

La marcha de la onda de marea en la costa norte de Chile

POR

DOMINGO CASANOVA O.

Segun la concepcion moderna de la constitucion del universo, los átomos del éter, al vibrar incesantemente, chocan contra las moléculas de los cuerpos, empujándolas unas hácia otras en conformidad a la lei de Newton, es decir, en razon directa de las masas e inversa del cuadrado de las distancias.

De todos los cuerpos celestes, la Luna i el Sol son los que por su proximidad a la Tierra o por su masa, le sirven de pantalla contra el mayor número de impactos del éter, quedando así sin equilibrar los impactos correspondientes que la Tierra recibe por el lado opuesto a las posiciones que los mencionados astros ocupan en el espacio, los cuales ejercen así una influencia preponderante sobre las porciones líquidas de la Tierra, en las que, por su poca cohesion, provocan oscilaciones que han recibido el nombre de mareas.

Si las moléculas de los mares obedecieran inmediatamente a los impactos del éter, las pleamares en un punto dado deberian observarse al mismo tiempo que pasan las pantallas, o sea la Luna i el Sol, por el meridiano de dicho punto. En realidad, las pleamares se verifican, por lo jeneral, con cierto atraso, variable de un puerto a otro.

Se ha convenido en llamar *establecimiento del puerto* a la hora en que se observa la pleamar que sigue al novilunio o paso simultáneo de ambas pantallas por el meridiano de un punto de la Tierra en la época de los equinoccios, es decir, cuando la Luna i el Sol se encuentran en el Ecuador i a la distancia media de la Tierra.

En algunos puntos de la costa de Chile esta definicion no puede aplicarse, por cuanto la pleamar máxima no se verifica siempre al dia siguiente del novilunio. Esta anomalía se ha observado en los puertos de Iquique, Constitucion i Valdivia, en los cuales la pleamar máxima se ha notado a veces el dia mismo del novilunio, i a veces el dia anterior.

La comparacion entre las horas del establecimiento del puerto de diversos puntos de una costa permite constatar el avance de la onda de marea, i el sentido de su progresion.

Las horas que diversos autores asignan al establecimiento del puerto de varios puntos de la costa de Chile discrepan a veces considerablemente, lo que indica que algunas de las cifras son erróneas. El cuadro siguiente contiene una corta lista de puertos en los cuales las diferencias son tan manifiestas, que reclaman una nueva determinacion de sus establecimientos del puerto.

PUERTOS	E. DEL P. SEGUN C. J. DE CORDEMOY (1)	E. DEL P. SEGUN J. F. CHAIGNEAU (2)	DIFERENCIAS
Arica.....	VIII, 50	VII, 59	0 ^h 51'
Mejillones.....	X	IX, 45	0 15
Caldera.....	VIII, 30	X	1 30
Huasco.....	VIII, 30	VIII, 50	0 20
Coquimbo.....	IX, 15	IX	0 15

Aceptando como exactas las horas que da el señor de Cordemoy, se tiene la lista siguiente, en la que he rectificado las latitudes:

Puertos	Latitudes	Horas
Caldera (3).....	27° 4'	VIII, 30
Huasco.....	28 27	VIII, 30
Coquimbo.....	29 57	IX, 15
Valparaíso.....	33 2	IX, 32
Constitucion.....	35 20	X, 10
Talcahuano.....	36 42	X, 15
Lebu.....	37 37	X, 30 (Chaigneau)
Corral.....	39 53	X, 35

Se ve que la onda de marea parece marchar de Norte a Sur en la rejion central de la costa de Chile.

(1) *Estudio relativo a los puertos de Constitucion i Corral*, páj. 10 i lámina I.

(2) *Instrucciones náuticas de la costa de Chile*, 1.^a parte, pájs. 10, 11 i 12.

(3) El señor de Cordemoy lo llama Copiapó.

En otras rejiones se observan anomalías que han llamado la atención de los especialistas.

El señor de Cordemoy, en su obra titulada *Ports Maritimes*, vol. I, páj. 87 dice al respecto:

«Las anomalías que existen en los establecimientos de puertos mui próximos, se esplican a veces mui fácilmente.

La carta anexa, de una porcion de la costa de Chile, indica una anomalía notable (fig. 1).

«La onda de marea, que se forma en las rejiones ecuatoriales i se dirige hácia el polo Sur, pasa por Callao (Perú) a las VI horas. Llega, despues, a Islay: VIII,50; a Pabellon de Pica: IX,10; a Cobija: IX,54 i a Mejillones del Sur: a las X horas.

