

CARACTERÍSTICAS DEL NIVEL DEL MAR EN LOS LITORALES COSTARRICENSES

Alejandro Gutiérrez Echeverría*
F. Javier Soley A.**

ABSTRACT

Costa Rican coastal sea level variation characteristics are unknown. Very few research has been done on this subject, despite the present need to understand rather than the astronomical contribution, the participation of some other atmospheric and oceanic phenomena upon the level variation.

On this paper, we first focus the practical meaning of knowing about sea level changes; then we explain the procedures for the archiving, control and analysis of data. Finally, we discuss the astronomical characteristics of the observed oscillation at both litorals and the results from the harmonic and spectral analysis of the observations.

RESUMEN

La variación del nivel del mar en los litorales costarricense es un argumento desconocido. Son escasos los estudios que sobre este tema se han realizado y cada vez es mayor la necesidad de entender no sólo la influencia astronómica sobre esa variación, sino también el grado de participación de otras causas de índole atmosférica y oceánica.

En el presente trabajo, primero se enfoca el interés práctico del estudio de los cambios del nivel del mar y luego se discuten los procedimientos de registro, control y análisis de la información; se analizan las características astronómicas de la oscilación real en ambos litorales y se presentan los resultados de los análisis armónico y espectral de las observaciones.

INTRODUCCION

Las características del nivel del mar en un sitio determinado corresponden a las variaciones locales del nivel de las aguas. Por esta razón, el conocimiento "in situ" de las características del nivel de las aguas, consiste no sólo en saber sobre su comportamiento en el tiempo sino también acerca de la causalidad asociada.

El concepto *variación de nivel*, entendido en un sentido amplio, involucra dos posibles cambios temporales: uno determinístico y el otro estocástico.

a. Cambio de carácter determinístico

Un comportamiento determinístico permite la predicción o reproducción del nivel en el tiempo. Ejemplo de este tipo de variación es la marea astronómica. Asimismo, obedecen el patrón determinístico las variaciones de las condiciones climáticas o, de largo período, que se traducen en un cambio de nivel del océano. Estas son el resultado de cambios en la temperatura promedio de los océanos, en el contenido relativo promedio de sal de un cuerpo de agua; de cambios simultáneos en los patrones de circulación eólica, tormentas locales, temperaturas locales y contenido salino; en la erosión de los continentes con el consiguiente depósito en los océanos; en la formación de hielo de agua oceánica; en la profundidad relativa de

* Sección de Oceanografía, Universidad Nacional.

** Centro de Investigaciones Geofísicas, Universidad de Costa Rica.

los océanos con la consecuente alteración de su volumen; en la magnitud del área del océano respecto de los continentes.

En el presente documento, el cambio determinístico de interés es una oscilación de nivel caracterizada por un período determinado, asociada a una frecuencia de propagación y a una amplitud propias.

Cambio de carácter estocástico

No obstante su ocurrencia no pueda ser predicha con exactitud, dependiendo de la causa generatriz y del eventual período asociado, algunos de estos eventos pueden ser "anticipados" a partir del momento en que se generan. Ejemplo de cambio ocasional de período y amplitud cuantificables, es la onda tsunami (maremoto), producto de explosiones submarinas o de desplazamientos tectónicos de subducción; las "seiches" o "sesas", oscilaciones amortiguadas, producto de cambios meteorológicos particulares en determinados cuerpos de agua, las cuales restablecen el nivel deformado anteriormente; el "swell" o abultamiento, producto de la acción del viento sobre la superficie del océano; en contraposición, las oscilaciones forzadas, asociadas con cambios bruscos o rítmicos del viento o la presión atmosférica; las olas de viento, de breve período, son típicos eventos ocasionales, cuyo ritmo no es cuantificable mediante los mismos instrumentos matemáticos usados en el estudio de las oscilaciones de período mayor, como las citadas anteriormente (la marea determinística, la "sesa" ocasional, etc.).

El evento ocasional o estocástico no requiere en su estudio de anticipar sus características para un tiempo específico, sino, saber sobre su probabilidad de ocurrencia en el tiempo.

INTERES PRACTICO DEL ESTUDIO DE LAS VARIACIONES DEL NIVEL DEL MAR

La utilidad de conocer sobre las variaciones de nivel del mar queda en particular evidenciada al considerar las ondas de largo período, entre las cuales destaca la onda de marea que, para la gran mayoría de los litorales del planeta, representa la mayor contribución al desnivel de las aguas. Su conocimiento es fundamental para la navegación costera, en el acceso a ciertos estuarios donde el fenómeno se magnifica; en el adecuado control de la contaminación en zonas de débil excursión de marea; en el transporte y redistribución de sedi-

mentos en costas arenosas de baja pendiente; en la desembocadura de los ríos es factor relevante en la formación de deltas o estuarios; en áreas expuestas a congelamiento, o donde lengüetas heladas descienden sobre el mar desde el continente, la marea consigue su ruptura, transformándolas en icebergs vagantes; el ritmo de la marea se halla reproducido en la formación de sustancias por parte de los organismos; su estudio tiene también significado en algunos problemas geofísicos, como la conversión energética y las fuerzas de fricción del fondo oceánico, al cual se le imputan retrasos progresivos en la velocidad de rotación de la Tierra.

La consideración de otras variaciones de nivel, como las "sesas", es de máximo interés, con el fin de controlar las inundaciones costeras, las cuales pueden ocurrir cuando se sobreponen las fluctuaciones de nivel.

El conocimiento de las variaciones de nivel del mar es, asimismo, de fundamental consideración en la planificación de obras portuarias y para el registro de cambios severos en el clima del planeta.

PROPOSITO DEL APORTE PRESENTE

En Mareología, el mayor interés se centra en la irregularidad, en vista de que, una vez conocidas todas las periodicidades típicas, éstas automáticamente se filtran, dando paso a un retardador análisis del "residuo" ((1), (2), (3), (4), (5)).

Antes de ello, entonces, se hace necesaria la caracterización determinística (o, presentación del "rostro aparente") de los respectivos sitios de interés. Esto involucra a la marea astronómica, a los esfuerzos rítmicos eólicos y barométricos y a otros efectos forzantes oceánicos, cuyas periodicidades se reflejan claramente en el espectro energético de tales lugares. Una primera discusión sobre algunas de esas regularidades en nuestros litorales, a partir del análisis de las secuencias de tiempo de los puertos de Limón, Puntarenas y Quepos, constituye el propósito fundamental del presente trabajo.

REGISTRO Y PREVISION DEL NIVEL DEL MAR

Bien se trate de la predicción o del pronóstico estadístico (para lo cual se subtrae la contribución determinística), la previsión del nivel del mar requiere de una secuencia temporal de datos de nivel previamente registrados. Esto significa que la pre-

dicción teórica pura no es factible; y ello, en vista de que la predicción del efecto de la marea astronómica exige respetar la *Teoría de la Marea de Equilibrio de Laplace* (véase Apéndice), la cual obliga al cálculo práctico de las amplitudes y fases de los componentes de la marea real (2), (6), (7). Por esa razón, la estación de registro, compuesta de equipo de medición marino y atmosférico, es requisito para la previsión de las características de nivel en cualquier punto o región del planeta.

En Costa Rica han existido tres sitios de registro "permanente" (8): Puntarenas (1941-1981), Limón (1952-1981) y Quepos (1957-1988), resultado de lo cual son las series de tiempo que han permitido el presente trabajo.

CONTROL Y ANALISIS DE LA INFORMACION

Uno de los problemas fundamentales en Mareología es la calidad de la información. Pocos son los puntos costeros del planeta que cuentan con largas y válidas secuencias de nivel del mar. Por lo general, tales registros presentan discontinuidades y errores de anotación que deben ser controlados, y en el mejor de los casos, corregidos. En muchas ocasiones, dada la extensión de la discontinuidad, o las características del error de anotación, la corrección no es posible.

