• JUNTA DE INVESTIGACIONES TÉCNICAS •

UNA POSIBLE EXPLICACIÓN DEL FENÓMENO DE LAS MAREAS

• TEORÍA ONDULATORIOCENTRÍFUGA (1) •

POR RAMÓN IRIBARREN CAVANILLES, INGENIERO DE CAMINOS

El autor aplica su original teoría ondulatoriocentrífuga al estudio de las mareas en ciertas zonas concretas del Globo, y expone también el caso particular de las islas núcleos de marea, antítesis de los puntos anfidrómicos, en que la onda de marea encuentra en su camino una isla con gran plataforma costera.

IV

Descrito en su conjunto y con la brevedad posible el origen y propagación del admirable fenómeno que nos ocupa, pasemos ahora a estudiar algunas de sus particularidades interesantes, no sin antes repetir que las dificultades actuales, para la recopilación de datos, pueden haber dado origen a alguna inexactitud.

En primer lugar, tratemos de determinar en qué forma se modifica la onda de marea cuando al propagarse aborda alguna plataforma continental extraordinaria, de mucha mayor anchura que los cien kilómetros indicados al principio de este estudio, que no suelen rebasar corrientemente, y vamos también a tratar de determinar, con cierta aproximación, la anchura que deberá tener o rebasar dicha plataforma para que la onda de marea adquiera, al propagarse sobre ella, las características correspondientes a su reducida profundidad, en lugar de las que le han correspondido en las profundidades batiales oceánicas de las que procede.

La idea del cuadrilátero de avance (1), fundamentada en que la onda integra, en cierto modo, cuanto hay bajo su longitud y, en especial, bajo su semilongitud anterior que es la que manda en la celeridad y demás características de las ondas, nos resuelve, con suficiente aproximación, este interesante problema, pues, variando generalmente las profundidades de las plataformas continentales, desde nulas en las costas hasta unos doscientos metros en sus bordes, podemos admitir, también con cierta aproximación, una profundidad media de cien metros.

Claro es que en cada caso particular, se podría afinar más todo esto, pero, con el carácter general con que hacemos este estudio, basta, por ahora, con la aproximación que vamos a obtener.

La expresión de la celeridad, justificada anteriormente, nos da:

$$C = \sqrt{g\,H} = \sqrt{9{,}81 \times 100} = 31{,}3 \text{ m./s.} = 113 \text{ km./h.},$$

que, multiplicada por el semiperíodo, nos da la semilongitud: $L = 31{,}3 \times 22.350 = 7 \times 10^5$ m. = = 700 km., lo que nos indica que, cuando la plataforma costera tenga una anchura igual o superior a esta anchura crítica, del orden de los 700 km., podrán adaptarse las características de la onda que la aborda, incluso de frente, a su reducida profundidad, reduciéndose, a su vez, su celeridad, de los 714 km./h. que corresponde al profundo océano a los 113 km./h. que acabamos de deducir.

No nos cansaremos de repetir que, como hicimos resaltar al exponer el método de los planos de oleaje, aún queda mucho por afinar en todo esto, y en especial en las dimensiones del cuadrilátero de avance, que bien pudieran resultar más reducidas, en especial sus anchuras, y que, como allí indicamos, precisaremos mejor cuando dispongamos del laboratorio e instalaciones de modelos reducidos, actualmente en construcción. Seguimos creyendo siempre más en la observación que en la razón pura.

La relación de los semiejes orbitarios superficiales, horizontal y vertical, valen:

$$K = \frac{L_0}{L} = \frac{15{,}6 \times 10^8}{7 \times 10^5} = 2.230,$$

lo que nos indica que, sobre estas excepcionalmente anchas plataformas costeras, aumenta mucho el recorrido horizontal, y como consecuencia, la velocidad de las moléculas líquidas cuyo recorrido rebasa de

(1) Véase la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS de 1.° de enero de 1941.

los dos kilómetros por cada metro de altura de la onda.

La curva representación de la ecuación exponencial de la cresta de la ola, debida a la fuerza centrífuga compuesta, $h = h_2\, e^{-Ax}$, se hace mucho más empinada que en mar profundo y la hemos representado, para la latitud media $\lambda = 45°$ en la figura 5, en la que hemos representado, también esquemáticamente y con la finalidad que luego veremos, la anchura y profundidades de una supuesta plataforma, así como la gran profundidad media del océano. Más adelante volveremos sobre esta interesantísima figura cuya curva exponencial es conveniente comparar con la correspondiente oceánica, referente a la misma latitud, en la figura 2. No es necesario aclarar que dicha curva exponencial, indicada de línea llena en la figura, se refiere, toda ella, a la supuesta profundidad media de la plataforma continental $H = 100$ m. y no a las batiales.

Conocidas así las características indicadas anteriormente, o sea la celeridad, longitud, velocidad máxima orbitaria $v = \frac{\pi h K}{T}$ y gradación de alturas $h = h_2\, e^{-Ax}$, sólo nos falta determinar, para acabar de precisar estas últimas, el aumento de altura originado por el acortamiento de longitud al propagarse la onda sobre la ancha plataforma supuesta.

Como explicamos al referirnos a los planos de oleaje y si, como prácticamente sucede en el avance de la onda de marea, el consumo de energía es reducido para avances no muy largos, aun cuando se efectúen sobre la plataforma costera, podemos obtener, aproximadamente, dicha altura, igualando las expresiones de la energía unitaria sobre la plataforma y en mar profundo, $E = E_0$, ó sea, en el caso de abordaje casi frontal de la plataforma, en el que las anchuras $A = A_0$, tenemos $\rho\, g\, L_0\, h_0^2 = \rho\, g\, L\, h^2$; luego si h_0 es la semialtura en el profundo océano, la semialtura aproximada sobre la ancha plataforma supuesta será: $h = h_0 \sqrt{\frac{L_0}{L}}$, o bien, en nuestro caso,

$$h = h_0 \sqrt{\frac{714\, T}{113\, T}} = 2{,}52\, h_0,$$

o sea que las alturas se hacen dos veces y media mayores.