«Allí la onda parece detenerse. Mas al Sur, en Caldera, el establecimiento es VIII,30, como hácia el Norte de Islay. Si se remonta hácia el Norte, se encuentra: Flamenco: IX,10, Pan de Azúcar: IX,20.

«Al Sur de Caldera, la onda vuelve a seguir la marcha hácia el Sur. A Huasco llega a las VIII,50; a Coquimbo a las IX,15; a Valparaíso a las IX,32.

«Estos fenómenos se esplican fácilmente: 1.º por la forma de la costa; 2.º por las profundidades del mar cerca de la costa.

«Por una parte, una derivacion de la onda de marea se dirige directamenté desde Callao a Caldera, por las grandes profundidades (flecha 1). Llega a Caldera a las VIII,30.

«Otra rama pasa a lo largo de la costa (flecha 2), segun Islay, Arica, Cobija, Mejillones, por profundidades mucho ménos considerables. Llega a Mejillones a las X horas.

«Pero entónces el nivel está mucho mas alto en Caldera a las VIII,30, que en Mejillones, donde aun falta mucho para la pleamar. Se producirá, en consecuencia, de Caldera hácia Mejillones una onda representada por la flecha 3.

«La onda, desde Callao a Caldera recorre 2 000 kilómetros en dos horas i media, es decir a una velocidad de 220 m por segundo.

«La fórmula

$$v = \sqrt{gH}$$

indica que las profundidades por donde pasa deben ser de 5 000 m, término medio.

«La onda desde Callao a Mejillones del Sur, recorre 1 700 kilómetros en cuatro horas, a una velocidad de 120 m por segundo. Las profundidades por donde pasa deben ser de 1 500 en promedio.

«Estas cifras son justamente las que ha sondeado el navío Relay, de la flota inglesa.

«Si estas consideraciones tuvieran necesidad de otra sancion se observará que el encuentro en Mejillones del Sur, de las dos ondas derivadas, de sentido inverso, debe producir la anulacion de las corrientes de marea en los alrededores de este puerto.

«Esto es, en efecto, lo que se constata».

Dada la autoridad i prestigio de que, a justo título, goza el señor de Cordemoy, como especialista en materia de trabajos marítimos, sus opiniones tienen un peso considerable, por lo cual, si me voi a permitir contradecirle, es con el temor natural del que emprende una lucha contra un titán. Valga como disculpa de mi atrevimiento el buen deseo de aclarar la verdad.

El señor de Cordemoy, basa su esplicacion de la anomalía que presenta la marcha de la onda de marea en el norte de Chile, nó en dos causales, como él dice, sino en tres: 1.^a porque la onda-marea que se forma en las rejiones ecuatoriales, se dirige hácia el polo Sur, i pasa de Callao a Islay, Pabellon de Pica, Cobija etc.; 2.^a por la forma de la costa i 3.^a por las profundidades del mar cerca de la costa.

Examinémos cada una de estas causales:

1.^a El señor de Cordemoy parte de la conocida nocion de que la marea se forma en las rejiones ecuatoriales de los grandes mares i hace una primera suposicion al sentar que la onda que se produce frente al Perú, se dirige hácia el Sur de Callao, a Islay, Pabellon de Pica etc. En seguida, hace una segunda suposicion al decir que la onda se divide en dos ramales, uno de los cuales pasa directamente de Callao a Caldera, i el otro, siguiendo la inflexion de la costa, pasa de Callao a Mejillones.

Ambas suposiciones son, a mi juicio, erróneas. Para probarlo, basta observar que el rumbo que desde Callao va a Caldera, coincide casi exactamente con el que va a Mejillones. En el trayecto de Callao a Islay, sobre todo, la coincidencia es manifiesta, lo que quiere decir que la onda-marea, en un punto próximo a Islay, aun no se ha subdividido. Entónces, si en lugar de comparar las horas del establecimiento del puerto de Callao i de Caldera, para obtener una diferencia de dos horas i media i una velocidad de traslacion de 220 metros por segundo, comparamos las horas del establecimiento del puerto entre Caldera i un punto mas al norte i próximo a Islay se ve que la diferencia de las horas resulta ser nula, de donde se llegaría a deducir que la velocidad de traslacion de la onda de marea seria infinita, como tambien las profundidades entre dichos puntos; deducciones absurdas que prueban el error cometido por el señor de Cordemoy.

2.^a En cuanto a la influencia de la forma de la costa entre Callao i Caldera, el señor de Cordemoy, la abulta al dibujar la flecha número 1 desviada hácia alta mar en el extremo que enfrenta a Caldera. Obtiene así una diverjencia notable entre las dos ramas en que supone dividida la onda de marea, diverjencia que si se hace un trazado exacto sobre el mapa, resulta, como hemos dicho mas atras, casi nula.

