

Colegio la salle

Secundaria

Grado:2 Grupo:C

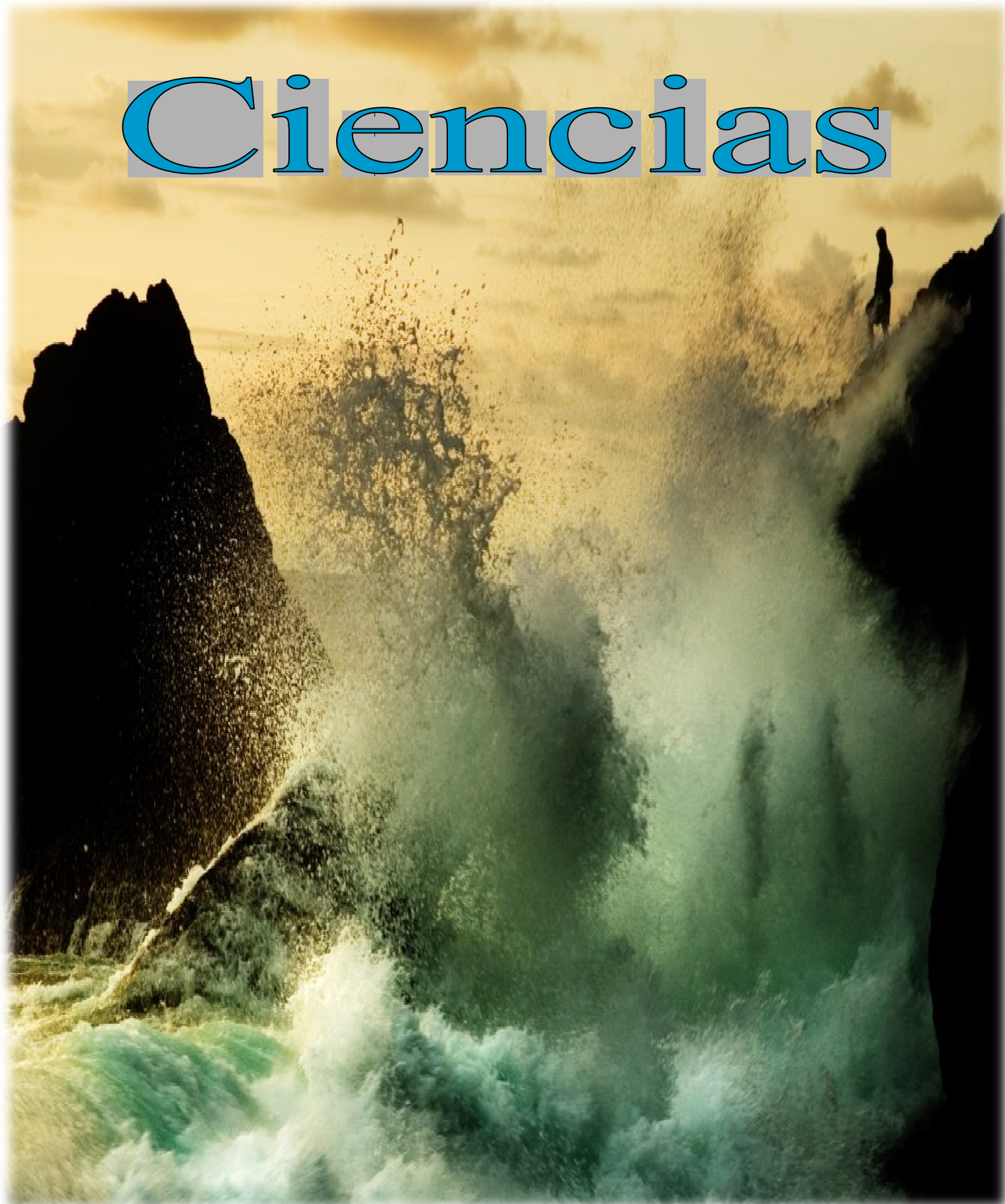
Tema: ¿Cómo se producen las mareas?