Al tratar de este tema es lógico ocuparnos de la célebre fórmula de Comoy, $h \sqrt{H} = \text{constante}$, que nos da la variación de semialtura eficaz de la onda h en función de la variación de la profundidad en que se propaga H.

Esta fórmula ha sido aceptada con gran satisfacción como todas aquellas que tienden a explicar cómo es posible que las reducidas alturas de sólo 75 cm. del elipsoide de Newton, deducido para el enorme océano supuesto que recubre la totalidad de la Tierra, pueden convertirse, en los océanos reales mucho menores, en alturas generalmente bastante mayores y que en algunos casos extremos llegan a rebasar los 15 ó 16 m.

Estimemos que, de acuerdo con la teoría general expuesta y debido principalmente a la fuerza centrífuga compuesta unida a otras acciones secundarias que vamos a estudiar, queda todo debidamente explicado y aclarado sin recurrir a fórmulas francamente exageradas, como la que nos ocupa.

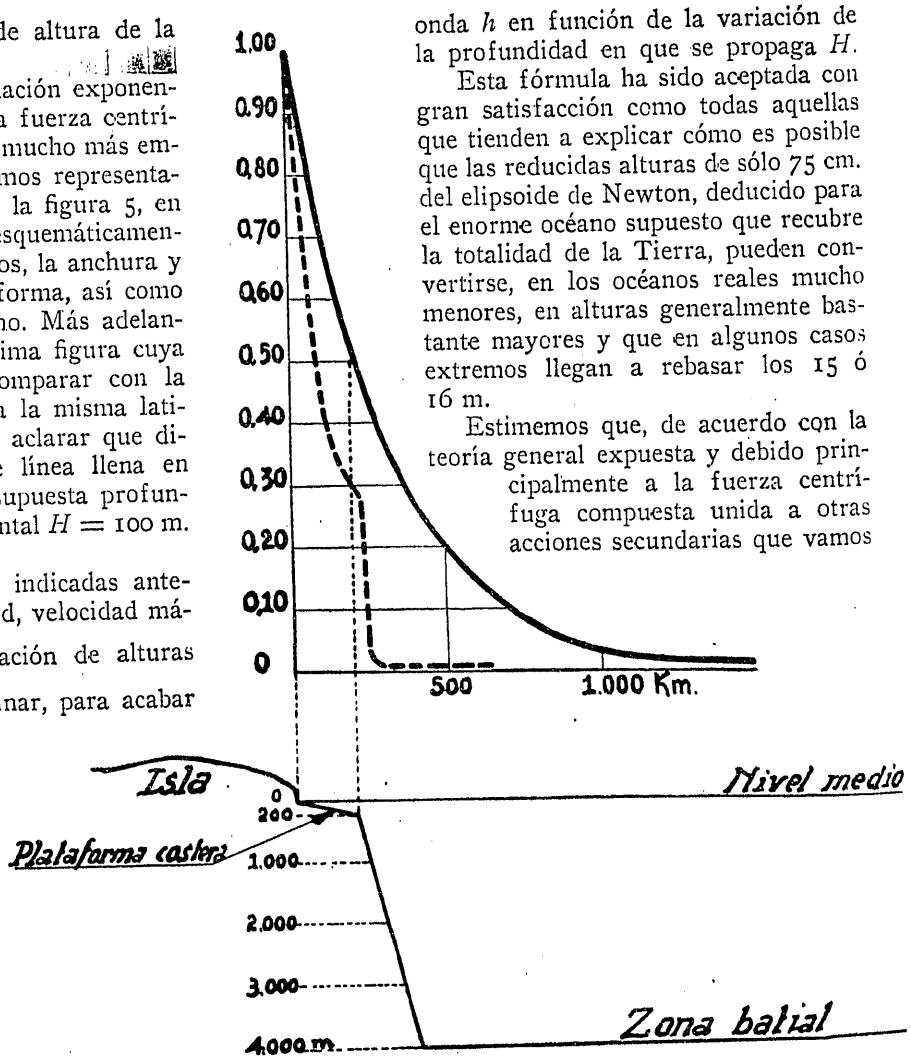


Fig. 5. — Curvas exponenciales costeras.

Latitud $\lambda = 45°$. Profundidad media $H = 100$ m. ————
Tenida cuenta de la acción dinámica y del estirado de la onda: — — — —

Si aplicamos, en nuestro caso, la expresión de Comoy, obtenemos:

$$h = h_0 = \sqrt{\frac{H_0}{H}} = h_0 \sqrt{\frac{4.000}{100}} = 6{,}32\, h_0,$$

que discrepa grandemente de la que acabamos de obtener, $h = 2{,}52\, h_0$.

Para hacerse una idea de lo exagerado del resultado obtenido mediante la fórmula de Comoy, observamos, por ejemplo, que la onda que aborda la amplia plataforma continental enfrente del Canal de la Mancha, poco después de la cotidal III, ha de tener una altura del orden de $3{,}8 \times 0{,}73 = 2{,}77$ m., deducida de la exponencial correspondiente a los 45°, en la fi-

gura 2, y tenida cuenta de que la distancia, según las cotidales, desde el Canal a las proximidades de las costas cantábricas en que se apoyan y donde la altura es del orden de 3,8 m., se aproxima a los 600 kilómetros, a los que, en la referida exponencial, corresponde una reducción de 0,73.