Nuestros sitios de registro no son la excepción al problema apuntado. Por tal razón, un previo y necesario control es requerido.

Las siguientes anomalías en la información disponible pueden dar pie a un índice de calidad bajo:

1. Discontinuidades o anotaciones faltantes.
2. Magnitudes consecutivas dudosas en un intervalo inferior al medio día.
3. Fluctuaciones regulares desincronizadas.
4. Fluctuaciones anómalas de la amplitud característica.
5. Fluctuaciones al azar en el ruido de fondo.

En el presente trabajo las correcciones posibles han sido efectuadas según las disposiciones establecidas en (3), (4), (5).

De acuerdo con la información disponible y respetando los índices de calidad conseguidos, la

información utilizada corresponde a los años: 1974-77, para el Puerto de Puntarenas; 1969, en el caso de Puerto Limón; y la secuencia temporal 1973-84, en los análisis llevados a cabo para Puerto Quepos.

Tratamiento analítico de la información

Hasta hoy han existido cuatro tipos diferenciados de análisis de las secuencias de datos de nivel del mar:

- a. Métodos no armónicos
- b. Métodos de la respuesta
- c. Métodos armónicos
- d. Métodos espectrales

En este aporte han sido utilizados los algoritmos armónicos de análisis (9), (10), (11), (12). Estos representan el procedimiento típico de análisis desde principios de siglo, una vez que investigadores como Lord Kelvin, George Darwin y A. T. Doodson, consiguieron depurar tales mecanismos de selección de líneas espectrales de marea. Presentan, por tal razón, la conveniencia de ser el instrumento idóneo para la comparación de resultados en diversas localidades del planeta. Además, son algoritmos de cálculo comparativamente breves.

El análisis espectral de la información ha permitido completar los resultados conseguidos con los análisis armónicos, poniendo en mejor relieve algunos de los aspectos importantes de las correspondientes periodicidades concurrentes.

Métodos no armónicos de análisis

Los métodos no armónicos de análisis, basados en la relación entre el tiempo astronómico de tránsito de la luna y la correspondiente agua alta observada (6), presentan únicamente interés histórico, no obstante sigan siendo utilizados en algunos sitios donde la distorsión de la onda de marea por topografía de fondo así lo recomienda.

Método de la respuesta

En el "*Método de la Respuesta*" (6), (13), el "output" o salida del sistema depende del "input" o entrada y de la respuesta propia del sistema a éste. El método tiene la ventaja de separar lo

astronómico (la entrada) de lo oceanográfico (la "caja negra" o "black box"); sin embargo, este método requiere de cálculos mucho más elaborados.

Métodos armónicos de análisis

No obstante existan otros posibles mecanismos de análisis (6), (13), (14), (15) ha sido práctica común, desde los albores del presente siglo, el empleo de los métodos armónicos de análisis. Estos se basan en la descomposición del potencial de marea en un determinado número de líneas espectrales o componentes armónicos, así como en la ya citada "Marea de Equilibrio", propuesta por Laplace. Uno de los algoritmos mayormente empleados es el de A. T. Doodson (9), el cual, no obstante haya sido superado por rutinas como la propuesta por F. Santos (16) (gracias al advenimiento de los nuevos medios de cómputo electrónico), sigue siendo largamente utilizado.

El método armónico de análisis consiste en la aplicación sucesiva de filtros numéricos a una secuencia temporal de datos horarios de nivel, en modo de ir separando grupos de elementos con periodicidades "cercanas", en forma reiterada, hasta conseguir la separación de los diferentes constituyentes de la onda de marea (y otras periodicidades eventualmente presentes) contenidos en la secuencia temporal observada.

La longitud de la secuencia requerida depende de las periodicidades de los constituyentes de interés, así como de sus amplitudes absolutas (17).

Lo anterior puede esquematizarse del modo siguiente:

$\sum a_i \cos(\omega_i t + \phi_i) \rightarrow$ Análisis armónico $\rightarrow a_i, \phi_i$;
donde t, ω_i, a_i, ϕ_i , son, respectivamente, el tiempo, la frecuencia, la amplitud y la fase características del constituyente i .

En este trabajo, se han utilizado los métodos armónicos de análisis que a continuación se apuntan:

— Doodson (9) y Mosetti — Carozzo (11), en la extracción de los constituyentes de marea de Puntarenas y Limón.

— Foreman (12), en la deducción de los componentes correspondientes a Puerto Quepos.

Análisis espectral de la información

Se han utilizado los algoritmos (18) y (19) para el cálculo de la transformada de Fourier.

Este segundo procedimiento presenta la ventaja de no tener que incorporar ceros a la secuencia temporal cuando el número de datos no es potencia de dos. Además, no obstante este no fuera uno de los propósitos del estudio, exámenes preliminares parecen indicar una mejor resolución de un mayor número de líneas espectrales por parte de este segundo mecanismo de análisis. (Figs. 1,2,3,4).

DISCUSION DE RESULTADOS

A. Dominio del tiempo

Puerto Limón

Al igual que en los puertos de Musay'd (Golfo Pérsico) y Manila (Filipinas), el régimen de mareas en Puerto Limón es diurno-mixto (fig. 5). Esto quiere decir que la periodicidad aparente la determinan las especies de marea diurnas (Ver Apéndice), no obstante la contribución de la componente principal lunar, M2, a la variación de nivel del agua, sea del mismo orden de magnitud que la contribución principal de periodicidad diurna, K1 (tabla 1). En efecto, el gráfico citado evidencia una mancha o contaminación de periodicidad semidiurna (más claramente presente en la figura 6), que modula apreciablemente la amplitud de la periodicidad "quincenal" (13.6 días), característica de la envolvente nodal de los regímenes de marea diurnos puros. Del mismo modo, evita el anulamiento de esta onda "quincenal"; dando más bien por resultado un brevísimo régimen semidiurno en correspondencia con los mínimos de declinación lunar. Esto queda expuesto de otro modo, al observar la diferencia de fase de $\pi/2$ entre las envolventes sinódica (de la contribución semidiurna) y nodal "quincenales". Astro-nómicamente, este hecho respeta la diferencia de fase de $\pi/2$ entre los máximos de declinación lunares y las lunas nuevas o las llenas. La amplitud mareal máxima promedio en la localidad de Limón es de aprox. 22.9 cm y la mínima promedio, del orden de los 3 cm.

El régimen de mareas de este puerto crece únicamente durante la época de los Alisios (fundamentalmente en los meses de noviembre y diciembre), con incrementos en el rango de mareas de hasta 10 cm. Sin embargo, este incremento de periodicidad anual debe corroborarse, una vez se cuente con secuencias temporales de nivel más extensas para este sitio.

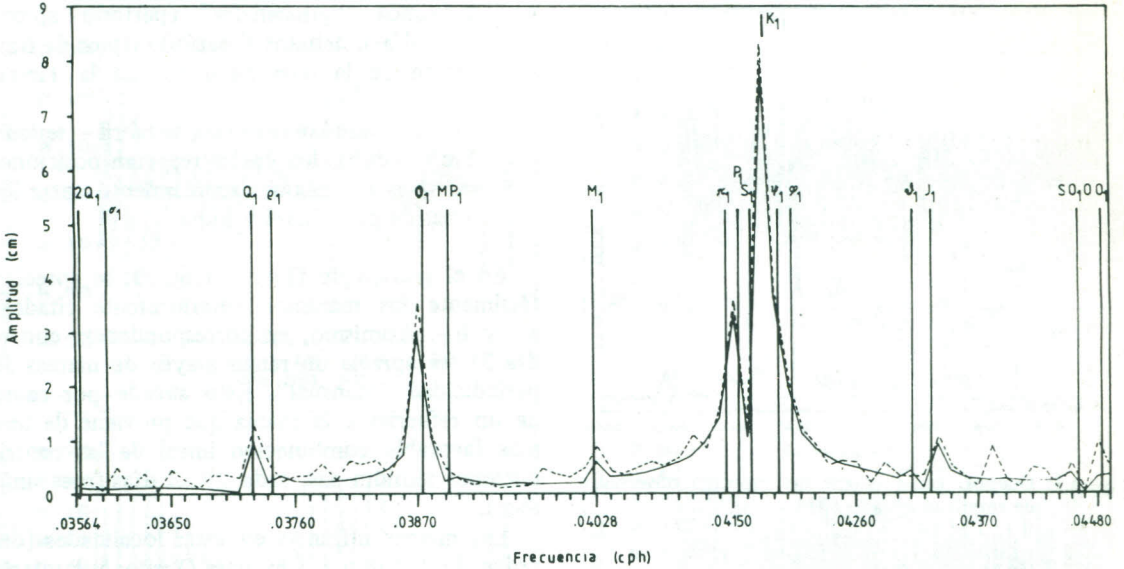


Fig. 1: Punta Arenas, gama diurna del espectro de amplitud del año 1974. (Predicho: línea continua; observado: línea a trazos).