Integrantes:

- David Figueroa Castro.
- Ignacio Gurria Urgell Ramos.
- Guillermo Segura Del Rio.
- Mauricio Balcells Ramirez .
- Pedro Antonio Morales Nava.

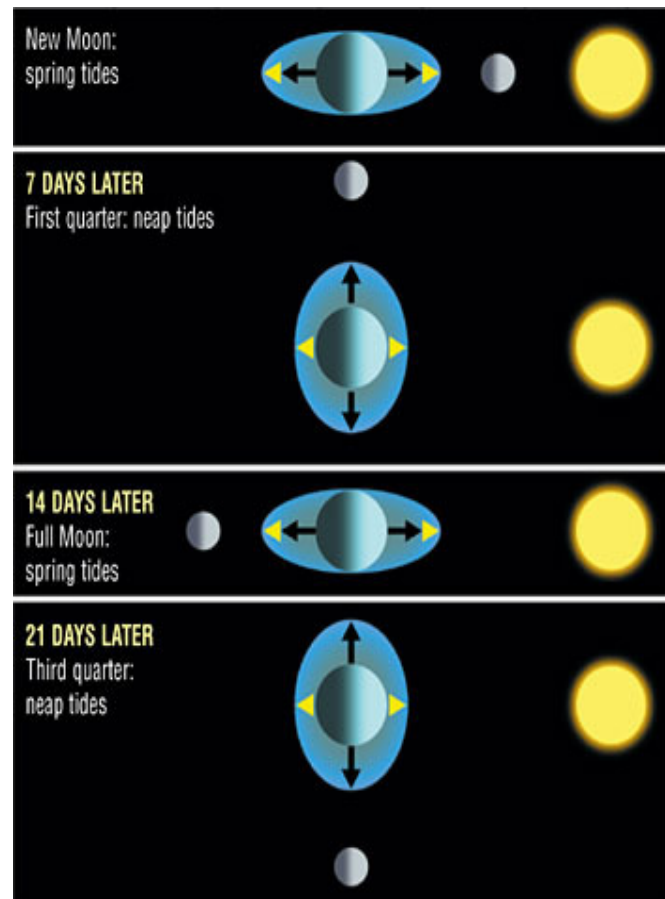
Indice:

Ciencias



El origen de las fuerzas de marea

El origen de la fuerza de marea se debe a que la Tierra es un cuerpo extenso y el campo gravitatorio producido por la Luna o por el Sol no es homogéneo en todos sus puntos, ya que hay unos puntos que están más cercanos y otros más alejados de dichos cuerpos celestes.



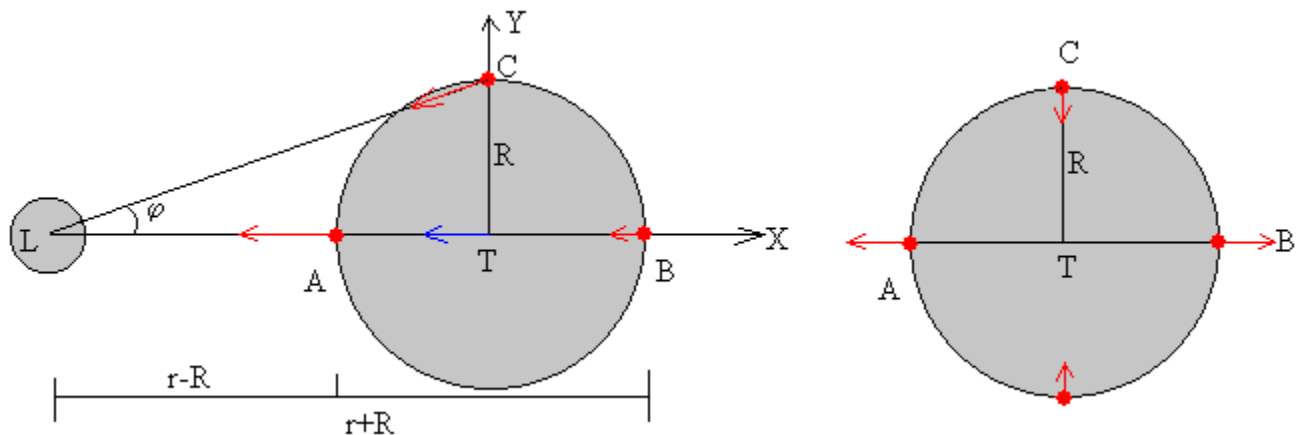
Supondremos que la Tierra es un cuerpo rígido de forma esférica de radio R , que está cubierta por una capa de agua de espesor uniforme y de pequeña profundidad. El cuerpo perturbador, la Luna o el Sol se supone que está en el plano ecuatorial de la Tierra.