Como es lógico, esta reducción y su altura correspondiente de 2,77 m. concuerdan con las obtenidas para dichos 600 kms. en el perfil longitudinal de la cotidal III del Atlántico Norte, dibujada anteriormente. Si la expresión de Comoy fuese cierta, deduciríamos para la entrada del Canal, cuya profundidad me-

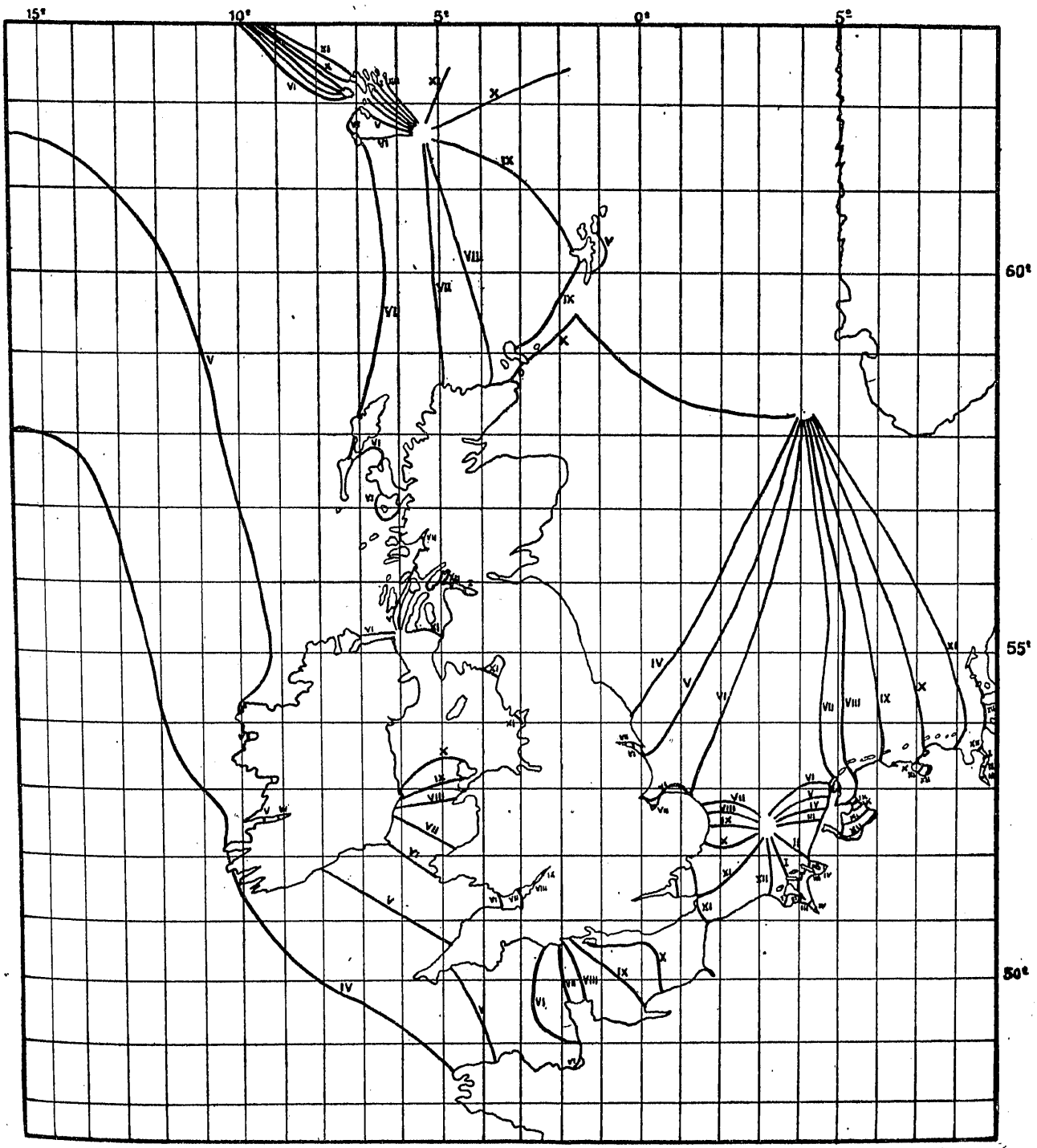


Fig. 6. — Islas Británicas. Cotidales anfidrómicas.

dia de su cuadrilátero de avance se aproxima mucho a los 100 m. supuestos, alturas del orden de $6{,}32 \times 2{,}77 = 17{,}5$ m., que son enormemente exageradas. En cambio, según nuestro resultado, la altura deberá ser de $2{,}52 \times 2{,}77 = 6{,}98$ m., que está dentro del orden de las alturas medias observadas en ambas costas de esta zona de entrada del Canal, correspondientes a las cotidales V de las figuras 6 y 6', algunas de cuyas alturas se indican en esta última figura.

Vamos a explicar y corregir el error sufrido por Comoy, cuya meritoria labor, al tratar de establecer su interesante expresión, es indudable.