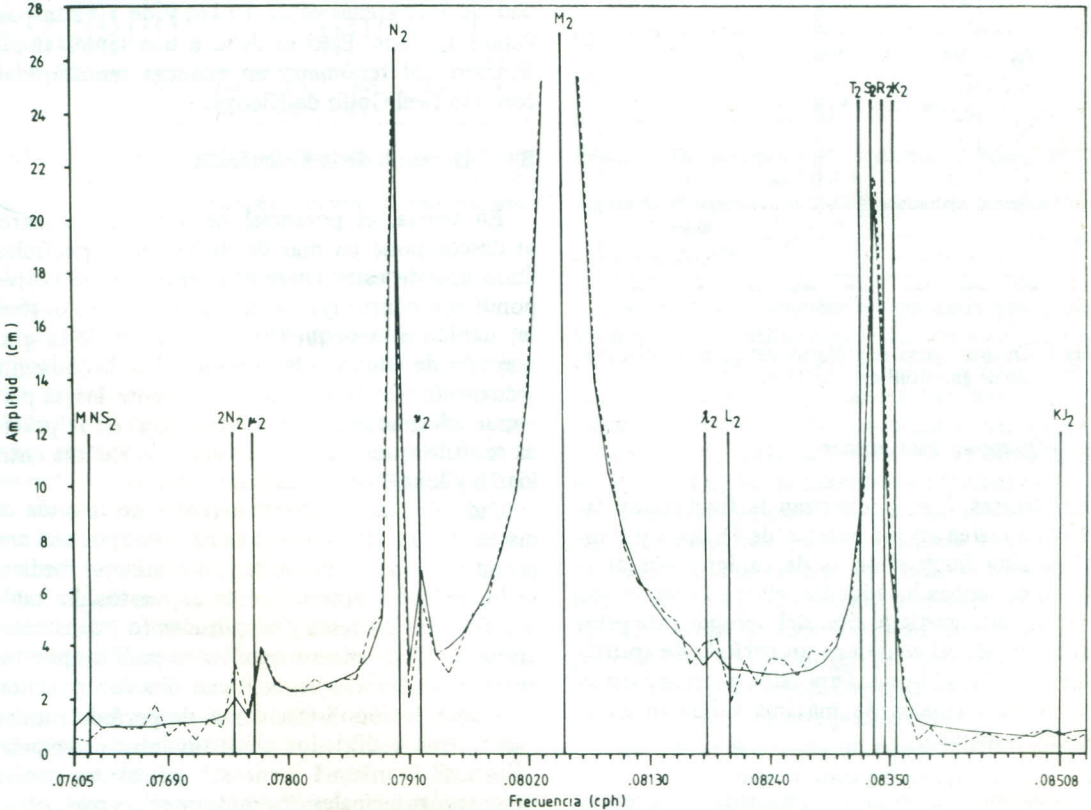


Fig. 2: Punta Arenas, gama semidiurna del espectro de amplitud del año 1974. (Predicho: línea continua; observado: línea a trazos).

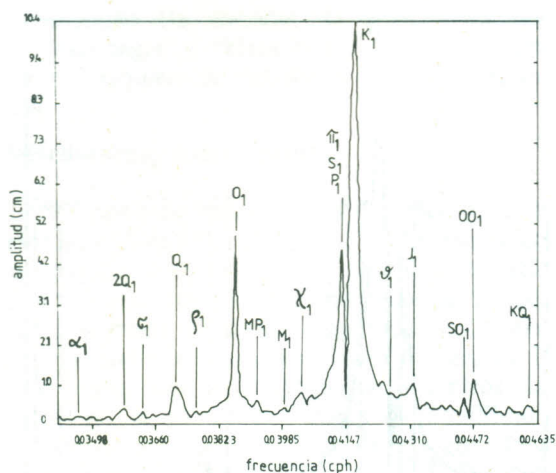


Figura 3: Quepos, gama diurna del espectro observado de amplitud del año 1984.

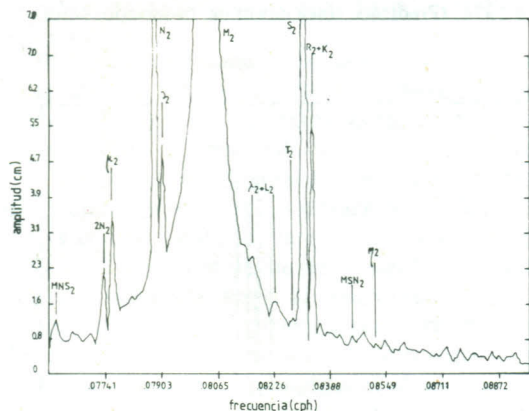


Figura 4: Quepos, gama semidiurna del espectro observado de amplitud del año 1984.

Puerto Quepos y Puntarenas

Las figuras 7 y 8 muestran la fluctuación típica de la marea en los puertos de Quepos y Puntarenas. Esta fluctuación es de carácter semidiurno puro en ambas localidades; ello, a causa de una preponderante participación del componente principal lunar, M_2 , el cual tiene un período de aproximadamente 12.42 horas. Para estos puertos existen tres períodos típicos de máxima variación en el rango de la marea:

a. máximos diarios (“desigualdad diaria”): debidos al refuerzo de los constituyentes de periodicidad diaria.

- b. máximos “quincenales” (período aprox. 14.8 días): debidos al período típico de traslación de la luna alrededor de la Tierra.
- c. máximos semianuales (marzo/abril – setiembre/octubre): los cuales respetan posiciones relativas de máximo acercamiento entre los 3 astros: Sol, Tierra y Luna.

En el gráfico de Quepos (fig. 7), se aprecian fácilmente los máximos anteriormente citados: a— y b—. Asimismo, en correspondencia con el día 31, se aprecia un rango mayor de mareas de periodicidad “mensual”. Esto sucede por causa de un refuerzo a la marea que proviene de una más favorable combinación lineal de las contribuciones semidiurnas, cada 29.53 días (mes sinódico).

Las mareas mínimas en estas localidades (del orden de 1.2 m y 1.3 m, para Quepos y Puntarenas, respectivamente) ocurren aprox. 1.5 días después de los cuartos lunares.

La amplitud máxima promedio para la localidad de Puntarenas es de 1.61m y de 1.52 m para Puerto Quepos. Esto se debe a una típica amplificación del fenómeno en cuencas semicerradas, como lo es el Golfo de Nicoya.

B. Dominio de la Frecuencia

En teoría, el potencial newtoniano de marea se descompone en más de 400 líneas espectrales. Cada una de estas energías cuenta con un correspondiente constituyente de marea real. No obstante, debido a la pequeñísima amplitud de la gran mayoría de ellos y a la imposibilidad de conseguir secuencias temporales suficientemente largas para lograr adecuadamente su extracción, en la práctica se utiliza un número máximo que fluctúa entre los 20 y los 60 componentes.

