambda) = \sum_{i=1}^n A_i(\lambda) \quad 8.$$

y

$$A_i(\lambda) = S_{ap}(n+1, \lambda) - S_{ap}(n, \lambda) \quad 9.$$

con

$$S_{ap}(n, \lambda) = S_0 + m * \lambda \quad 10.$$

en donde S_0 y m son constantes.

Una vez calculada la estructura armónica base de $i=1$ hasta $i=7$, para el sitio x, y , se computa la suma armónica con el factor nodal f y la fase g_i calculada según Murillo (1997), por medio de la ecuación clásica (Shureman, 1958) para el rango de valores de interés temporal t_j espaciados cada cinco minutos:

$$h(x, y, t_j) = h(\lambda, t_j) = H_{ref} + \sum f A_i(\lambda) \cos(\omega_i t_j + g_i(\lambda)) \quad 11.$$

Esto permite el cómputo de una secuencia temporal de alturas para cada diferencial temporal cada 5 minutos (o aún más refinado si se desea) y cualquier punto en la costa x, y , en función del tiempo t_j , para las épocas de medición de la onda incidente que interesen y que cubran el tiempo de su propagación interior en el GNS.

Los cómputos del nivel del mar para los extremos diarios de marea para sitios estándar de la Costa Pacífica tica, realizados por el autor con la anterior metodología, se pueden bajar de la Internet de la dirección

de la Universidad de Costa Rica². También es posible realizar cálculos instantáneos a pedido para cualquier sitio si se cuenta con la latitud o longitud y para cualquier época que se requiera, futura o pasada³.

Características generales del GNS

La Figura 1 muestra la forma general del Golfo de Nicoya. Según Murillo (1982, 1993) el Golfo de Nicoya se puede dividir en dos partes. La parte inferior, o Golfo de Nicoya Inferior (GNI), que es donde el campo de corrientes de marea es bidimensional con elipses bien definidas, y el Golfo de Nicoya Superior (GNS), en donde las elipses de marea degeneran en movimientos mayormente axiales a lo largo del eje principal del Golfo (Murillo, 1981). Su parte superior, o GNS, se extiende de la línea que va de Puntarenas a la Isla San Lucas y hacia el interior hasta Puerto Moreno, en la desembocadura del Río Tempisque.

Murillo (1993) estimó una amplificación máxima de la marea en el extremo superior del GNS de un 50% con respecto a la marea en Puntarenas. Su desfase máximo se estimó de unos 50 minutos luego de Puntarenas. Ambas características dependieron, desde luego, de las condiciones iniciales del problema que incluyen niveles reales instantáneos, vorticidad y ángulo de entrada. Esta circulación lineal ciertamente es sólo posible en la parte superior del Golfo. En la GNI es fácil probar que la conservación de vorticidad y las ecuaciones del balance geostrofico en aguas de profundidad variable obligan a la onda larga a deformarse y rotar considerablemente (Murillo 2006 y 2007a y 2007b).

Los coeficientes de inercia y fricción

Debido al comportamiento de la onda, y, para entender la dinámica de su propagación, se procedió a calcular los coeficientes iniciales de fricción y amplificación del Golfo de Nicoya para cada uno de los segmentos en que se dividió el GNS. Para esto se digitó el GNS y se dividió en secciones, tal y como se hizo en un trabajo previo del autor (Murillo, 1993). La Figura 2 muestra los resultados si se asume una condición de marea media, vorticidad cero y sin gradientes⁴. Estos cálculos muestran que la longitud de la onda mareal es varias veces la longitud del Golfo y que se podría asumir una distribución de alturas que varíe linealmente a lo largo del Golfo con una pendiente que también varíe temporalmente hora a hora.