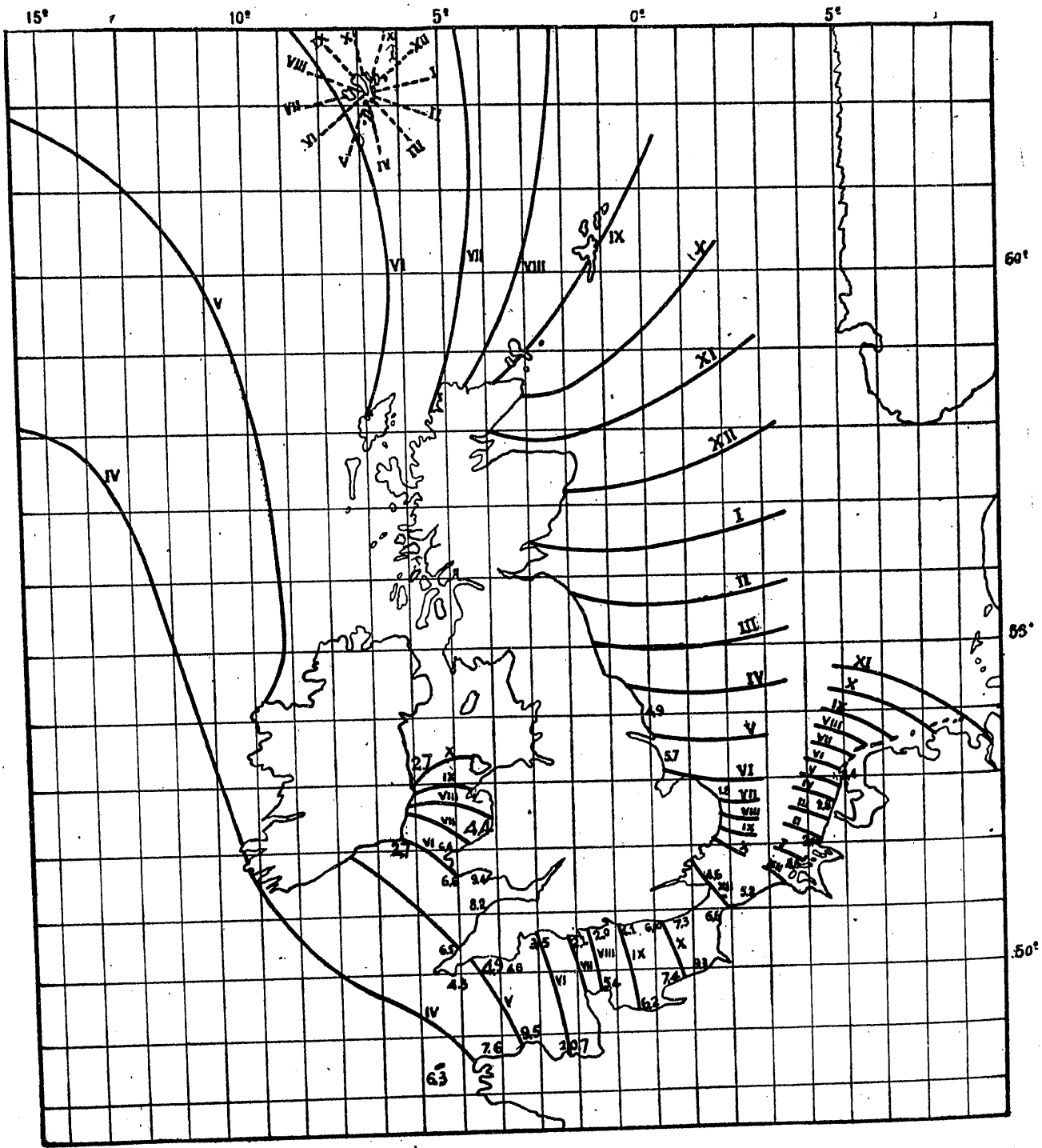


Fig. 6'. — Islas Británicas. Cotidales ondulatoriocentrífugas.

Para ello, comencemos por deducir, en forma sencillísima, la fórmula verdadera.

Si, como es muy aproximadamente cierto y Comoy admite, el consumo de energía producido por el avance, no muy largo, de la onda desde el mar profundo a la plataforma es pequeño, podemos admitir también aproximadamente, como se ha indicado, la conservación de la energía, por unidad de anchura de la onda y en un recorrido, repetimos, no muy grande, en el que la separación de las normales varíe poco.

En estas condiciones, tenemos:

$$E = \text{Constante} = \rho\, g\, L\, h^2.$$

Como ya hemos visto, y en el caso de la larguísima onda de marea, en relación con las profundidades oceánicas en que se propaga, se deduce:

$$K = \coth \frac{\pi H}{L} = \frac{1}{\operatorname{tg h} \frac{\pi H}{L}} \simeq \frac{1}{\frac{\pi H}{L}} = \frac{L}{\pi H};$$

luego $L = \pi H K$, que, sustituída en la anterior, nos da:

$$\text{Constante} = \rho\, g\, \pi\, H\, K\, h^2;$$

luego $K H h^2 = \text{Constante}$, que es la expresión realmente admisible, en lugar de la de Comoy, $H h^2 = \text{Constante}$.

El error de los cálculos de Comoy, que no es necesario reproducir aquí, consiste en haber empleado, en sus simplificaciones, la expresión de la celeridad $C = \sqrt{\frac{g}{\pi} L}$, correspondiente a grandes profundidades, en lugar de la verdadera, $C = \sqrt{\frac{g}{\pi} L K}$, referente a las reducidísimas profundidades en que hemos probado que la onda de marea se propaga, aun en los más profundos océanos, y con mayor razón todavía sobre las amplias plataformas costeras, para las que realmente se establece y aplica la fórmula.

Además, tenemos:

$$K = \frac{L_0}{L} = \frac{L}{\pi H};$$

luego

$$L = \sqrt{\pi H L_0};$$

que nos da:

$$K = \sqrt{\frac{L_0}{\pi H}};$$

y que, sustituída en $K H h^2 = \text{Constante}$, obtenida anteriormente, nos permite llegar a la expresión final

$$h \sqrt[4]{H} = \text{Constante},$$

en lugar de la expresión de Comoy:

$$h \sqrt{H} = \text{Constante}\ (1).$$

Aplicada esta expresión al caso de la entrada del Canal de la Mancha, obtenemos:

$$h = h_0 \sqrt[4]{\frac{H_0}{H}} = h_0 \sqrt[4]{\frac{4000}{100}} = 2{,}52\, h_0,$$

que es, lógicamente, el mismo resultado obtenido anteriormente.