Cada uno de los constituyentes de la onda de marea se caracteriza, como se ha visto, por una amplitud y una fase, que suelen determinarse mediante los métodos anteriormente expuestos. La tabla 1 refiere las 24 fases y amplitudes (o “constantes armónicas”) de mayor significado para los puertos en estudio. En ella se incluyen dos componentes de “largo período” (S_a y S_{sa} , de período mucho mayor que 1 día); los constituyentes principales “diurnos” (con un 1 como subíndice); los constituyentes principales “semidiurnos” (con un 2 por subíndice); y dos componentes de “aguas bajas” (M_4 , M_6), los cuales se producen por la

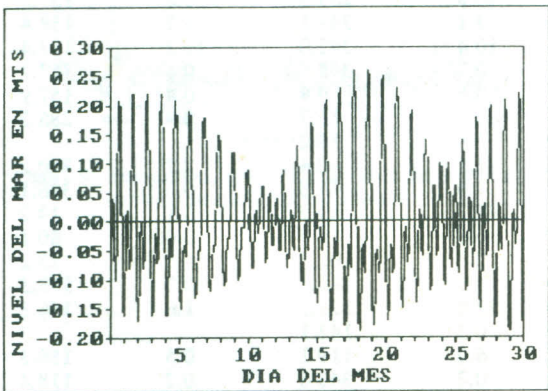
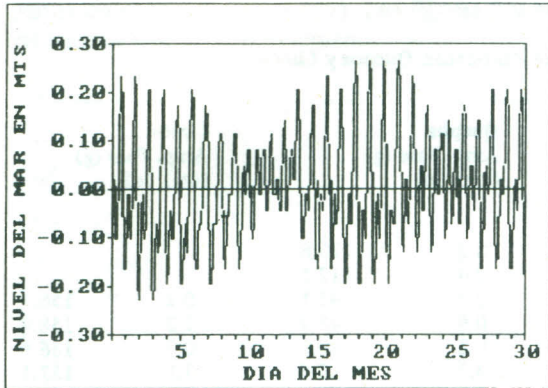


Figura 5: Limón, setiembre/69: secuencia temporal observada.

Figura 6: Limón, setiembre/69: secuencia temporal predicha.

interacción de los componentes mayores con el fondo.

Los componentes de "largo período", por lo general están asociados con cambios en el régimen eólico, como la incursión de los Alisios del Noroeste, durante los meses de noviembre a febrero en Costa Rica. Vemos cómo para Puerto Quepos, el componente de periodicidad anual, Sa, es de relativa importancia. Esta diferencia con Puntarenas obedece a la distinta situación geomorfológica de ambos sitios. En Puerto Limón se han observado diferencias de hasta 10 cm entre predicción y observaciones, durante la época de los Alisios. Y aunque la extensión de las secuencias temporales locales no ha permitido su determinación, es muy probable que esto se deba a la participación del constituyente desconocido, Sa, en ese puerto; el cual, por demás, resulta para Puerto Limón de gran significado, ya que su amplitud representaría de ser cierta la hipótesis anotada, el 33% de la contribución total.

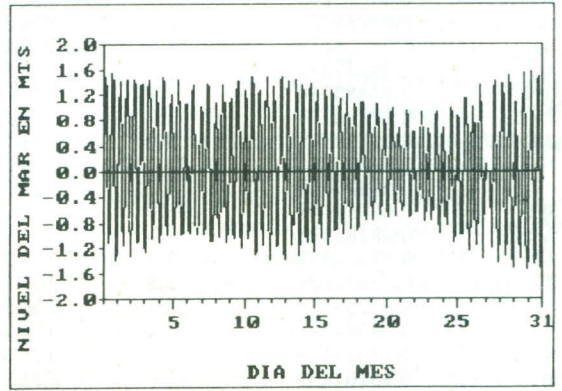
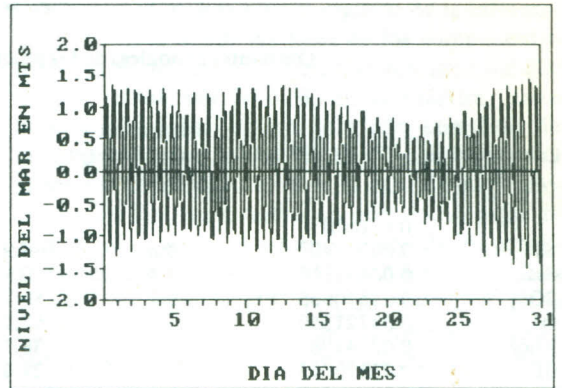


Figura 7: Quepos, julio/80: secuencia temporal observada.

Figura 8: Puntarenas, julio/80: secuencia temporal observada.

La tabla en mención refleja claramente cómo unos pocos constituyentes diurnos y semidiurnos, en cada uno de los puertos, son, por 1 o 2 órdenes de magnitud, más importantes que la mayoría restante. Sin embargo, la importancia relativa entre componentes, varía para cada uno de estos lugares. En Puerto Limón, la contribución diurna es de mayor importancia, no obstante que la amplitud de las contribuciones mayores diurna y semidiurna sea parecida. Por tal motivo, como se ha visto, ambos aportes están claramente presentes en los gráficos de mareas de esta localidad. En este lugar, el componente K1, de origen lunisolar, es el componente de mayor amplitud; esto evidencia, a diferencia de los otros dos puertos, que para el puerto del Caribe, el Sol juega un papel mucho más relevante. Efectivamente, para tal constituyente, el cociente astronómico (teórico) de las contribuciones luna/sol tiene un valor de 0.5838. Esto, sumado a la evidente mayor presencia del componente O1,

TABLA No.1
Constantes armónicas de los puertos de Puntarenas, Quepos y Limón

Constituyente	freq (c/h)	Puntarenas		Quepos		Limón	
		Amp. Fase (g) (cm) (o)		Amp. Fase (g) (cm) (o)		Amp. Fase (g) (cm) (o)	
Sa	0.00011407	3.8	166.9	8.3	270.6		
Ssa	0.00022816	3.4	196.6	2.4	112.5		
2Q1	0.03570635	0.1	55.7	0.3	43.1	0.2	156.7
Q1	0.03721850	1.2	57.2	0.9	48.2	1.2	158.4
Rhol	0.03742087	0.5	36.7	0.1	40.7	0.3	156.9
O1	0.03873065	4.5	22.4	3.7	15.5	7.1	157.1
M1	0.04026859	0.4	5.8	0.8	269.9	0.5	157.3
P1	0.04155259	2.9	348.2	3.1	341.1	3.2	157.4
K1	0.04178075	11.6	349.1	10.4	342.0	11.2	157.4
J1	0.04329290	0.4	332.5	0.7	342.6	0.5	157.7
001	0.04483084	0.2	315.8	0.8	0.9	0.4	157.9
2N2	0.07748710	2.9	3.2	2.5	10.7	0.4	286.2
μ 2	0.07768947	3.6	11.1	3.4	18.2		
N 2	0.07899925	21.7	39.6	21.1	40.4	2.7	330.2
ν 2	0.07920162	4.2	44.5	4.0	45.8	0.5	336.1
M2	0.08051114	106.3	76.0	99.7	69.9	8.1	14.2
Lda2	0.08182118	0.7	103.9	0.6	71.9	0.06	80.1
L2	0.08202355	3.9	132.2	2.5	102.5	0.3	58.2
T2	0.08321926	1.5	136.2	1.6	142.7	0.3	156.3
S2	0.08333333	25.3	136.2	23.8	123.1	1.6	156.3
R2	0.08344741	0.2	136.2	0.3	143.1		
K2	0.08356149	9.7	128.8	6.0	119.1	0.5	156.3
M4	0.16102280	1.6	221.9	0.2	343.0	0.2	118.4
M6	0.24153420	0.2	264.4	0.1	146.4	0.03	64.6

* Análisis de Puntarenas basado en 4 años de alturas horarias.