Aunque el Sol y la Luna se mueven, se considera que el agua está en todo momento en equilibrio, la velocidad y la aceleración de cualquier elemento de líquido respecto de la Tierra se supone despreciable.

Supondremos inicialmente, que el cuerpo perturbador es la Luna, las mismas fórmulas serán

aplicables para el Sol. Finalmente, analizaremos el efecto combinado de la Luna y del Sol.

Consideremos la Tierra y la Luna inmóviles en el espacio estando sus centros separados una distancia r . La fuerza de marea, en una determinada posición P de la superficie de la Tierra, es igual a la diferencia entre la fuerza de atracción que la Luna ejerce sobre un objeto situado en dicha posición, y la fuerza de atracción que ejercería sobre tal objeto si estuviese en el centro de la Tierra.



Dibujamos las fuerzas de atracción que ejerce la Luna (en color rojo) sobre un objeto de masa m situado en los puntos A, B y C, y la fuerza que ejercería (en color azul) sobre dicho objeto si estuviese situado en el centro T de la Tierra. A la derecha, se dibujan las fuerzas de marea (diferencia entre los vectores rojos y azul) en los puntos A, B y C.

En el centro de la Tierra T, la fuerza de atracción está dirigida hacia el centro de la Luna

$$F_T = -G \frac{Mm}{r^2} \mathbf{i}$$

- En A, la fuerza de atracción que ejerce la Luna sobre un objeto de masa m es

$$F_A = -G \frac{Mm}{(R-r)^2} \mathbf{i}$$

y la fuerza de marea \mathbf{f}_A en dicho punto es

$$\mathbf{f}_A = F_A - F_T = -GMm \left(\frac{1}{(r-R)^2} - \frac{1}{r^2} \right) \mathbf{i} \approx -GMm \frac{2R}{r^3} \mathbf{i}$$

Se ha hecho la aproximación $R \ll r$, el radio de la Tierra $R = 6.37 \cdot 10^6$ m es mucho menor que la distancia entre el centro de la Tierra y el centro de la Luna $r = 384.4 \cdot 10^6$ m

- En B, la fuerza de marea \mathbf{f}_B es

$$\mathbf{f}_B = F_B - F_T = -GMm \left(\frac{1}{(r+R)^2} - \frac{1}{r^2} \right) \mathbf{i} \approx GMm \frac{2R}{r^3} \mathbf{i}$$

- En C, la fuerza de atracción es

$$F_C = -G \frac{Mm}{R^2 + r^2} (\cos \varphi \mathbf{i} + \sin \varphi \mathbf{j})$$

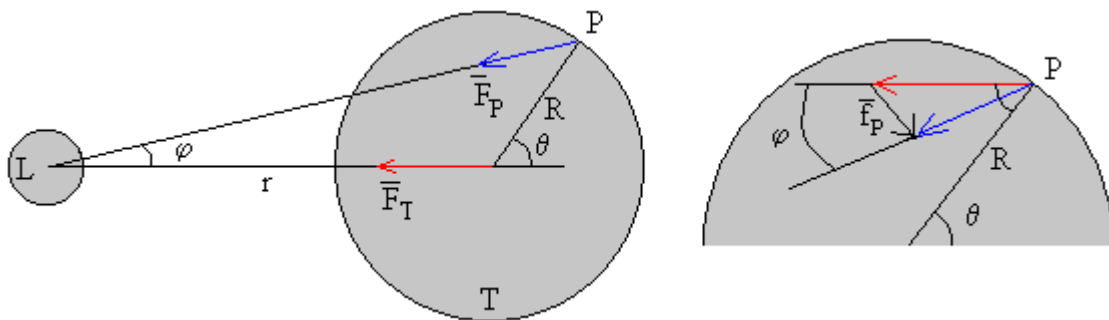
Teniendo en cuenta que el ángulo φ es muy pequeño, $\tan \varphi = R/r$, con $R = 6.37 \cdot 10^6$ m,