Y ya que estamos en la entrada del Canal de la Mancha, hagamos notar que sus alturas de marea, o mejor dicho, la relación media entre las alturas observadas en su costa inglesa y la francesa, comprueban, una vez más, las teorías expuestas, principalmente en relación con la decisiva acción de la fuerza centrífuga compuesta, que se comprueba actúa en la forma que hemos explicado.

En efecto: la curva exponencial de la figura 5.ª, a la que, aproximadamente, se han de adaptar los perfiles longitudinales de las cotidales de esta zona de la entrada del Canal, nos indica que, para su anchura del orden de los 150 km., la relación de alturas entre las costas inglesa y la francesa ha de aproximarse a 0,61, que encaja muy aceptablemente con la relación media de las alturas observadas en ambas costas, e indicadas algunas de ellas en la figura 6'. Este resultado puede acentuarse aún debido a que la latitud del Canal es algo superior a los 45°.

También, en el Canal de San Jorge, las alturas son mayores en la costa inglesa que en la irlandesa.

Todo esto, que se afinará mejor en futuros estudios de detalle, comprueba, una vez más, que la decisiva acción de la fuerza centrífuga compuesta se efectúa en la forma expuesta, y del mismo modo se podrían multiplicar los casos comprobatorios de la teoría desarrollada.

Probablemente esta onda progresiva se refleja parcialmente en el fondo del Canal, pues a la abertura de Calais, llega, a la misma hora aproximada XI y por el otro lado, la onda, de mucho menor altura que la que nos ocupa y que ha bajado por el mar del Norte.

Esta reflexión o cruce de ondas, origina, al interferir con la onda directa, una pequeña onda estacionaria sobre la que avanza la gran onda progresiva. El nodo de aquélla se observa, en cierto modo nada más, en la zona de Cherburgo y el Havre, en la que las alturas son menores y las cotidales se aproximan, y el vientre en la de Calais, en la que sucede lo contrario.

---

(1) Gran satisfacción nos produce hacer constar que, eficazmente, colaboró en la obtención de esta sencilla expresión final el entonces alumno y hoy ingeniero Sr. Muñoz Laborde.

Los efectos expuestos anteriormente, incrementados en el interior del Canal, producidos por la reducción de calados y la fuerza centrífuga compuesta, junto con la forma abocinada de la costa y bahía de Mont. St. Michel, que produce una gran concentración de energía y consiguiente aumento de alturas, explican perfectamente la altura, de cerca de 14 m., allí observada.

Parecido efecto se produce, por su amplia plataforma costera, también de mayor anchura que los 700 kilómetros críticos antes citados, frente a la desembocadura del río de San Lorenzo y entrada de la bahía de Fundy, en el Canadá, donde el gran aumento de altura de marea, producido por esta causa, hay que incrementarlo, además, por la gran concentración de energía producida por el casi ideal abocinamiento de ambas, ría y bahía, con lo que también se llega, lógicamente, a alturas del orden de los 14 m.

Análogo efecto produce la gran plataforma continental sobre la que se asientan las Islas Malvinas, con la única diferencia de que, en este caso, la ulterior concentración de energía no está producida por el abocinamiento de la costa, sino que, la forma en que la onda oceánica aborda esta plataforma después de doblar el cabo de Hornos, origina, sobre ella, una alta rama de onda que, entre éste y las Malvinas, avanza, con relativa lentitud, hacia la costa continental, en dirección aproximada al N. O.

Después de dobladas las Malvinas, por la rápida onda oceánica, se origina otra rama de onda sobre la parte de la plataforma costera situada al Norte de las islas y que avanza también hacia la costa continental en dirección aproximada al SE.

Ambas ramas de onda costera, cuya altura será ya del orden de los siete metros, confluyen en la costa, en las proximidades de la desembocadura del río Gállego, concentrando sus energías y duplicando sus alturas, que llegan así a los 14 metros observados.

La compleja forma de propagarse y actuar de estas dos ramas costeras de onda y de sus posibles reflexiones, explican también las grandes perturbaciones que se observan en la marea, en esta zona del extremo SE. de América.

También se producen grandes aumentos de altura de mareas, provocados por amplias y poco profundas plataformas continentales, en el golfo de Corea, e incluso a su reducida escala de mar interior, en el golfo de Venecia y en el de Gabes, en el Mediterráneo, así como en algunos otros lugares del Globo.