** Análisis de Limón basado en 1 año de alturas horarias.

*** Análisis de Quepos basado en 1 año de alturas horarias.

**** Sa y Ssa de Puntarenas y Quepos a partir de 9 y 7 años de alturas horarias.

de origen lunar, da lugar en este puerto al carácter diurno de su régimen de mareas.

La situación en Puerto Quepos y Puntarenas es muy similar en cuanto se refiere a las contribuciones diurna y semidiurna. La contribución semidiurna es evidentemente muy superior. Solamente la amplitud del constituyente K1 es del mismo orden de magnitud que las amplitudes semidiurnas menores; pero, en todo caso, un orden de magnitud menor que el mayor aporte a la marea total. La onda M2 representa un 63.9% y un 65.6%, respectivamente, de la amplitud de marea total en Puerto Quepos y Puntarenas. Esta diferencia porcentual en ambos puertos (1.7%), junto con aquella correspondiente a la oscilación K2 (2.2% a favor de Puntarenas), es de consideración, ya que es probablemente la combinación lineal de estas dos contribuciones la que establece el efectivo 3.77% de discrepancia en amplitud de la onda en estos

dos sitios. Efectivamente, un detenido examen de la tabla en cuestión evidencia una suma negativa (-1.3%) de las restantes contribuciones porcentuales diurnas y semidiurnas en desfavor de Puntarenas.

Un porcentaje de amplificación del 3.77% es del orden de la típica amplificación semidiurna en cuencas semicerradas como el Golfo de Nicoya (20); sin embargo, el cálculo "exacto" del período natural de resonancia de esta cuenca rebasa los objetivos de este artículo. Los componentes de aguas bajas son de importancia para las localidades de Puntarenas y Limón. El componente M4, de importancia fundamental en el "transporte perpendicular" de sedimentos (21) es del mismo orden de magnitud relativa en estos sitios y un orden de magnitud mayor que en Puerto Quepos. Evidencia parcial de ello, es el consabido problema de sedimentación en Puntarenas así como de erosión de

playas en el litoral Caribe (22). Las figuras 9 y 10 evidencian asimismo el fenómeno.

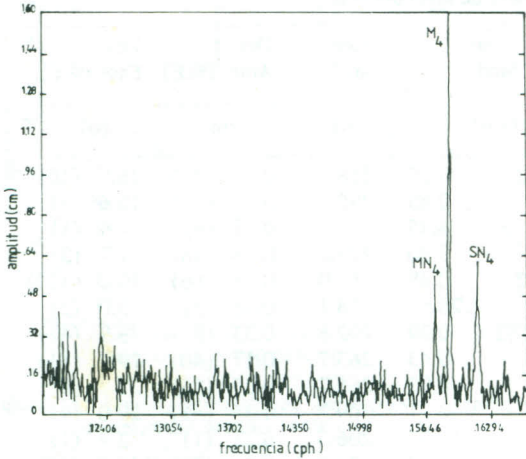


Figura 9: Puntarenas, gama cuatriidurna del espectro observado de amplitud del año 1974.

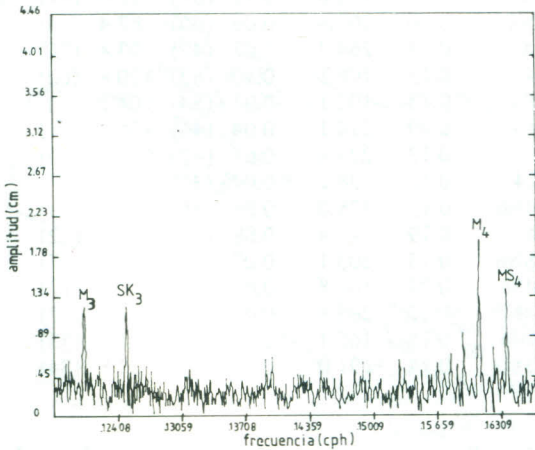


Figura 10: Limón, gama cuatriidurna del espectro observado de amplitud del año 1969.

La fase de un constituyente de marea es requisito para determinar el arribo de esta onda a un sitio determinado. Si el constituyente es de magnitud relativa "insignificante", la determinación exacta de su fase no es importante; en caso contrario, es requisito fundamental para la predicción exacta de la onda total de marea. A tal respecto, la tabla 2 muestra el análisis estadístico de la repetida aplicación de uno de los algoritmos clásicos de análisis mareográfico a secuencias temporales anuales de nivel del mar, correspondientes a un sitio de

máxima confiabilidad en el registro de la información. Se nota cómo las fases de los componentes mayores es determinada con una precisión del 90% o más; razón por la cual, en la práctica, basta con la obtención de un solo año completo de observaciones confiables "in situ", para lograr una aceptable predicción. Este es el caso de las predicciones en los tres puertos en estudio. A pesar de ello, algunas veces, el estudio de uno de los constituyentes menores resulta de sumo interés, cual es el caso de la onda M4, de gran relevancia en la atención de los fenómenos de sedimentación ya citados. De acuerdo con la tabla anterior, este componente requiere en su determinación secuencias temporales mayores, en vista de que un solo año conduce a incertidumbres, tanto en su fase como en su amplitud, inaceptables. Igualmente sucede con las oscilaciones de amplitud equiparable al ruido de fondo de origen no astronómico. Para una oscilación como la M4, de período "cuatriidurno", un error en su fase del 35%, implica una incertidumbre en su predicción de aproximadamente 2.1 horas. Por el contrario, una incertidumbre, como la anotada, de un 1%, correspondiente a la M2, de período semidiurno, implica una incertidumbre de aprox. 7 minutos; esto se encuentra prácticamente en los límites del error asociado al período de muestreo. En todo caso, aún para la determinación de los componentes mayores, es recomendable la utilización de una secuencia temporal de por lo menos 10 años de observaciones.

Las figuras 5 y 6 muestran la concordancia entre las observaciones y la predicción de mareas en el puerto del Caribe. En los puertos de Puntarenas y Quepos la situación es aún más favorable, en vista de la decisiva contribución a la marea total de un único componente, determinable con máxima precisión.

Las figuras 1,2,3,4,9,10,11 y 12 son el resultado del análisis espectral aplicado a las secuencias temporales de un año de alturas horarias de los puertos de interés. (Standard FFT (18), a las secuencias de Puntarenas y Algoritmo de Singleton (19), a las secuencias de Puerto Quepos y Limón). Estos resultados representan el rostro "energético" correspondiente a la mayor contribución al desnivel de las aguas en estas localidades. Debemos distinguir en estos espectros, aquellos picos notoriamente resueltos, esto es, aquellas líneas espectrales muy por encima del ruido de fondo (mucho mayores que 0.1 cm) y las periodicidades menores (mayores que este valor), las cuales requieren en su resolución tanto de secuencias temporales más extensas co-

TABLA No. 2

Trieste (Italia), análisis estadístico de la aplicación consecutiva del análisis armónico a 10 años de secuencias temporales de nivel del mar

