

Introducción.

Los pescadores, y habitantes de pueblos costeros saben que durante la Luna llena las mareas son mucho mayores que cuando la Luna está en cuarto. Esta relación entre las mareas y la Luna ya fue señalada por Posidonio de Apamea. En la Edad Moderna, algunos científicos propusieron diversas teorías para explicar el origen de las mareas. El caso de Galileo es notable pensaba que su teoría era un argumento definitivo en favor del sistema heliocéntrico. Su teoría no sólo era falsa: era incompatible con su principio de relatividad. Galileo supone que el flujo y reflujo de las aguas del mar en un punto de la Tierra es un movimiento inercial debido a la aceleración y desaceleración del movimiento de dicho punto, análogo al movimiento de vaivén del agua en un recipiente que no se mueve con velocidad constante. Supongamos el sistema Tierra-Sol, donde la Tierra se mueve alrededor del Sol y alrededor de su propio eje. Supondremos que durante un corto intervalo de tiempo podemos aproximar el arco de la circunferencia a una línea recta. Entonces, la velocidad del punto A es la velocidad del movimiento de traslación más la velocidad de rotación, mientras que la velocidad del punto B es la de traslación menos la de rotación. Así, de A a B el agua se desacelera y su propia inercia da lugar a las mareas. Esto es falso, porque sabemos que las leyes de la física en un sistema en movimiento son independientes de que este sistema se traslade como un todo con movimiento uniforme. Además, la teoría de Galileo no explicaba la relación con la Luna ni muchos fenómenos observados: según esta teoría, en cada punto de la Tierra sólo habría un movimiento de flujo y reflujo cada día; por otra parte, la pleamar en la costa oriental de un mar debía coincidir con la bajamar en la costa occidental (al mover una palangana con agua, Esta sube en un extremo al mismo tiempo que desciende en el otro). Pero ya el naturalista JOSÉ DE ACOSTA había observado que el flujo y reflujo tenía lugar aproximadamente al mismo tiempo en las costas de Florida que en las de España.

La explicación correcta la formuló una vez más Newton en sus Principios Matemáticos de la Filosofía Natural, y su origen está en las fuerzas de atracción gravitatoria, aunque esta vez es el valor absoluto del campo en un punto y de como varía al pasar de un punto o otro muy próximo.

Definición de marea.

Marea, ascenso y descenso periódicos de todas las aguas oceánicas, incluyendo las del mar abierto, los golfos y las bahías, resultado de la atracción gravitatoria de la Luna y del Sol sobre el agua y la propia Tierra.

Mareas lunares.

La Luna, al estar mucho más cerca de la Tierra que el Sol, es la causa principal de las mareas.

Tierra y Luna forman un sistema que se mantiene unido por efecto de la fuerza gravitatoria. Este sistema gira en torno a un centro común separado del centro de la Tierra igual a las 3/4 partes del radio de esta.

Centro de la Tierra

Centro de Rotación

Todo observador situado en el sistema Tierra-Luna experimenta una fuerza que le empuja hacia afuera. Cuanto más lejos esté del centro tanto mayor será la fuerza. También experimenta una fuerza de atracción de la Luna que será mayor cuanto más cerca de ésta se encuentre. Para determinar la resultante se combinan la fuerza centrífuga + la gravitatoria. Así podemos ver que en el centro de la Tierra la fuerza resultante es nula porque la gravitatoria se contrarresta con la centrífuga.

Fuerza Centrífuga

En las regiones oceánicas que se encuentran a la misma distancia de la Luna que del centro de la Tierra se encuentran en equilibrio, no experimentando las fuerzas de la marea. Las que se encuentran situadas en la cara de la Tierra orientada a la Luna, la resultante neta de las fuerzas hace que se acerquen al satélite, por lo que se encuentran en pleamar. Lo mismo ocurre con las regiones situadas en la cara opuesta de la Tierra, cuya fuerza final hace que se alejen del satélite haciendo que se encuentre esa región también en pleamar.

Fuerza

Centrífuga Gravitacional Combinada

J

Punto A

(opuesto a la luna)

Punto B

(centro de la Tierra) CERO

Punto C

(cara próxima a la luna)

A B C

El campo gravitatorio creado por la Luna en el punto B es:

$$G(B) = G_{ML} / r_B^2 * \mathbf{u}_r$$

donde $\mathbf{u}_r$ es el vector unitario de la dirección de la Luna. Por otra parte, en los puntos A y C el campo es:

$$G(A) = G_{ML} / (r_B + R_T)^2 * \mathbf{u}_r = (1 - 2R_T/r_B) * G(B)$$

$$\text{y en el pto. C} = (1 + 2R_T/r_B) * G(B)$$

Si imaginamos 2 puntos situados en los polos de la Tierra (tales como D y E), en esos puntos el campo tendrá una componente paralela a $\mathbf{u}_r$, y una componente dirigida hacia B (contraria en D y E) con valor:

$$G_{vert}(D) = (G_{ML} / r_B^2 + R_T^2) * [R_T / (r_B^2 + R_T^2)^{1/2}] = (R_T / r_B) G(B)$$

con lo que

$$G_D - G_E = - 2R_T / r_B * G(B) * \mathbf{u}_{BC}$$

donde $\mathbf{u}_{BC}$ es un vector en la dirección BC. La variación del campo a lo largo del diámetro tiende a comprimirlo.