El modelo de propagación de la onda larga

Para entender las amplificaciones y fases parcialmente medidas con el equipo rudimentario de que se dispuso, se procedió a calcular la fase asumiendo la propagación lineal y sin disipación de una onda larga a lo largo del Golfo de Nicoya Superior. El valor medio del coeficiente de inercia se usa, entonces, para calcular la amplificación media en el Golfo. La variación de altura de la onda se puede calcular numéricamente gracias a las ecuaciones de conservación de masa y momento. Luego, al sustituir en ellas una variación armónica sencilla del tipo

$$h = H_0 \cos(\sigma t), \quad \sigma = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{gD} \quad 12.$$

para la onda entrante y, similarmente, para una respuesta interna de la forma

Murillo (1993) estimó una amplificación máxima de la marea en el extremo superior del GNS de un 50% con respecto a la marea en Puntarenas. Su desfase máximo se estimó de unos 50 minutos luego de Puntarenas. Ambas características dependieron, desde luego, de las condiciones iniciales del problema que incluyen niveles reales instantáneos, vorticidad y ángulo de entrada.

2. <http://www.ucr.ac.cr/mareas/index.html>.

3. En caso de necesitar este servicio, puede comunicarse con el autor por correo electrónico bola@racsa.co.cr

4. Los cálculos de marea se realizan usando procedimientos del autor descritos más detalladamente en otros trabajos por ejemplo los de 1981 y 2001.

Golfo de Nicoya
10 N 85 W

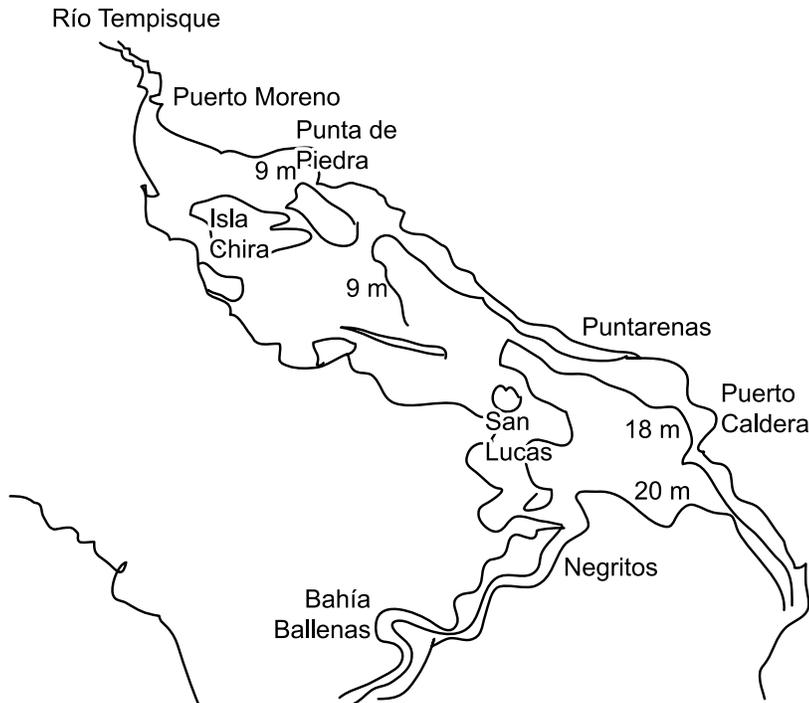


Figura 1. El Golfo de Nicoya, Costa Rica. Se indican los isobatas medias.