3.^a Por lo que respecta a las profundidades, si se mira la carta correspondiente a la América del Sur en el Atlas de Stiellers, se ve que las profundidades superiores a 6 000 metros se encuentran muy cerca de la costa, frente a Islay, i desde Pisagua hasta Valparaíso, no existiendo mar afuera sino honduras de cuatro a cinco mil metros, o sea lo contrario de lo que asegura el señor de Cordemoy.

A los sondeos del buque «Relay» (*Anuario Hidrográfico*, año 17, páj. 464), en los que se basa el señor de Cordemoy, contrápongo los sondeos del buque hidrógrafo

«Egeria» (*Anuario Hidrográfico*, año 22, pág. 496). El «Egeria» principió por medir tres profundidades casi un grado mas al poniente que las del «Relay», entre Totoral Bajo i un punto poco mas al Norte del paralelo de Caldera, i encontró:

	4 168 m	4 001 m	4 073 m
contra	3 848	5 840	6 864

Frente a Chañaral, algunos minutos al poniente del grado 72 O. de Gr., tomó una cuarta profundidad que resultó de 4 323 metros. Entónces el comandante del «Egeria» debe haber dudado de la exactitud de las cifras del «Relay» i mediante un zig-zag, fué a situar su buque casi en el mismo punto donde el «Relay» habia encontrado 7 504 m ($26^{\circ}31' S$ i $71^{\circ}36'30'' O$) i midió 7 461 m ($26^{\circ}30'54'' S$ i $71^{\circ}36' O$). Convencido de la existencia de esas grandes profundidades, siguió sondeando hácia el Norte i mas al poniente que el «Relay», i encontró siempre honduras menores. Frente a Pisagua las dos derrotas se cruzan, siendo entónces las cifras del «Egeria» las que marcan mayores profundidades, a pesar de ir mas a la costa.

Luego la esplicacion que da el señor de Cordemoy no es satisfactoria.

A nuestro juicio, el error que ha cometido el señor de Cordemoy proviene principalmente de haber aceptado la marcha de Norte a Sur para la onda de marea. Mas atras hemos dicho que el exámen de la lista de los establecimientos del puerto de la rejion central de Chile *parece* indicar que la onda de marea avanza de Norte a Sur. En realidad la onda marcha casi exactamente del Poniente al Oriente. Para probarlo nos bastará recordar que si se acepta la marcha de Norte a Sur de la onda-marea, se llega a la conclusion absurda de que la velocidad de traslacion i las profundidades son infinitas entre Caldera i un punto próximo al Norte de Islay. Aceptando la marcha del Poniente hácia el Oriente esos absurdos desaparecen, ya que en ámbos puntos se estaria en presencia de los dos extremos de la cresta de una misma onda de marea. El avance aparente de Norte a Sur, hasta Mejillones, del extremo norte de la cresta de la onda, por una parte, i el avance aparente de Sur a Norte del extremo Sur hasta el mencionado puerto, por la otra, se explica naturalmente si admitimos que la onda de marea experimenta un atraso frente a Mejillones (por las resistencias del fondo), afectando una forma curva que presenta su concavidad hácia el Este. La esplicacion de las anomalías en las horas del establecimiento del puerto que ha señalado el señor de Cordemoy, se hace así sin recurrir a la bifurcacion de la onda de marea en un mismo trayecto.

En la figura 2 hemos tratado de representar la forma aproximada de las crestas de las ondas de marea que ocasionan los establecimientos del puerto entre las VIII,30 i las X,30, o sea las líneas *cotidales*, o *isorraquias*, como se les ha denominado, en la rejion del norte i del centro de la costa de Chile. Es un bosquejo muy imperfecto a pesar de lo cual puede servir para indicar cuáles puertos necesitan que se observe nuevamente la hora del establecimiento, ya para obtener una rectificacion

de las horas que no se encuadran con el trazado de las líneas cotidales, ya para obtener su confirmacion como anomalías, cuya esplicacion satisfactoria habria que buscar (1).

Así para Iquique, por ejemplo, los marinos dan como establecimiento del puerto las VIII,45, cifra que no encuadra bien si al Norte se tiene las VIII,50 para Arica, i al Sur las IX,10 para Pabellon de Pica. Parece que por este motivo el señor de Cordemoy no la toma en cuenta en sus listas.