Si la velocidad de rotación de la Tierra fuera igual a la velocidad angular orbital de la Luna, la Tierra permanecería deformada con el diámetro AC estirado y el DE comprimido, teniendo siempre una marea estática con una deformación máxima de las aguas de 50 cm. Pero esta velocidad de la Tierra es 27,3 veces mayor a la orbital de la Luna, puesto que es la duración del mes lunar en días sidéreos.

Un sencillo cálculo para estimar que las variaciones en los diferentes puntos de la Tierra de la intensidad del campo gravitatorio creado por el Sol son, aunque menores, del mismo orden de magnitud que las variaciones del campo lunar. Por lo tanto, también el Sol provoca mareas apreciables en la Tierra. Cuando el Sol y la Luna están alineados con la Tierra, es decir, en la Luna nueva y en la Luna llena, sus efectos se suman mientras que en los cuartos las fuerzas de marea solares y las lunares actúan en direcciones perpendiculares y sus efectos se cancelan parcialmente.

Es evidente que los fenómenos de marea se darán también donde quiera que haya dos cuerpos de gran intensidad lo suficientemente próximos. Supongamos un satélite que orbitara a muy poca distancia de un planeta y, por consiguiente, la fuerza de atracción que ejerce el planeta varía apreciablemente a lo largo de un diámetro del satélite dirigido hacia el planeta vecino esto dará lugar a una deformación en la dirección de este diámetro. Pero, además, al ser diferentes las aceleraciones radiales inducidas por estas fuerzas, los puntos más próximos al planeta tenderán a llevar una velocidad orbital mayor que la de los más alejados (Tercera Ley de Kepler) lo que dará lugar también a tensiones de cizalla en el interior del satélite. Si las deformaciones inducidas por estas tensiones internas, tanto radiales como de cizalla, superan el límite de deformación plástica el satélite se romperá. Se puede demostrar que cualquier satélite que orbite en torno a un planeta de su misma densidad y a una distancia menor que 2.44 veces el radio del planeta acabará deshaciéndose. (Este límite fue establecido teóricamente por E. ROCHE en 1849). Por ejemplo, los anillos de Saturno están situados dentro del límite de Roche por lo que no pueden ser anillos rígidos.

Mareas solares.

Asimismo, el Sol provoca el ascenso de dos crestas de onda opuestas, pero como el Sol está lejos de la Tierra, su fuerza para crear mareas es un 46% menor que la Luna. El resultado de la suma de las fuerzas ejercidas por la Luna y el Sol es una onda compuesta por dos crestas, cuya posición depende de las posiciones relativas del Sol y de la Luna en un instante dado. Durante los periodos de Luna nueva y llena, cuando el Sol, la Luna y la Tierra están alineadas, las ondas solar y lunar coinciden. Resulta un estado conocido como mareas de primavera; en ellas las mareas altas ascienden más y las mareas bajas descienden más de lo habitual. Cuando la Luna está en el primer o tercer cuadrante, el Sol forma un ángulo recto con respecto a la Tierra y las ondas quedan sometidas a fuerzas opuestas del Sol y de la Luna. Este estado es el de marea muerta: la marea alta es más baja y la baja más alta de lo normal. Las mareas de primavera y muerta se producen 60 h después de las fases correspondientes de la Luna; este periodo se llama edad de la marea o de la fase de desigualdad. El intervalo entre el instante en que la Luna cruza un meridiano en un punto y cuando la siguiente marea alta llega a ese punto se llama intervalo Luna-marea, o de marea alta. El intervalo de marea baja es el periodo entre el instante en que la Luna cruza un meridiano y cuando llega la siguiente marea baja. Los valores medios entre los intervalos Luna-marea durante los periodos de Luna nueva y llena se conocen como establecimiento de puerto. Los valores de los intervalos durante otros periodos del mes se denominan, a veces, establecimientos corregidos.

Corrientes y olas de marea.