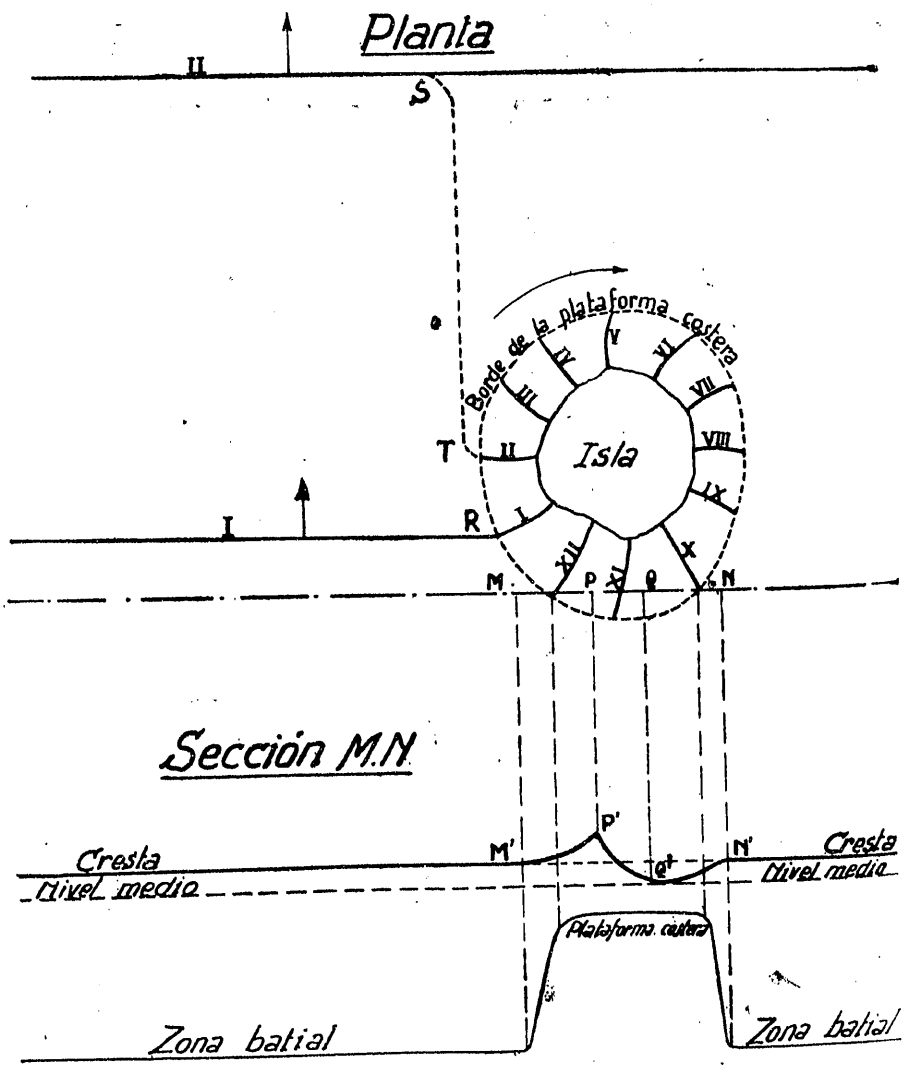


Fig. 7. — Isla núcleo de marea.

Aunque volveremos sobre todos estos interesantes casos particulares y sobre otros muchos, en sucesivos estudios locales, que efectuaremos con el detalle que no puede pedirse a este estudio general, baste por ahora hacer notar que en las tres zonas citadas de la Mancha, Canadá y Malvinas, en las que se observan las mayores mareas de la Tierra, concurren las circunstancias de elevada latitud, ancha

plataforma continental y concentración de energía, que, de acuerdo con las teorías expuestas, explican perfectamente las grandes alturas observadas.

Vamos a ocuparnos ahora del interesantísimo caso de la propagación de la onda de marea cuando ésta aborda a una isla de plataforma costera de amplio perímetro.

En la figura 7 hemos dibujado esquemáticamente y escalas arbitrarias, mucho mayor la de alturas de onda que la de profundidades, una isla que, únicamente para simplificar el dibujo, la hemos supuesto aproximadamente circular, pues su forma tiene, en realidad, poca importancia en relación con lo que vamos a explicar, siendo en cambio fundamental el que su plataforma costera tenga suficiente desarrollo y anchura.

Respecto a ésta, supondremos, para el dibujo de la figura 5, que es del orden de los 200 km., aunque como luego veremos, esto no es esencial, pues cabe que sea menor y el curioso fenómeno que vamos a explicar pueda también producirse.

Aunque tampoco es matemático, más importancia tiene que el desarrollo o perímetro de la plataforma costera, que rodea a la isla, se aproxime al necesario para que el tiempo requerido por su recorrido total, por la onda costera, se aproxime también al período de la onda oceánica que la origina.

Si la profundidad media de la plataforma costera se acerca a los cien metros indicados anteriormente y a los que, como hemos visto, corresponde una semilongitud de onda de unos 700 km., el perímetro de la isla deberá aproximarse a los 1.400 km. para que dicho sincronismo se pueda verificar en sus condiciones ideales, aunque no absolutamente necesarias.

Para hacernos una idea del proceso del interesante fenómeno, comencemos por observar qué es lo que le sucede a la onda que, en la figura 7, comienza a abordar, en la posición MN, la plataforma costera sumergida.

Antes del perfil MN, según la cresta de la onda que por conservar, en un principio, sus características oceánicas tendrá, dicha cresta, una pequeña pendiente, de tan poca importancia y hacia su izquierda, si estamos en el hemisferio Norte, que no es perceptible a la escala del dibujo.

A medida que la onda avanza sobre la plataforma costera y siempre que ésta tenga las dimensiones nenecesarias para que sea posible su sincronismo, acabará aquélla por adaptarse a las nuevas condiciones de propagación, correspondientes a las pequeñas profundidades de dicha plataforma, por lo que el valor de $A = \frac{2\,\omega\,\pi\,K \operatorname{sen}\lambda}{g\,T}$, en las exponenciales $h = h_2\ e^{-Ax}$ obtenidas anteriormente, aumentará mucho como consecuencia del gran aumento de K y el de las velocidades moleculares, resultantes de dichas pequeñas profundidades de propagación.

En cumplimiento de la admirable ley del mínimo trabajo, solamente se producirá este interesante y curioso fenómeno de la onda giratoria, alrededor de la isla, si es posible su sincronismo con la oceánica, pues de otro modo, la caótica agitación que se produciría por el desfasado encuentro de ambas ondas, producirían un gran consumo de energía, incompatible con dicha ley, si el simple paso de la onda oceánica, por ambos lados de la isla y sin producción de onda giratoria alguna, puede producirse con menor consumo de energía.