No poseemos series estensas de observaciones de mareas practicadas durante varios novilunios de equinoccio para poder efectuar una rectificacion concienzuda; pero valiéndonos de las observaciones hechas por los que fuimos ingenieros ayudantes del mencionado especialista, durante el novilunio del 10 de Setiembre de 1893 i el plenilunio del 25 del mismo mes, cuyo detalle se encuentra en los cuadros anexos, hemos formado las curvas de las pleamares máximas de los dias 12 i 25 de dicho mes, segun se puede ver en la fig. 3. Las curvas se han trazado siguiendo en lo posible los rumbos jenerales que señalan las líneas quebradas que arrojan las observaciones practicadas. Aceptando esas curvas como representacion media del cambio de nivel que las mareas respectivas tendieron a seguir, tenemos que el establecimiento del puerto fué a las IX,40 el dia 12 i a las VIII,30 el dia 25 (2). Esta discrepancia prueba que se necesita un mayor número de observaciones para precisar la hora en cuestion.

Como los observadores, los relojes, la regla de marea etc. fueron los mismos para las dos series en que estamos fundando la presente rectificacion, nos vemos obligados a acordarles igual peso, de modo que consideraremos al promedio de las horas obtenidas como el establecimiento del puerto para Iquique, hasta conseguir mejores observaciones.

Ese promedio es IX,5, cifra que guarda armonía con las que hemos aceptado mas atras para Arica i Pabellon de Pica.

El presente ensayo de trazado de las líneas cotidales de la costa de Chile debió abarcar tambien la zona austral, que es la mas interesante; pero por falta de datos suficientes nos vemos obligados a dejarla para una publicacion posterior.

(1) Si se confirman los establecimientos del puerto que da el *Anuario Hidrográfico*, año VII, pájs. 167 i 169, para las islas de San Félix (IX,40) i de Juan Fernandez (IX,30) seria necesario variar el trazado de las líneas cotidales.

(2) El mismo dia del plenilunio. La pleamar del 26 fué inferior segun las observaciones.

ANEXO

Observaciones practicadas en Iquique durante el equinoccio de Setiembre de 1893

MAREA DE SIZIJIA DEL 11 DE SETIEMBRE DE 1893

Horas	Alturas	Horas	Alturas	Horas	Alturas	Horas	Alturas	Horas	Alturas	Horas	Alturas
Set. 11 1893		4,30	1,00	9,40	2,10	12,20	1,70	3,40	1,05	8,10	1,85
h. P. M.	metros	40	1,00	50	2,13	30	1,60	50	1,05	20	1,95
1,45	1,25	50	1,05	10,00	2,05	40	1,60	4,00	1,10	30	2,00
1,55	1,30	5,00	1,10	10	2,02	50	1,55	10	1,10	40	2,10
2,05	1,15	10	1,10	20	2,02	1,00	1,47	20	1,10	50	2,05
15	1,10	20	1,15	30	2,00	10	1,42	30	1,20	9,00	2,10
25	1,10	30	1,15	40	1,95	20	1,40	40	1,15	10	2,10
35	1,05	40	1,20	50	1,95	30	1,37	50	1,20	20	2,10
45	1,00	50	1,25	11,00	1,95	.....	.....	5,00	1,25	30	2,10
55	1,00	6,00	1,30	10	1,92	2,10	1,30	10	1,25	40	2,20
3,10	1,00	6,10	1,35	20	1,92	20	1,25	20	1,30	50	2,15
20	0,95	.....	.....	30	1,90	30	1,20	30	1,35	10,00	2,15
30	0,95	8,40	1,95	40	1,87	40	1,15	40	1,35	.....	.....
40	1,00	50	2,00	50	1,80	50	1,10	50	1,40	P. M.	metros
50	0,95	9,00	2,07	12,00	1,77	3,00	1,05	6,00	1,45	1,00	1,60
4 00	1,00	10	2,05	Setbre. 12		10	1,10	.....	.....	10	1,55
10	1,00	20	2,07	h. A. M.	metros	20	1,05	7,45	1,90	20	1,50
20	1,00	30	2,15	12,10	1,72	30	1,05	8,00	1,85	30	1,50

Horas	Alturas	Horas	Alturas	Horas	Alturas	Horas	Alturas	Horas	Alturas	Horas	Alturas
1,40	1,45	3,30	1,10	5,20	1,15	9,40	1,95	11,30	1,95	4,40	1,15
1,50	1,40	40	1,10	.....	.....	50	2,00	Setbre. 13		50	1,20
2,00	1,35	50	1,10	8,10	1,75	10,00	2,00	h. A. M.	metros	5,00	1,20
10	1,35	4,00	1,10	20	1,80	10	2,00	3,20	1,40	10	1,20
20	1,30	10	1,10	30	1,85	20	2,05	30	1,30	20	1,25
30	1,30	20	1,10	40	1,85	30	2,05	40	1,25	30	1,25
40	1,25	30	1,10	50	1,90	40	2,00	50	1,25	40	1,25
50	1,20	40	1,10	9,00	1,85	50	2,00	4,00	1,25	6,00	1,35
3,00	1,15	50	1,10	10	1,95	11,00	2,00	10	1,25	10	1,35
10	1,10	5,00	1,10	20	1,95	10	1,95	20	1,20	20	1,40
20	1,10	10	1,10	30	2,00	20	1,95	30	1,20		