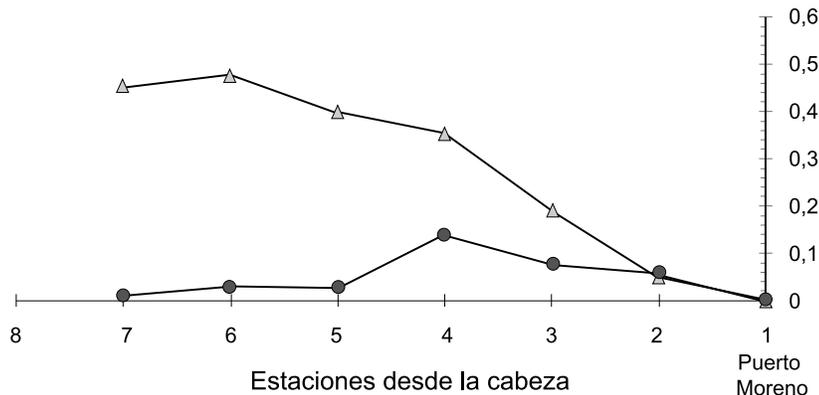


Figura 2. Coeficientes de inercia (Δ) y fricción (o) para una marea media y una onda de 1,4 m que penetre paralela al eje principal del GNS sin vorticidad. Se observa que la amplificación inercial domina el Golfo, por lo que las zonas más afectadas son las costeras interiores planas. Se estima una duración de propagación de unos 50 minutos de la cabeza a Puerto Moreno. Para una onda mayor estos tiempos han de reducirse al dividirlos por la raíz cuadrada de la razón de profundidades medias que incluyen la onda misma. Una onda como esta inundaría muchas zonas costeras bajas, salineras y obras civiles.

$$h_i = H_i f(\sigma t - \phi) \quad 13.$$

se obtienen las ecuaciones siguientes:

$$\frac{H_i}{H_0} = \frac{\cos(\sigma t)}{f(\sigma t - \phi) - K_f f''(\sigma t - \phi)} \quad 14.$$

$$\frac{H_i}{H_0} = \frac{\cos(\sigma t)}{f(\sigma t - \phi) - K_f [f'(\sigma t - \phi)]^2} \quad 15.$$

En estas ecuaciones se puede notar que cuando el período T es largo (digamos varias horas) las derivadas presentes constituyen números pequeños del orden de la derivada.

Al ampliar entonces las fracciones en expansiones de Taylor y si se indica que, para el Golfo de Nicoya, una onda larga debe tener una longitud cuya escala, al igual que la marea, es varias veces la extensión de su eje central (Murillo, 1981), vemos que

$$H_{j+1} \approx \frac{1}{K_{f,j}} H_j \quad 16.$$

y

$$H_{j+1} \approx K_{f,j} H_{ji} \quad 17.$$

en donde el índice j denota la sección interna número $j = 1 \dots N$. Si se usan estas relaciones de iteración geométricas, más una condición de frontera computada a partir del modelo numérico de Murillo (1981), podemos producir predicciones sobre la propagación de la onda o maremoto, tal y como se muestran en la Figura 3. Se utilizan los resultados de Murillo (1993) para los coeficientes de Goodwin, actualizados para la profundidad total correspondiente. No olvidemos que las alturas deben corregirse por el nivel de marea existente en el espacio y el tiempo de modelaje.

La Figura 3 muestra también algunos resultados numéricos de los cálculos

Altura de la ola en profundidad (m) y fase

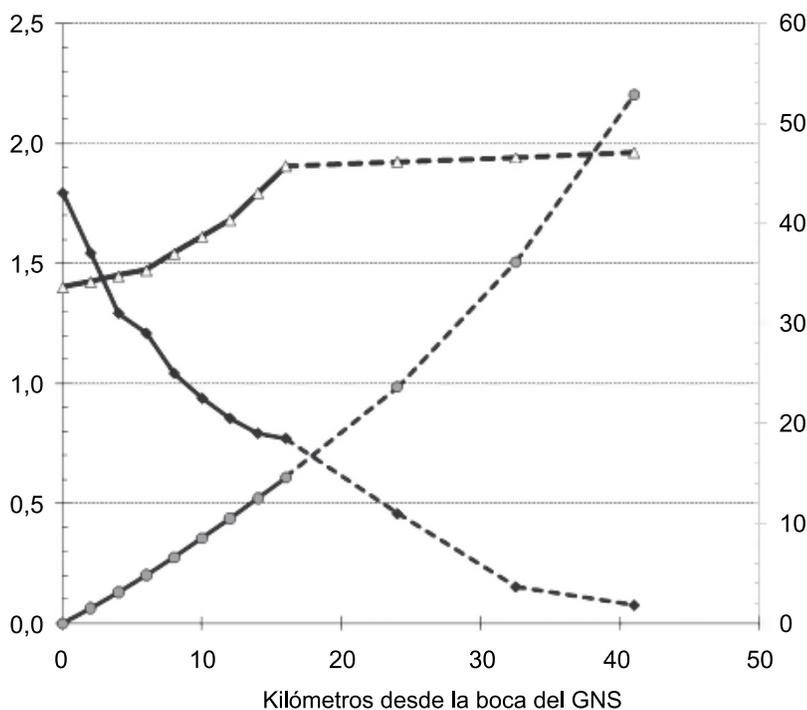


Figura 3. Diagrama de propagación de una onda extraordinaria de 1,4 m, sin vorticidad y con entrada paralela al eje principal del GNS y una amplificación neta de 34%. La profundidad y la fase en minutos se indican a la derecha. La ola se deforma significativamente en aguas menores a 15 m en dependencia de la marea local.