$r=384.4 \cdot 10^6$ m, $\varphi=0.017$ rad. Por lo que $\cos \varphi \approx 1$, y $\text{sen } \varphi \approx \tan \varphi = R/r$

$$\mathbf{f}_C = \mathbf{F}_C - \mathbf{F}_T \approx GMm \frac{R}{r^3} \mathbf{j}$$

Las fuerzas de marea en las posiciones A y B, en la línea que une la Luna y la Tierra son aproximadamente el doble en módulo, que en la posición C, perpendicular a dicha línea.

- En P, la fuerza de marea es.

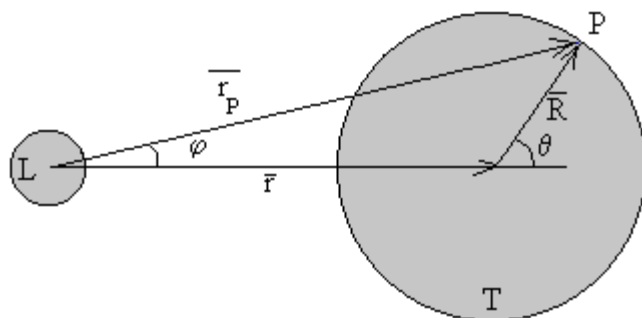


La fuerza que ejerce la Luna sobre un objeto de masa m situado en el punto P distante r_P del centro de la Luna será

$$F_P = G \frac{Mm}{r_P^2}$$

y está dirigida según la línea que une el punto P con el centro de la Luna

La fuerza de marea en P es la diferencia entre los vectores $\mathbf{f}_P = \mathbf{F}_P - \mathbf{F}_T$. Sea



- r_P el vector con origen en el centro de la Luna y extremo en P
- r es el vector con origen en la Luna y extremo en el centro de la Tierra
- R el vector con origen en la Tierra y extremo en el punto P

$$r_P = r + R$$

$$f_P = -GMm \left(\frac{r_P}{r_P^3} - \frac{r}{r^3} \right) = -GMm \left(\frac{r+R}{r_P^3} - \frac{r}{r^3} \right)$$

$$r_P^2 = (r+R)^2 = r^2 + R^2 + 2r \cdot R \approx r^2 \left(1 + \frac{2r \cdot R}{r^2} \right)$$

$$f_P \approx -\frac{GMm}{r^3} \left((r+R) \left(1 + \frac{2r \cdot R}{r^2} \right)^{\frac{3}{2}} - r \right) \approx -\frac{GMm}{r^3} \left((r+R) \left(1 - \frac{3r \cdot R}{r^2} \right) - r \right) \approx -\frac{GMm}{r^3} \left(R - r \frac{3r \cdot R}{r^2} \right)$$

- Para $\theta=0$, los vectores r y R tienen la misma dirección y sentido, obtenemos f_B (véase la primer figura)

- Para $\theta = \pi/2$ los vectores \mathbf{r} y \mathbf{R} son perpendiculares, el producto escalar es cero, obtenemos \mathbf{f}_C
- Para $\theta = \pi$, los vectores \mathbf{r} y \mathbf{R} tienen la misma dirección y pero sentido opuesto, obtenemos \mathbf{f}_A .