	Amp. Med.	Fase Med.	Dev. Amp. (% e)	Dev. Fase (% E)	Amp. Med.	Fase Med.	Dev. Amp. (% E)	Dev. Fase (% E)	
	(cm)	(o)	(cm)	(o)	(cm)	(o)	(cm)	(o)	
SA	4.71	203.8	2.98 (63)	110.3 (59)	2N2	0.55	268.8	0.15 (27)	26.0 (10)
SSA	2.68	190.9	1.66 (62)	105.4 (55)	μz	0.65	290.3	0.08 (12)	10.6 (3)
MM	2.03	178.3	1.15 (57)	93.8 (52)	N2	4.45	277.5	0.27 (6)	4.4 (1)
MSF	1.80	179.2	0.76 (42)	84.1 (47)	νz	0.90	279.1	0.14 (16)	7.7 (3)
MF	2.22	185.5	0.80 (36)	61.6 (34)	OP2	0.38	57.9	0.25 (66)	70.0 (121)
MO3	0.38	232.4	0.18 (47)	103.1 (44)	M2	26.50	278.1	0.46 (2)	3.0 (1)
M3	0.83	205.4	0.08 (10)	7.8 (13)	MKS2	0.39	192.8	0.33 (85)	78.9 (41)
SO3	0.18	179.5	0.08 (44)	124.1 (69)	λz	0.43	263.7	0.17 (40)	29.7 (11)
MK3	0.17	224.8	0.09 (53)	55.7 (25)	L2	0.93	265.7	0.23 (25)	22.2 (8)
SK3	0.31	240.0	0.09 (29)	20.6 (8)	T2	0.81	309.7	0.35 (43)	29.0 (9)
2Q1	0.54	110.8	0.34 (63)	87.1 (79)	S2	15.92	206.3	0.21 (1)	2.9 (1)
σ_1	0.42	146.0	0.32 (76)	70.6 (48)	R2	0.33	176.0	0.26 (79)	146.5 (83)
Q1	1.11	96.5	0.37 (33)	25.7 (26)	K2	4.75	280.7	0.26 (5)	2.4 (1)
ξ_1	0.35	105.6	0.29 (83)	98.0 (93)	MSN2	0.22	139.3	0.17 (77)	74.8 (53)
O1	5.66	73.9	0.30 (5)	3.7 (5)	KJ2	0.46	99.7	0.17 (37)	29.2 (29)
MP1	0.47	305.5	0.32 (68)	50.6 (16)	2SM2	0.21	150.8	0.12 (57)	76.0 (51)
M1	0.53	67.6	0.16 (30)	39.0 (58)	MN4	0.10	201.4	0.06 (60)	87.4 (43)
X1	0.42	95.6	0.27 (64)	83.0 (88)	MA	0.15	264.7	0.07 (47)	93.4 (35)
π_1	0.64	29.5	0.33 (52)	9.5 (32)	SN4	0.12	198.1	0.10 (83)	120.8 (60)
P1	6.11	67.6	0.44 (7)	3.8 (6)	MS4	0.13	102.1	0.07 (54)	104.2 (101)
S1	1.62	41.3	0.21 (13)	15.7 (39)	MK4	0.09	214.1	0.04 (44)	130.5 (61)
K1	17.91	71.5	0.36 (2)	2.6 (4)	S4	0.12	224.4	0.05 (42)	157.3 (70)
ψ_1	0.48	157.1	0.28 (58)	44.1 (28)	SK4	0.12	238.2	0.04 (33)	111.8 (47)
φ_1	0.49	120.6	0.24 (49)	121.5 (100)	2MN6	0.13	128.0	0.06 (46)	80.5 (63)
δ_1	0.48	130.4	0.27 (56)	109.2 (84)	M6	0.19	147.4	0.08 (42)	32.0 (22)
J1	1.21	74.4	0.25 (21)	24.4 (32)	MSN6	0.13	203.1	0.07 (54)	75.6 (37)
SO1	1.66	189.7	0.58 (35)	12.6 (6)	2MS6	0.24	166.8	0.09 (38)	28.8 (17)
001	1.15	108.3	0.62 (54)	86.2 (80)	2MK6	0.13	205.8	0.07 (53)	76.9 (37)
OQ2	0.51	171.8	0.31 (61)	115.7 (67)	2SM6	0.15	165.1	0.13 (86)	54.8 (33)
MNS2	0.17	214.9	0.13 (76)	82.5 (38)	MSK6	0.14	191.0	0.08 (57)	65.8 (34)

mo, según lo estadísticamente fundamentado más arriba, de una mayor afinación de los algoritmos de análisis. En particular, nótese en las figuras 9 y 10, la preponderancia de las particularidades M4, SN4 y MN4, en Puntarenas, así como de las M3, SK3, M4 y MS4, en Puerto Limón. Estas frecuencias, con excepción de la M3, de origen lunar, son producto de la interacción de los componentes M2, S2 y K1 con el fondo. En el espectro de Quepos no aparecen tales contribuciones. Nótese cómo estas amplitudes se elevan muy por encima del ruido de fondo, el cual puede fácilmente reconocerse en la amplitud promedio de las restantes periodicidades en la figura 10, correspondiente a Puerto Limón.

C. Panorama Mareográfico de los Litorales Costarricenses.

La figura 13 presenta las diferencias de altura y fase de pleamares y bajamares referidas a las estaciones primarias de registro Puntarenas y Cristóbal (Panamá). Las direcciones de propagación expuestas se refieren exclusivamente a los litorales costarricenses y respetan:

- los análisis exhaustivos de observaciones correspondientes a estaciones primarias ("permanentes") de registro.
- los resultados inferidos a partir de observaciones temporales en estaciones secundarias ("temporales") de registro.

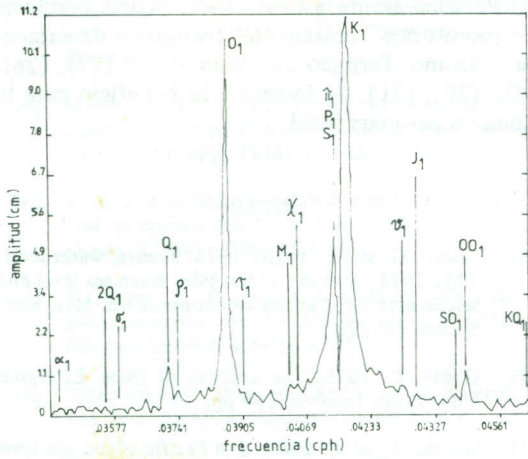


Figura 11: Limón, gama diurna del espectro observado de amplitud del año 1969.

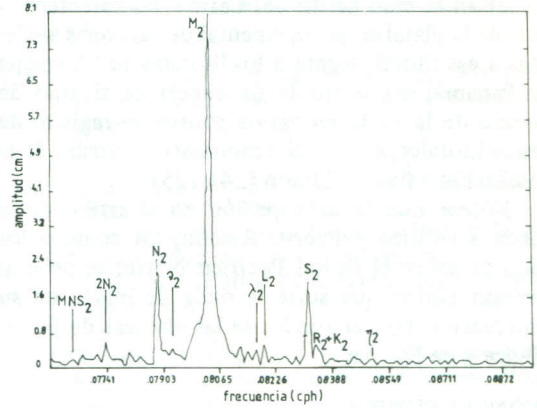


Figura 12: Limón, gama semidiurna del espectro observado de amplitud del año 1969.