Junto al ascenso y descenso vertical de agua, hay varios movimientos horizontales o laterales llamados comúnmente corrientes de marea, muy diferentes de las corrientes oceánicas normales. En zonas cerradas, una corriente de marea fluye durante unas 6 h y 12 min aguas arriba, o hacia la costa, en correspondencia con la marea alta; después se invierte y fluye, durante casi el mismo tiempo, en dirección contraria, y se corresponde con la marea baja. Durante el periodo de inversión, el agua se caracteriza por un estado de inmovilidad, o calma, llamado repunte de la marea. Una corriente que fluye hacia la costa se califica como de avenida; y la que se aleja de la misma, refluo.

A veces, en mar abierto, olas marinas gigantes, llamadas tsunamis u olas de marea, se precipitan sobre las costas circundantes con una fuerza tremenda, causando considerables daños humanos y materiales. Estas olas no se producen por fenómenos naturales de marea, sino por terremotos, erupciones volcánicas oceánicas o

perturbaciones atmosféricas intensas.

Otro fenómeno relacionado es el seiche, que suele producirse en mares rodeados de tierra o en lagos, como la bahía de San Francisco en California y el lago Léman en Ginebra (Suiza). Se observa que la superficie del agua oscila desde unos pocos centímetros hasta varios metros; esto es debido a las variaciones locales de presión atmosférica junto a vientos fuertes, pero a veces por sacudidas sísmicas lejanas. El movimiento del agua se produce en olas largas y puede durar entre unos pocos minutos hasta varias horas.

Periodicidad.

Las mareas alta y baja se alternan en un ciclo continuo. Las variaciones producidas de forma natural entre los niveles de marea alta y baja se denominan amplitud de la marea. En la mayoría de las costas del mundo se producen dos mareas altas y dos bajas cada día lunar, siendo la duración media de un día lunar 24 h, 50 min y 28 s. Una de las mareas altas está provocada por la cresta de marea directa y la otra por la cresta de marea opuesta. En general, dos mareas altas o bajas sucesivas tienen casi la misma altura. Sin embargo, en algunos lugares fuera del océano Atlántico estas alturas varían de forma considerable; este fenómeno, conocido como desigualdad diurna, todavía no se comprende bien en la actualidad.

Consecuencias de las mareas.

Las mareas tienen una consecuencia notable en el sistema Tierra-Luna. Las contracciones y dilataciones de la corteza disipan una gran cantidad de energía que se roba a la energía cinética de rotación. La velocidad angular de la Luna en torno a la Tierra es mucho menor que la velocidad de rotación de la Tierra, la Luna tiende a "anclar" en su dirección el abultamiento de las aguas mientras que la corteza sigue girando, así en el fondo de los mares se produce una gran fricción que disipa energía y frena el movimiento de rotación de la Tierra. Este frenado se ha podido medir directamente gracias a los relojes atómicos. También ha podido medirse el efecto acumulativo de este frenado a lo largo de los siglos a partir de testimonios históricos. Algunas fuentes históricas nos hablan de eclipses que se veían en ciertas regiones. Pero se supone que si la rotación terrestre no ha variado, tales eclipses hubieran podido ser vistos en regiones diferentes. Comparando estas diferencias se puede determinar el retraso acumulado desde entonces. Si el momento angular de rotación de la Tierra disminuye, debido a las mareas, el momento angular orbital tendrá que aumentar para que la suma de ambos permanezca constante. El equilibrio se alcanzará cuando la Luna haga una revolución en torno a la Tierra en el mismo tiempo que la Tierra emplee en hacer un giro sobre su propio eje. En esta situación la Luna estaría siempre sobre el mismo meridiano terrestre, es decir, la Tierra siempre mostraría la misma cara a la Luna. Los cálculos muestran que esta distancia de equilibrio es unas dos veces la distancia actual.

La distancia Tierra-Luna puede medirse con gran precisión por métodos ópticos reflejando un rayo láser en un espejo colocado en la superficie lunar por la misión Apollo. Mediante estas medidas ha podido estimarse que esta distancia aumenta actualmente en unos 3 centímetros por año. Teniendo en cuenta este ritmo de variación se necesitaría un tiempo del orden de 10 a 100 años (es decir, del orden de la edad estimada del Universo) para llegar a la situación de equilibrio.

Mareas terrestres y atmosféricas

Las mareas terrestres se dan por las fuerzas de marea ejercidas por el Sol y la Luna, debido a que, la corteza es delgada y flexible, sufriendo en la superficie sólida de la Tierra, un incremento y disminución de veinticinco centímetros dos veces al día, por eso ocurren terremotos y erupciones volcánicas.

Las mareas atmosféricas son pequeñas, debido a la reducida masa de atmósfera que tenemos. Estas mareas, se dan en la ionósfera, las mareas que suceden ahí, alteran el campo magnético que rodea a la Tierra (marea magnética), éstas a su vez, regulan en la atmósfera baja, la penetración de rayos cósmicos. Esta penetración de rayos a la atmósfera afecta su composición iónica, que a su vez produce cambios en los seres vivos.