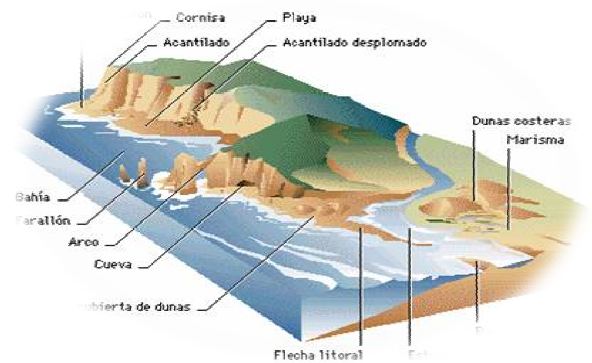
Como apreciamos en la figura, solamente tenemos que calcular las fuerzas de marea en la mitad de la Tierra por encima del eje que une el centro de la Tierra y el centro de la Luna. Los puntos de la Tierra simétricos, por debajo de dicho eje, tienen fuerzas de marea iguales y de sentido contrario.

Componentes de la fuerza de marea.

Para calcular la componente radial de la fuerza de marea, hacemos el producto escalar $\mathbf{f}_P \cdot \mathbf{R} = f_R \cdot R$, donde f_R es la componente radial de la fuerza de marea

$$f_R = \frac{GMm}{r^3} R(3\cos^2 \theta - 1)$$

La componente tangencial f_t se calcula mediante el módulo del producto vectorial $|\mathbf{f}_P \times \mathbf{R}| = f_t \cdot R$



$$f_t = -3 \frac{GMm}{r^3} R \sin \theta \cos \theta$$

- La componente tangencial es cero, para $\theta=0$, punto B, $\theta=90^\circ$ punto C, $\theta=180^\circ$ punto A.
- La componente radial es máxima, para $\theta=0$, punto B, $\theta=180^\circ$ punto A. Es mínima, para $\theta=90^\circ$, punto C.

Datos

- Masa de la Luna $M=7.35 \cdot 10^{22}$ kg
- Distancia media entre el centro de la Tierra y el centro de la Luna $r=384.4 \cdot 10^6$ m
- Masa del Sol $M=1.98 \cdot 10^{30}$ kg
- Distancia media entre el centro de la Tierra y el centro del Sol $r=149.6 \cdot 10^9$ m
- Radio de la Tierra $R=6.37 \cdot 10^6$ m
- Constante $G=6.67 \cdot 10^{-11}$ Nm²/kg²

La fuerza de atracción que ejerce la Tierra sobre un objeto de masa m situado en su superficie es

$$F = \frac{GM_T m}{R^2} = \frac{6.67 \cdot 10^{-11} \cdot 5.98 \cdot 10^{24} \cdot m}{(6.37 \cdot 10^6)^2} = 9.83 \cdot m \text{ N}$$

El Sol está muy alejado de la Tierra, pero tiene una masa enorme. La Luna está cercana a la Tierra pero su masa es relativamente pequeña. La fuerza de atracción que ejerce el Sol sobre el c.m. de la Tierra es mayor que la fuerza que ejerce la Luna sobre el c.m. de la Tierra.

$$F_L = \frac{GM_s m}{r^2} = \frac{6.67 \cdot 10^{-11} \cdot 7.35 \cdot 10^{22} \cdot m}{(384.4 \cdot 10^6)^2} = 3.32 \cdot 10^{-3} \cdot m \text{ N}$$

$$F_s = \frac{GM_s m}{r^2} = \frac{6.67 \cdot 10^{-11} \cdot 1.98 \cdot 10^{30} \cdot m}{(149.6 \cdot 10^9)^2} = 5.90 \cdot 10^{-3} \cdot m \text{ N}$$

El cociente es $F_s/F_L=1.78$

Estimados el valor máximo de las fuerzas de marea en A o B ($\theta=0$), véase la primera figura

- Debidas a la Luna

$$f_L = 2 \frac{GM_L}{r^2} \frac{R}{r} = 2 \frac{6.67 \cdot 10^{-11} \cdot 7.35 \cdot 10^{22} \cdot 6.37 \cdot 10^6 \cdot m}{(384.4 \cdot 10^6)^3} = 1.1 \cdot 10^{-6} \cdot m \text{ N}$$

- Debidas al Sol

$$f_s = 2 \frac{GM_s}{r^2} \frac{R}{r} = 2 \frac{6.67 \cdot 10^{-11} \cdot 1.98 \cdot 10^{30} \cdot 6.37 \cdot 10^6 \cdot m}{(149.6 \cdot 10^9)^3} = 5.02 \cdot 10^{-7} \cdot m \text{ N}$$

El cociente entre estas dos fuerzas es $f_L/f_s=2.195$

Estas cifras nos indican que, las fuerzas de marea son muy pequeñas comparadas con la fuerza de atracción de la Tierra $9.83 \cdot m$ sobre un objeto de masa m situado en su superficie, pero sus efectos son notables.