Como consecuencia de todo esto, y a partir de puntos tales como M' y N', en los que la presencia del bajo empieza a hacerse sentir, la cresta de la onda tomará la forma de las ramas $M'\,P'$ y $N'\,Q'$, debido a la acción de la fuerza centrífuga compuesta incrementada, como se ha expuesto, por la presencia de dicho bajo o plataforma costera y que, en nuestro hemisferio, siempre produce pendientes descendentes hacia la izquierda.

Se tiende, pues, a producir, siempre que dicho sincronismo sea posible, la discontinuidad o brusca rama $P'\,Q'$, de la cresta de la onda, cuya fuerte pendiente, no compensada por la fuerza centrífuga, contraria a ella, tiende a originar un transporte en masa de la onda hacia la derecha de la figura.

En estas condiciones aborda dicha onda a la costa de la isla, y como consecuencia de la elevación de la rama ascendente $M'\,P'$, producida por la fuerza centrífuga compuesta y el efecto dinámico explicado, aumenta mucho su altura en el lado izquierdo de la citada isla.

Por el contrario, en la rama descendente $N'\,Q'$, producida también por ambas causas centrífuga y dinámica, disminuye tanto la altura de la onda que prácticamente se anula y desaparece en las costas de este lado.

Tenemos así, en definitiva, una sola rama de onda prácticamente montada sobre la plataforma costera, a cuyas condiciones de propagación se adapta, reduciendo su celeridad de los 700 km./h. oceánicos a los 100 km./h. costeros.

Esto produce un enorme estirado y final rotura del tramo ST que une a ambas ondas, quedando la costera ceñida, por la intensa acción de la fuerza centrífuga compuesta, a la costa de la isla, alrededor de la cual gira, hacia la derecha en nuestro hemisferio, y hacia la izquierda, en el Sur.

En los salientes, cabos o extremos agudos de la isla, se produce la correspondiente expansión lateral de la onda, acentuada y adherida a la costa por la eficaz acción de la fuerza centrífuga compuesta, que tiende a apoyarla en aquélla y a hacerla girar a su alrededor.

En la figura 5 hemos dibujado, para la latitud de 45°, la exponencial correspondiente a la plataforma costera, que aún se hará más empinada, en la forma indicada de trazos, por la acción dinámica explicada, y si a esto se añade el estirado y rotura del tramo de enlace, se comprende que, aun cuando la anchura de la plataforma no sea excesiva, puede producirse la onda giratoria costera, siempre que el desarrollo de la costa de la isla pueda permitir el repetido sincronismo.

Obsérvese que, debido a la forma empinada de la onda costera, que ya la reduce en la citada figura a menor altura que su mitad en el borde la plataforma, así como al estirón y final rotura de su tramo de enlace con la onda oceánica, queda aquélla prácticamente circunscrita a la platoforma costera, en las proximidades de cuyo borde se anula, por lo que la profundidad media de su cuadrilátero de avance, cuya anchura práctica se reduce, lógicamente, a la zona en la que realmente hay onda, o sea a la de la plataforma, se aproximará mucho a la de dicha plataforma costera.

En estas que pudiéramos denominar islas núcleo de marea, alrededor de las cuales gira la onda costera, y aunque en la planta de la figura 7 parece que el enlace y consiguiente empujón, dado a la onda giratoria por la oceánica, se reduce a breves instantes próximo a la hora, que arbitrariamente hemos denominado *I* en dicha figura, y en la que ambas crestas de las ondas oceánicas y costera se unen en *R*, pues poco antes o poco después están ya muy distantes, es curioso observar que el mismo acuerdo que existe, en *R*, entre las dos crestas, existe también entre los dos senos un semiperíodo después, y, en una palabra, entre todas las fases idénticas de ambos movimientos, que debido a esto tienden aún más al sincronismo que las enlaza en *R*.

Es, permítasenos el símil, un admirable engranaje hidráulico ondulatorio verificado en la región *R*, entre la gran cremallera constituída por la onda oceánica que avanza, sólo por un lado de la isla, puesto que en el otro se anula, y la rueda dentada conducida, que constituye la onda giratoria.

Incluso en ciertas costas acentuadamente convexas de algunos continentes parece que se inicia algo parecido si la onda se concentra, por la acción de la fuerza centrífuga compuesta incrementada por la acción dinámica expuesta, sobre la plataforma continental, originando su correspondiente frenado como consecuencia de la reducción de sus profundidades de propagación.

Este efecto de frenado parece producirse en las costas occidentales de África, entre las horas V y II siguientes, en las costas del extremo Sur de América entre las horas VI y I y en otros lugares del Globo. Puede también cooperar, en este frenado, la gran curvatura en planta de dichas ondas.

Respecto al sincronismo a que nos hemos referido antes, tan ávidamente buscado siempre por la onda de marea, hemos de ampliar aquí lo que indicamos respecto al orden con que siempre tienden a producirse los movimientos del mar, pues tan admirable es el orden con que se mueven las moléculas líquidas al paso de una onda como el sincronismo de la propagación de la marea, producidos ambos en cumplimiento de la ley del mínimo trabajo, que, admirablemente también, rige a todos los fenómenos naturales.

Obsérvese a este respecto que, aunque el caso sea diferente en otros aspectos, incluso alrededor de las islas Británicas, cuyo desarrollo es excesivo para que pueda ser recorrido en un período por la onda costera, se verifica el sincronismo, en cierto modo, concurriendo las crestas de marea a la misma hora XI por ambos lados del paso de Calais.

Se evita así, con este sincronismo que se verifica siempre que las condiciones naturales no impongan forzosamente otra cosa, graves perturbaciones en los movimientos del líquido, con sus consiguientes aumentos de consumo de energía.