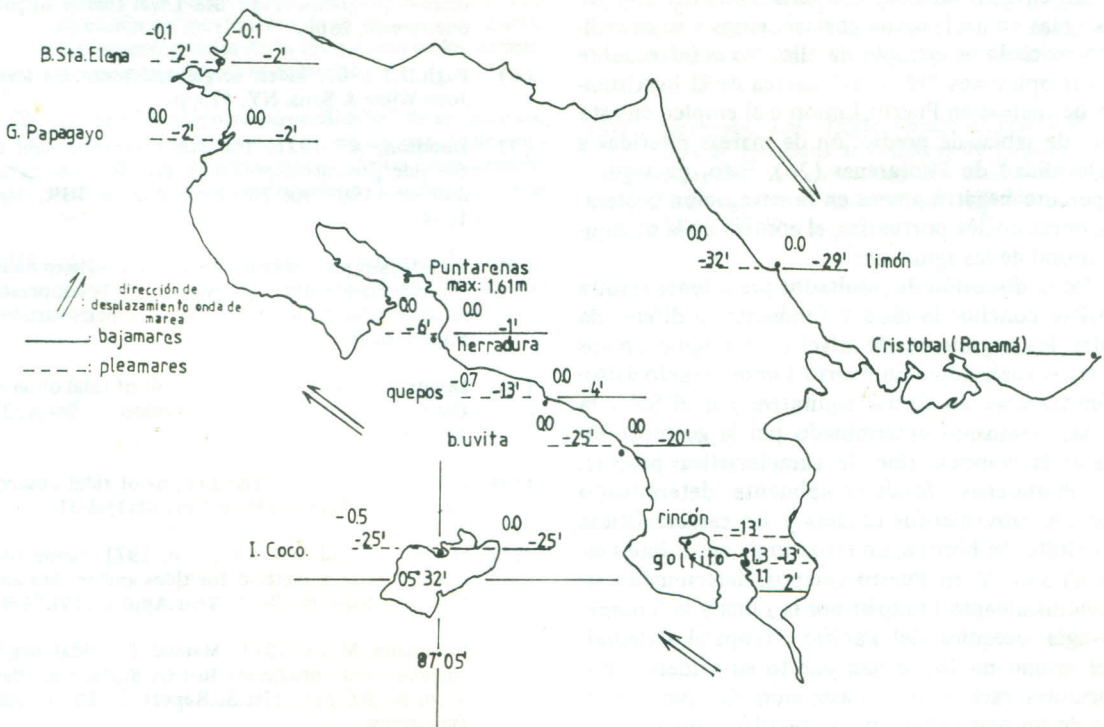


Fig. 13: Diferencias de amplitud (pies) y fase (minutos) referidas a las estaciones primarias de registro: Puntarenas y Cristóbal (Panamá).

c) en el caso del litoral Caribe, las características de la plataforma continental de las zonas aledañas a ese litoral, frente a los litorales de Nicaragua y Panamá; así como la diferencia de tiempo de arribo de la onda en varios puntos de registro de estos litorales, a partir del momento de arribo de la oscilación a Puerto Limón (24), (25).

Nótese que la anticipación en el arribo de la onda a Golfito y Puerto Rincón, así como a los puntos sobre el litoral Pacífico Norte, se debe al retraso típico que sufre la onda de marea en su interacción con el fondo de las cuencas de Golfo Dulce y de Nicoya.

CONCLUSIONES.

Es un hecho que en los últimos tiempos el costarricense ha debido afrontar con mayor seriedad la problemática de sus litorales, por una multiplicidad de razones, entre las cuales aparecen aquellas ligadas al factor demográfico, turístico, industrial, portuario, ecológico; no obstante, la fenomenología costera no es aún objeto de un estudio básico integral, y sus fundamentos todavía se desconocen en gran medida. Las variaciones del nivel de las aguas en los litorales costarricenses y su causalidad asociada es ejemplo de ello. No es infrecuente el oír opiniones "técnicas" acerca de la inexistencia de mareas en Puerto Limón o el empleo en este sitio de tablas de predicción de mareas referidas a la localidad de Puntarenas (26). Esto, de seguro, repercute negativamente en la navegación costera, las obras civiles portuarias, el control de la dinámica litoral de las aguas, etc.

De la discusión de resultados precedente resulta posible concluir la clara y fundamental diferencia entre los regímenes de nivel de las aguas en los puertos analizados. En Puerto Limón, regido astronómicamente en forma equitativa por el Sol y la Luna; asimismo determinado por la geomorfología de la cuenca Caribe, de características propias. En Puntarenas, fundamentalmente determinado por los movimientos lunares y las características del Golfo de Nicoya, un estuario de aguas bajas estratificado. Y en Puerto Quepos, determinado astronómicamente también por la Luna y la fenomenología oceánica del Pacífico Tropical Oriental. Del mismo modo, se han puesto en evidencia importantes variaciones no astronómicas que requieren de un más exhaustivo y detallado análisis, con el fin de cumplir con las exigencias del estudio integral más arriba citado. Este constituye el referido retador análisis del "residuo", lo cual, en el caso

del Pacífico frente a Costa Rica, podría conducir al "monitoreo" costero del fenómeno de surgencia: "Domo Térmico de Costa Rica" (27), (28), (29), (30), (31), de indiscutible beneficio para la industria pesquera local.

NOTAS

- (1) Godin, G. and L. Trotti. 1975. Trieste, water levels 1952-1971. A study of the tide, mean sea level and seiche activity. Canada Environm. Fish. Mar. Serv. Special Pub. 28.
- (2) Godin, G. 1976. The analysis of tides. Liverpool Univ. Press, London, 264 pp.
- (3) Wyrтки, K. et al. 1988. The Pacific island sea level network. Univ. Hawaii JIMAR contr. No.88-0137. Data report No.002, Hawaii, 71 pp.
- (4) Caldwell, P.C. and B.J. Kilonsky. 1988. Manual for the Toga Sea Level Center: Sea level data processing and quality control programs. Toga Sea Level Center unpub.doc.Hawaii, 30pp.
- (5) Caldwell, P.C. and B.J. Kilonsky. 1988. Manual for the Toga Sea Level Center: tidal analysis and prediction programs. Toga Sea Level Center unpub. doc.Hawaii, 26pp.
- (6) Pugh.D.T.1987. Tides, surges and mean sea level. John Wiley & Sons, NY, 473pp.
- (7) Doodson, A.T.1921. The hourly development of the tide generating potential. Proc.Roy. Soc.London.Ser.A100. 306-28. Reprinted in IHR, May 1954.
- (8) La estación permanente, además del registro de nivel, efectúa el registro permanente de la temperatura superficial del agua y de las principales variables atmosféricas.
- (9) Doodson, A.T. 1928. The analysis of tidal observations. Phil.Trans.Roy.Soc.London. Ser.A227, 223-79.
- (10) Doodson, A.T.1954. The analysis of tidal observations for 29 days. Int.Hydr.Rev. 31(1):3-31.
- (11) Mosetti, F. and M.T. Carrozzo, 1971. Some considerations in a method for tides and seiches analysis. Bollettino di Geof. Teor.Appl.13(49):76-94.
- (12) Foremann M.G.G.1977. Manual for tidal height analysis and prediction.Inst.Oc.Sc.Patricia Bay, Victoria B.C.Pac. Mar.Sc.Report 77-10. Unpub. Manuscript.
- (13) W.H.Munk and D.E.Cartwright,1966. Tidal Spectroscopy and prediction. Phil.Trans.Roy.Soc.London. Vol.259. A1105:533-581.

- (14) Shureman, P. 1941. Manual of harmonic analysis and prediction of tides. (U.S. Coast and Geodetic Survey).
- (15) Mosetti, F. 1986. Filter devices for numerical series analysis: a review of the periodicities analysis. *Boll. Ocean. Teor. Appl.* IV(4):227-285.
- (16) Franco, A de Santos and N.J. Roch. 1971. The FFT and its application to tidal oscillations. *Bolm. Inst. Ocean. S. Paulo*, 20: 145-199.
- (17) Gutiérrez, A., F. Mosetti & N. Purga. 1981. On the indetermination of the tidal harmonic constants. *Il Nuovo Cimento*. 4(5):563-575.
- (18) Standard FFT. Programa de la Cátedra de Mediciones Oceanográficas. Universidad de Trieste.
- (19) Singleton, R.C. 1969. An algorithm for computing the mixed radix FFT. *IEEE Trans. Audio. Elect. Vol. AU-17*: 99-103.
- (20) Pond, S. and G.L. Pickard. 1983. *Introductory Dynamical Oceanography*. Pergamon Press, NY. pp 269-273.
- (21) A diferencia del "longshore transport" de sedimentos, que se efectúa paralelamente a la costa, el "transporte perpendicular" se produce en la misma dirección de movimiento de la corriente de marea, justamente a causa de la interacción de los componentes principales con el fondo.
- (22) Junto al "transporte perpendicular" de sedimentos, el "longshore transport" juega un papel relevante en el lavado y sedimentación de las áreas costeras que han sufrido modificaciones morfológicas sustanciales.
- (23) Gutiérrez, A. 1980. Análisis mareográfico de los puertos de Puntarenas y Limón. (Costa Rica). *Revista Geográfica de América Central*. 11-12: 141-156.
- (24) Tablas de diferencias de marea y otras constantes de los años 1987/88 del "U.S. Coast & Geodetic Survey".
- (25) Mapa Físico-Político de Costa Rica. Escala 1:500.000. IGN, 1979. Mapa Barimétrico del Golfo de México y el Caribe. Escala 1:3.322.500. (Proyección Mercator). Oficina Hidrográfica de la Marina de los Estados Unidos, 1966.
- (26) Gutiérrez, A. Predicción de la marea en las localidades de Puntarenas y Limón. *Bol. Meteor. Mens. (IMN)* 10(II): 4-11. *Dome. U.S. Fish. Wildlife Serv. Fish. Bull.* 63: 355-372.
- (28) Hofmann, E., A.J. Busalacchi and J.J. O'Brien. 1981. Wind Generation of the Costa Rica Dome. *Florida State Univ. Rep. NO: gfdj-contrib.-1741/ Science V. 124 pp: 552-554.*
- (29) Brenes, C. 1983: Condiciones de movimiento geostrofico en la región del Domo de Costa Rica. *Ciencia y Tecnología* 7(1): 121-152.
- (30) Rebert, J.P. et al. 1985. Relations between sea level, thermocline depth, heat content and dynamic height in the Tropical Pacific Ocean. *JGR*, 90, 11719-25.
- (31) Verstraete, J.M. 1985. Contre-courants équatoriaux et variations saisonnières du contenu thermique et du niveau moyen dans l'Atlantique Tropical. *Oceanologica Acta*, 8: 249-261. (Págs. 199-200).