de fase y la profundidad media del GNS sin la onda. Estos cálculos de las iteraciones numéricas para el GNS se hicieron asumiendo una profundidad inicial media base, calculada mediante las cartas náuticas usuales (DMA #21544), y al amplificar las profundidades según la altura de la marea y la altura de la onda misma para cada iteración de cómputo y para cada latitud media de cada segmento. Los datos presentados son valores posibles y dependen de la hora y la distribución de niveles de marea en toda la zona.

Se nota cómo la variación de la fase con la distancia es casi constante para el GNS hasta Punta Morales, con una pendiente de 0,8 min/km. Hacia arriba de Punta Morales

la pendiente de la fase aumenta hasta 1,5 y 2 min/km. Estas características dependen de la distribución de niveles y sólo se logran si se aplica un esquema iterativo implícito con actualización de profundidades para cada iteración y si no hay vorticidad. Se encuentra, generalmente, que la mayor amplificación de la onda larga ocurre cuando el nivel del agua crece hacia la cabeza del GNS (positivo) y el menor nivel cuando la pendiente es negativa.

Tipos de maremoto posibles

Murillo, en su trabajo de 1996, muestra los resultados de mediciones y el análisis del nivel del agua para el muelle viejo de Puntarenas durante el segundo semestre de 1996. Las alturas del agua se midieron mediante sensores de presión calibrados (WHOSI SP 2100) y los efectos de las olas con períodos de menos de 5 minutos se filtraron gracias al tratamiento de las series temporales con programas de cómputo escritos para este propósito. La Figura 4 muestra una serie común de mediciones que fueron ajustadas a predicciones armónicas con 41 armónicos. Estas mediciones y predicciones lograron obtener un porcentaje de energía explicada del 100% para las alturas del mar (Murillo, 1996). Luego de realizar la predicción armónica de 41 componentes, ésta se extrajo de las mediciones y se obtuvo la distribución de residuales que se muestra en la figura 4. Nótese que la distribución de residuales tiene una amplitud máxima aproximada de 1,4 m y es ciertamente posible que esté constituido por oscilaciones largas de origen variado, como maremotos o tsunamis. Para definir esto de forma definitiva se deben realizar más mediciones similares a las planteados por Murillo (1996) y luego llevar a cabo una investigación exhaustiva sobre los residuales presentes en los datos y sus frecuencias. Esto permitiría establecer las distribuciones posibles de amplitudes y frecuencias de los maremotos u otros