Debido a esto, y siempre dentro de ciertos límites, pueden producirse las interesantes ondas giratorías síncronas que nos ocupan, aun cuando el desarrollo de la costa de la isla difiera sensiblemente de los 1.400 km. antes indicados, pues si es algo menor, basta con que la onda giratoria se concentre más hacia la costa para que, prácticamente, la profundidad media en que se propaga, y consiguientemente su celeridad, disminuyan, haciendo posible el conveniente sincronismo.

Si las dimensiones de la isla núcleo de marea son mayores, puede suceder todo lo contrario, haciendo también posible, dentro de ciertos límites, el sincronismo.

Aparte de algunas más que probablemente existirán, estimamos que las islas núcleos más interesantes son Nueva Zelanda, Islandia, y las Feroe, cuyos desarrollos costeros aproximados, o mejor dicho, los de sus plataformas costeras, son respectivamente de unos 3 000 km., 1 500 km. y 600 km., o sea que, en los casos prácticos extremos, varían entre algo más del doble a poco menos de la mitad de los 1.400 km. anteriormente indicados como ideales para que el fenómeno se produzca y deducidos a base de valores medios, nada más que aproximados, lo que hace satisfactorio el resultado obtenido, que se aproxima al valor, también medio, de los casos observados.

Baste, para este estudio general, con los valores aproximados indicados, que afinaremos mejor en otros estudios detallados de numerosos casos particulares que, como hemos indicado repetidas veces, seguirán al presente, cuando podamos recopilar los datos precisos.

Es indudable que la tendencia a la formación de

las islas núcleo de marea ha de aumentar con la latitud que intensifica la acción de la fuerza centrífuga compuesta.

Debe hacerse resaltar que, en confirmación general de la teoría expuesta, absolutamente todas las ondas que giran alrededor de las islas núcleo de marea, lo hacen en el sentido dextrorsum en el hemisferio Norte y sinoxtrorsum en el Sur y también debe de hacerse notar, en confirmación de la decisiva influencia de la fuerza centrífuga compuesta, base principal de toda la citada teoría, que todas estas islas núcleo se encuentran en latitudes no muy bajas.

También la isla de Creta, en el Mediterráneo, en la que parece observarse el curioso fenómeno que nos ocupa, está situada en no demasiada baja latitud y tiene un desarrollo de unos 600 km. de plataforma costera. Es muy posible que Nueva Zembla y otras varias islas sean núcleos de marea.

No parece probable que, francamente por debajo o por encima de dichos límites prácticos, del orden de los 600 km. y 3.000 km. de perímetro de plataforma, se produzca este interesante fenómeno de la onda giratoria.

Creemos, como consecuencia de todo lo expuesto, en las islas núcleos de marea que son la antítesis de los puntos anfidrómicos, de cuya existencia real nos permitimos dudar por las razones que luego expondremos.

Cuando estudiemos diversos casos particulares, en futuras publicaciones, nos ocuparemos también del Mediterráneo, cuya marcha general del fenómeno y citada isla núcleo de Creta, así como la altura y sentido de propagación de las mareas en la zona poco profunda del Adriático, e incluso su supuesto punto anfidrómico, tan irreal como el del mar del Norte, del que más adelante nos ocuparemos con cierto detenimiento, confirman, como veremos una vez más, las teorías expuestas.

Otra comprobación de estas teorías la proporciona el hecho de que la situación, en las islas Salomón, y dirección de llegada de la protuberancia al rendir su recorrido, sensiblemente sinusoidal a través del Pacífico, explican perfectamente las mareas diurnas y semidiurnas de los mares del extremo Oriente y costas del Índico.

En efecto: el gran deflector constituído por Australia y las citadas situación y dirección de llegada de la protuberancia, hacen que, en el día de sicigia equinoccial supuesto, en el que la declinación del o de los astros perturbadores es nula, casi toda la protuberancia baje, apoyándose en las costas orientales de Australia, hacia el Sur, produciendo, en los mares situados entre dicho continente y Asia, dos débiles mareas, iguales y semidiurnas, correspondientes a las llegadas de las dos protuberancias diarias, de las que sólo una pequeña parte deriva hacia dichos mares.

En cambio, si la declinación del astro es grande, por ejemplo, Norte, la trayectoria, también sensiblemente sinusoidal del eje de la protuberancia por él producida, se desplazará también hacia el Norte, penetrando por encima de Australia y produciendo en dichos mares asiáticos una marea de apreciable altura. Medio día después llegará la protuberancia producida por el antiastro, pero desplazada hacia el Sur, por lo que no producirá apenas marea apreciable, en los repetidos mares asiáticos, en los que, como consecuencia lógica de dicha impulsión diaria, y de acuerdo con lo observado, se acentuará la marea diurna.

Por ahora y en este estudio general, concretado principalmente al día de la sicigia equinoccial supuesta, solamente indicaremos que es más que probable que, debido a la forma cóncava de las costas pacíficas de Centro América, la protuberancia originaria tienda, en su iniciación y como puede verse en el planisferio de la figura 4', a centrarse, más en relación con el eje de la, en cierto modo, simétrica concavidad de dichas costas, que con la trayectoria del o de los astros perturbadores, que en dicho día supuesto sería el Ecuador, con el que, como puede verse en la citada figura 4', no concurre el origen de la trayectoria, sensiblemente sinusoidal, de dicha protuberancia.

Como podremos concretar en futuros estudios, referentes a las grandes declinaciones, tales como las solsticiales, los citados desplazamientos de las trayectorias de la protuberancia son mucho menores que las variaciones de la declinación del astro perturbador, principalmente en el origen americano de dicha trayectoria, que, lógicamente, tiende siempre a centrarse en relación a la citada concavidad, aun en el caso de que la atracción del astro se descentre algo, como consecuencia de su declinación.