APENDICE

LA MAREA DE EQUILIBRIO

A partir de la figura 1a., el potencial gravitacional que actúa sobre un punto P de la superficie terrestre es:

$$\Omega_p = \frac{-Gm_1}{MP} \tag{1a.}$$

donde m_1 es la masa de la Luna.

Mediante algunas transformaciones geométricas, esta relación se puede representar en forma polinomial de la siguiente manera:

$$\Omega_p = \frac{-Gm_1}{R_1} \left(1 + \frac{a}{R_1} p_1(\cos \Phi) + \frac{a^2}{R_1^2} p_2(\cos \Phi) + \frac{a^3}{R_1^3} p_3(\cos \Phi) + \dots \right) \tag{2a.}$$

donde los p_n son los polinomios de Legendre y Φ es la latitud de P: o, de acuerdo con la figura 2a., después de efectuadas algunas simplificaciones:

$$-\Omega_p = \frac{3}{2} \frac{Gm_1}{m_t} \frac{a^3}{R_1^2} \left(\sin^2 d_1 - \frac{1}{3} (\sin^2 \Phi_p - 1/3) + \frac{1}{2} \sin 2d_1 \sin 2\Phi_p \cos C_p + \frac{1}{2} \cos 2d_1 \cos 2\Phi_p \cos 2C_p \right) \tag{3a.}$$

donde d_1 es la declinación lunar, C_p es el ángulo horario del punto P y m_t es la masa de la Tierra.

La Marea de Equilibrio se define como la elevación de la superficie del mar que estaría en equilibrio con las fuerzas de marea, si la Tierra por completo estuviera cubierta de agua hasta una profundidad tal que la respuesta a dichas fuerzas fuera instantánea.

A partir de la fórmula 3a, se suele computar la Marea de Equilibrio, la cual, omitiendo aquí la demostración, se puede representar mediante la fórmula siguiente:

$$\xi = a \frac{m_1}{m_t} \left[C_0(t) - \frac{3}{2} \sin^2 \Phi_p - \frac{1}{2} + C_1(t) \sin 2\Phi_p + C_2(t) \cos 2\Phi_p \right] \tag{4a.}$$

m_t es la masa de la Tierra y los coeficientes $C(t)$, representan las principales ESPECIES de marea: respectivamente, las especies de largo período (C_0), diurnas (C_1) y semidiurnas (C_2). Los tres coeficientes dependen del cubo del inverso de la distancia entre los astros y de la declinación lunar. Los coeficientes correspondientes a las especies diurnas y semidiurnas dependen además del ángulo horario de P.

Esta teoría, como se ha dicho, supone la Tierra cubierta por completo de agua; pero no obstante este supuesto, en la realidad oceánica las diferentes frecuencias que constituyen la Marea de Equilibrio (componentes de marea) encuentran correspondientes frecuencias de igual velocidad, aunque de distinta amplitud; esto último, debido a la presencia de los continentes. Este principio es fundamental en el análisis armónico de las secuencias temporales de nivel del mar y en la predicción del fenómeno.

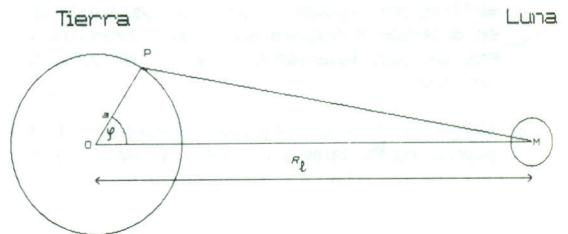


Figura 1a: Sistema Tierra-Luna, donde se muestra la ubicación del punto general P sobre la superficie terrestre.

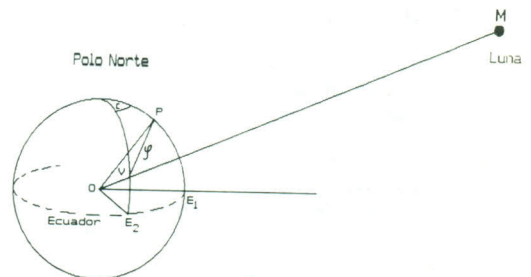


Figura 2a: Ubicación del punto general P relativa al punto sublunar V. El ángulo POV es ϕ .

ORIGEN Y NOTACION DE LOS COMPONENTES DE MAREA.

La Marea de Equilibrio (fórmula 4a.) se puede expandir en una serie de términos armónicos, cuyas velocidades respetan la siguiente forma general:

$$w_n = i_A w_1 + i_B w_2 + i_C w_3 + i_D w_4 + i_E w_5 + i_F w_6 \quad (5a.)$$

Las w_n son las frecuencias básicas de ciertos movimientos astronómicos fundamentales y las i_n son enteros pequeños, cuyas diferentes combinaciones definen los distintos constituyentes de marea.

Un modo de subdividir las principales especies de marea ya citadas (de largo período, diurnas y semidiurnas) consiste en establecer los correspondientes filtros matemáticos, de tal manera que una vez aplicados éstos, se obtengan, como resultado, los GRUPOS de componentes que a continuación se apuntan:

lunares de largo período; solares de largo período; lunares diurnos; solares diurnos; lunisolares diur-

nos; lunares semidiurnos; solares semidiurnos; lunisolares diurnos; lunares tridiurnos; solares tridiurnos.

Además, por efecto de la interacción de los componentes principales con el fondo oceánico, se presenta un grupo más, llamado de "componentes de aguas bajas". Dentro de este último grupo se encuentran periodicidades semidiurnas, tridiurnas, cuatridiurnas, sexto y octodiurnas. La sucesiva aplicación de filtros matemáticos consigue la selección de cada uno de los CONSTITUYENTES de marea.

La notación de algunos de estos componentes corresponde al nombre (en inglés) del astro que les da origen. Ejemplo de ello son los componentes principales semidiurnos, lunar y solar: M_2 y S_2 ; el subíndice se refiere a la periodicidad que les corresponde (de período aproximado semidiurno). otras veces la notación indica su origen combinado (i.e. $2SM_2$, el cual involucra el duplo de la frecuencia solar); o la combinación entre componentes mayores (i.e. $MKS_2 : M_2 + K_2 + S_2$). O bien, su notación puede ser arbitraria (i.e. Ψ_1, Π_1 , etc).