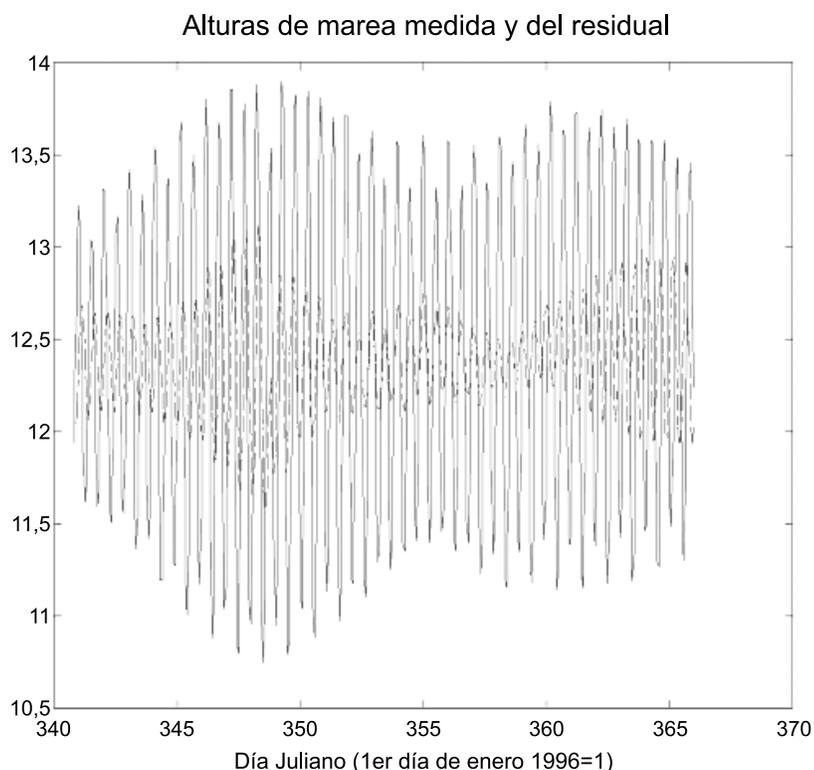


Figura 4. Mediciones de altura del mar y valor del residual con 41 componentes armónicos. Las mediciones se hicieron en el extremo profundo del Muelle Viejo de Puntarenas. Las olas se eliminaron mediante filtración digital. La secuencia temporal usa tiempo Juliano que inicia el primero de enero de 1996.

fenómenos oceánicos que llegan al GNS. Desde luego, se debe poseer la capacidad de computar la oscilación mareal astronómica en el sitio con anterioridad, de forma precisa, con suficientes armónicos lineales y no lineales, con inclusión de gradientes internos y variaciones latitudinales, para obtener residuales adecuados.

No es posible argumentar que con mediciones directas de teodolito y “ojo” se puedan medir los maremotos. Esta aseveración sólo refleja el poco conocimiento sobre el análisis de series temporales que debe aplicarse en estos casos. Es difícil o imposible saber a simple vista si viene un maremoto típico de aproximadamente 0,5 m (valor medio de las amplitudes esperables). Por lo tanto,

se puede afirmar que si se sigue una tabla de marea y se busca un extremo, se puede predecir una inundación si el maremoto llega durante la marea alta y, en consecuencia, se suma a ésta, aunque su altura sea de sólo 0,5 metros. Si la altura es aún mayor también habrá, obviamente, una anomalía de altura con respecto a la tabla y esto daría la pauta para que un ciudadano cauteloso se mueva rápidamente lejos de la playa a una altura de 20 o más metros, que, dichosamente, es posible en casi todas las costas costarricenses. La anomalía de altura depende de la fase del maremoto y puede ser positiva (aumento) o negativa; su magnitud o energía depende del mecanismo de generación de la onda larga y bien puede ser de varias decenas de metros en casos extremos.

Conclusiones finales

Una onda larga extraordinaria, o maremoto típico de 1,5 m, puede propagarse en el interior del GNS de forma unidimensional y se puede modelar, con buena aproximación, gracias a la ecuación de momento sin los términos de fricción, es decir, sin mayores pérdidas de energía.

Varios factores amplifican la onda larga, como la acumulación del agua, cuyo volumen se debe conservar, su inercia, su ángulo de entrada, las profundidades la vorticidad total y la forma del GNS. Los efectos de la fricción del fondo se notarían generalmente en el extremo norte del GNS, después de la Isla Chira.

Una onda de maremoto típica, de 1,4 m en una marea media, entraría axialmente al GNS, sin vorticidad y se propagaría a lo largo de su eje principal con una velocidad de 5 km/min hasta la zona de Punta Morales. Para llegar desde este punto hasta Puerto Moreno la ola se propaga con una velocidad cercana a 1,25 km/min.

Debido a las pocas profundidades, esta onda larga deberá propagarse más rápidamente cuando su amplitud y las profundidades

totales sean mayores y viceversa. Este cambio de profundidad debe actualizarse con cálculos mareales, para cada iteración computacional y para cada punto (con latitud o longitud conocidas). Con respecto a las variaciones temporales es posible, en el rango de minutos y mediante el modelo matemático presentado aquí, realizar estos cálculos fácilmente para distribuciones de profundidades mareales calculadas de manera separada.