La fuerza de atracción del Sol sobre el c.m. de la Tierra es mayor que la fuerza de atracción de la Luna, a pesar de que ésta está muy próxima a la Tierra. Sin embargo, la fuerza de marea producida

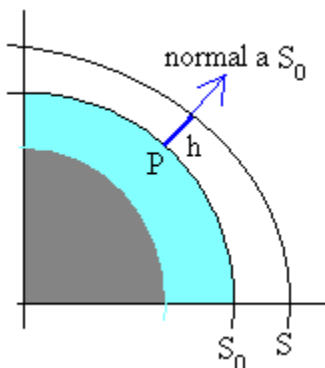
por el Sol es más pequeña que la producida por la Luna.

Elevación de la capa de agua

El siguiente paso, cuya demostración se omite, por razones de dificultad matemática, pero que puede consultarse en el primer artículo citado en las referencias, es el cálculo de la energía potencial correspondiente a la fuerza de marea f_p .

La forma S_0 de la superficie debido a la fuerza de atracción de la Tierra y a su rotación es la de un esferoide de revolución alrededor del eje polar.

La fuerza centrípeta, debida a la rotación de la Tierra alrededor de su eje, que es una fuerza independiente del tiempo, no añade nada a las fuerzas de marea.



El efecto del cuerpo perturbador (Sol, Luna o ambos) es el distorsionar ligeramente la superficie S_0 , para dar lugar a una nueva superficie S , donde S es una superficie equipotencial perpendicular a la resultante de todas las fuerzas, incluidas las de

marea, que actúan en P.

Teniendo en cuenta, que el volumen de agua que cubre la Tierra permanece constante, se determina la elevación h del punto P de la superficie S_0 debida exclusivamente a las fuerzas de atracción del cuerpo perturbador.

$$h = \frac{M}{2M_T} \left(\frac{R}{r} \right)^3 R(3\cos^2 \theta - 1)$$

donde M es la masa del cuerpo perturbador, $M_T = 5.98 \cdot 10^{24}$ kg es la masa de la Tierra, R su radio, r la distancia entre el centro de la Tierra y el centro del cuerpo perturbador.

Esta es la expresión que emplearemos en los programas interactivos al final de esta página, donde hemos supuesto que el cuerpo perturbador está en reposo en el plano ecuatorial de la Tierra a una distancia r de su centro.

La máxima elevación corresponde al ángulo $\theta = 0^\circ$ o $\theta = \pi$, cuando el cuerpo perturbador está delante o detrás, (puntos A y B de la primera figura) donde son máximas las fuerzas de marea.

La mínima elevación corresponde al ángulo $\theta = \pi/2$, (punto C de la primera figura). La máxima elevación es el doble en valor absoluto, de la mínima elevación. De modo que, la

diferencia entre altura máxima de la bajamar y la pleamar es

$$\Delta h_{max} = 3 \frac{M}{2M_T} \left(\frac{R}{r} \right)^3 R$$

Con los datos proporcionados en el apartado anterior. Para las mareas producidas por la Luna

$$\Delta h_{max} = 3 \frac{7.35 \cdot 10^{22}}{2 \cdot 5.98 \cdot 10^{24}} \frac{(6.37 \cdot 10^6)^4}{(384.4 \cdot 10^6)^3} = 53.4 \text{ cm}$$