MAREA DE SIZIJA DEL 25 DE SETIEMBRE DE 1893

23	1893	9,00	1,92	1,15	1,18	3,45	1,38	.....	.....	9,45	1,60
A. M.	metros	15	1,90	30	1,15	4,00	1,40	7,30	1,80	10,00	1,50
7,00	2,10	30	1,88	45	1,15	15	1,45	45	1,80	15	1,50
15	2,12	45	1,80	2,00	1,15	30	1,53	8,00	1,80	30	1,47
30	2,15	10,00	1,75	15	1,20	45	1,58	115	1,80	45	1,40
45	2,17	15	1,70	30	1,23	5,00	1,63	30	1,75	11,00	1,40
8,00	2,10	30	1,65	45	1,25	15	1,70	45	1,70	15	1,35
15	2,08	.....	.....	3,00	1,33	30	1,78	9,00	1,75	30	1,30
30	2,00	h. P. M.	metros	15	1,33	45	1,75	15	1,65	45	1,27
45	1,95	1,00	1,23	30	1,35	6,00	1,80	30	1,60	12,00	1,25

Horas	Alturas	Horas	Alturas	Horas	Alturas	Horas	Alturas	Horas	Alturas	Horas	Alturas
Setbre. 24		5,30	1,95	h. P. M.	metros	6,15	1,75	Setbre. 25		5,45	1,80
h. A. M.	metros	45	1,98	12,15	1,35	30	1,80	h. A. M.	metros	6,00	1,90
12,15	1,20	6,00	2,00	30	1,30	45	1,85	12,15	1,30	15	1,90
30	1,20	15	2,10	45	1,25	7,00	1,88	30	1,30	30	1,95
45	1,20	30	2,15	1,00	1,25	15	1,93	45	1,25	45	1,95
1,00	1,15	45	2,15	15	1,20	30	1,95	1,00	1,20	7,00	2,00
15	1,25	7,00	2,15	30	1,20	45	1,95	15	1,10	15	2,08
30	1,28	15	2,20	45	1,25	8,00	2,00	30	1,10	30	2,10
45	1,28	30	2,20	2,00	1,15	15	1,95	45	1,10	45	2,13
2,00	1,33	45	2,20	15	1,15	30	2,00	2,00	1,15	55	2,20
15	1,35	8,00	2,20	30	1,15	45	1,95	15	1,20	8,05	2,20
30	1,38	15	2,20	45	1,15	9,00	1,90	30	1,20	15	2,25
45	1,40	30	2,10	3,00	1,20	15	1,90	45	1,25	25	2,18
3,00	1,48	45	2,15	15	1,20	30	1,85	3,00	1,25	35	2,15
15	1,50	9,00	2,05	30	1,20	45	1,80	15	1,25	45	2,15
30	1,53	15	2,00	45	1,20	10,00	1,75	30	1,30	55	2,13
45	1,58	30	2,00	4,00	1,30	15	1,75	45	1,30	9,05	2,13
4,00	1,63	45	1,95	15	1,30	30	1,65	4,00	1,35	15	2,10
15	1,68	10,00	1,95	30	1,30	45	1,70	15	1,40	30	2,10
30	1,73	15	1,80	5,00	1,35	11,00	1,65	30	1,45	45	2,05
45	1,80	30	1,70	15	1,50	15	1,60	45	1,50	10,00	1,98
5,00	1,80	45	1,75	30	1,55	30	1,55	5,00	1,65	15	1,90
15	1,88			45	1,65	45	1,55	15	1,65	30	1,88
				6,00	1,72	12,00	1,40	30	1,75	45	1,83

Horas	Alturas										
11,00	1,78	1,40	1,15	2,30	1,05	3,20	1,23	4,30	1,33	5,15	1,45
15	1,73	50	1,15	40	1,15	30	1,25	4,45	1,35	30	1,52
.....	2,00	1,13	50	1,15	45	1,25	5,00	1,38		
P. M.	metros	10	1,10	3,00	1,15	4,00	1,28				
1,30	1,18	20	1,05	10	1,20	15	1,28				

DOMINGO CASANOVA O.