La propagación de la ola larga extraordinaria hacia el interior del Golfo, que va más allá de Chira, y entra al Río Tempisque, está generalmente dominada por la fricción. Esto debería producir fuertes pérdidas de energía y disminuir paulatinamente su alto contenido energético. Sin embargo, esta onda, sin dificultad, puede llegar a Puerto Humo y causar fuertes inundaciones puesto que esta zona es plana.

Cualquier obra de ingeniería que se planea construir en el futuro en la zona, como un puente, un muelle u otra estructura marina, debería considerar la gran amplificación que se puede producir en el Golfo de Nicoya Superior bajo una condición de alturas de marea extrema con pendiente positiva. Debería también considerarse el hecho de que en condiciones extremas, como en caso de un maremoto mayor a 6 m y mareas grandes, éste podría fácilmente cubrir los bajos y las zonas costeras interiores planas, lo que provocaría la inundación de ciudades y carreteras si estas no están bien diseñadas para enfrentar estos fenómenos naturales. Fuerzas extremas en los basamentos (*Toe Erosion*) son también esperables. Ciertamente, por el momento no es posible computar la distribución de alturas extremas futuras con precisión, pero sí lo es en la zona del GNS durante los próximos años. Las estructuras costeras que se diseñen deberán tener una naturaleza oceánica y considerar pontones de flotación flexibles, cascajo pesado y renunciar a la rigidez. Se deberán levantar obras terrestres a una altura

apropiada y segura. Debemos recordar que una ola de sólo 1 metro de altura trae consigo fuerzas de una tonelada por metro cuadrado al reventar a la profundidad de quebrantamiento.

Bibliografía

- DMA 1935: Mapa No. 21544 de la Agencia de Mapeo del Departamento de Defensa de los Estados Unidos (D M A). Actualizado con datos del USS Annibal y USS Fulton hasta el año 1935.
- Keulegan, G. (1967). Tidal flow in entrances of basins in communication with seas. *Technical Bulletin 14*, U.S. Army Corps of Engineers. 88
- Goodwin C. (1974). Physical Parameters which control propagation of tidal waves in estuaries, verified for three significantly different Oregon Estuaries. Larry Slotta (Ed.). *Proceedings of the 4-th Annual Technical Conference. Estuaries of the Pacific Northwest. Oregon State University. Engineering Experiment Station Circular No. 50.* (37-49).
- Murillo L. (2007a). Modelando Refracción, Difracción y Asomeramiento local en el Golfo de Nicoya Inferior. *Ingeniería* (En edición).
- Murillo L. (2007b). *Principios de Hidrodinámica Costera y Oceanografía Física*. San José, Editorial de la Universidad de Costa Rica (en edición).
- Murillo L. (2006) Notas de clase FS 719 Oceanografía Física I, Escuela de Física, Universidad de Costa Rica
- Murillo, L. (1997). Ondas Estacionarias en el Pacífico y sus Aplicaciones a la Ingeniería de Costas: Tecnología en Marcha 13/1.
- Murillo, L. (1996). Reporte del Estado del Mar: Olas Mareas y Corrientes. Puerto Nacional de Puntarenas, Costa Rica. Reporte No 1. *Proyecto cooperativo Ministerio de Obras Públicas y Transportes, División de Obras Portuarias y Fluviales MOPT, Instituto de Puertos del Pacífico INCOP, con la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica.*
- Murillo, L. (1993). Hidráulica mareal del Golfo de Nicoya Superior. *Ingeniería. UCR*, Vol. 3 (2).
- Murillo, L. (1991). La circulación de las Mareas en el Golfo de Nicoya. *Tecnología en Marcha*. Vol. 10 (4). p. 51-76.

Murillo, L. (1981). *Modeling tidal circulation and dispersion in the Gulf of Nicoya, Costa Rica*. MSc. Thesis. Oregon State University.

Sabersky, R. & Acosta, A. (1964). *Fluid Flow. A first course in Fluid Mechanics*. Macmillan

Series in Mechanical Engineering. The Macmillan Company, New York.

Shureman, P. (1958). *Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides*. U.S. Department of Commerce. Special Publication No. 98, Washington D.C.