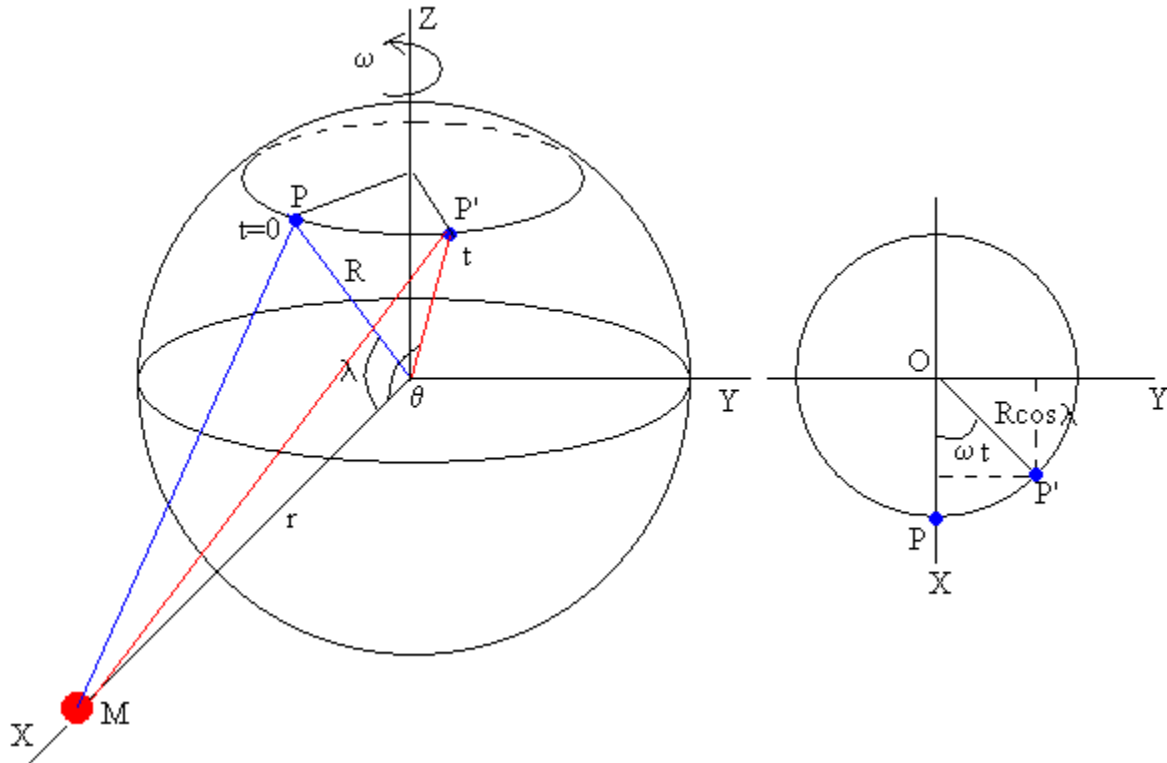
Para las mareas producidas por el Sol

$$\Delta h_{max} = 3 \frac{1.98 \cdot 10^{30}}{2 \cdot 5.98 \cdot 10^{24}} \frac{(6.37 \cdot 10^6)^4}{(149.6 \cdot 10^9)^3} = 24.4 \text{ cm}$$

Rotación de la Tierra

Ahora bien, esta no es la situación real. La Tierra se mueve respecto de su eje con un periodo de 24 h 22 min. La velocidad angular de rotación es $\omega = 2\pi/P$.

La elevación en función de la latitud



Supongamos que en el instante $t=0$, el punto P sobre la superficie de la Tierra a una latitud λ , y el cuerpo perturbador M están en el plano XZ . Al cabo de un cierto tiempo t , debido a la rotación de la Tierra, el punto P se habrá desplazado a la posición P' , el ángulo OPP' es ωt

El ángulo θ , formado por la recta que une el centro de la Tierra con el punto P' y el centro de la Tierra con el centro del cuerpo perturbador o bien, por el vector \mathbf{R} y el vector \mathbf{r} , se puede calcular por medio del producto escalar.

$$\mathbf{r} = r\mathbf{i}$$

$$\mathbf{R} = R\cos\lambda \cdot \cos(\omega t) \cdot \mathbf{i} + R\cos\lambda \cdot \sin(\omega t) \cdot \mathbf{j} + R\sin\lambda \cdot \mathbf{k}$$

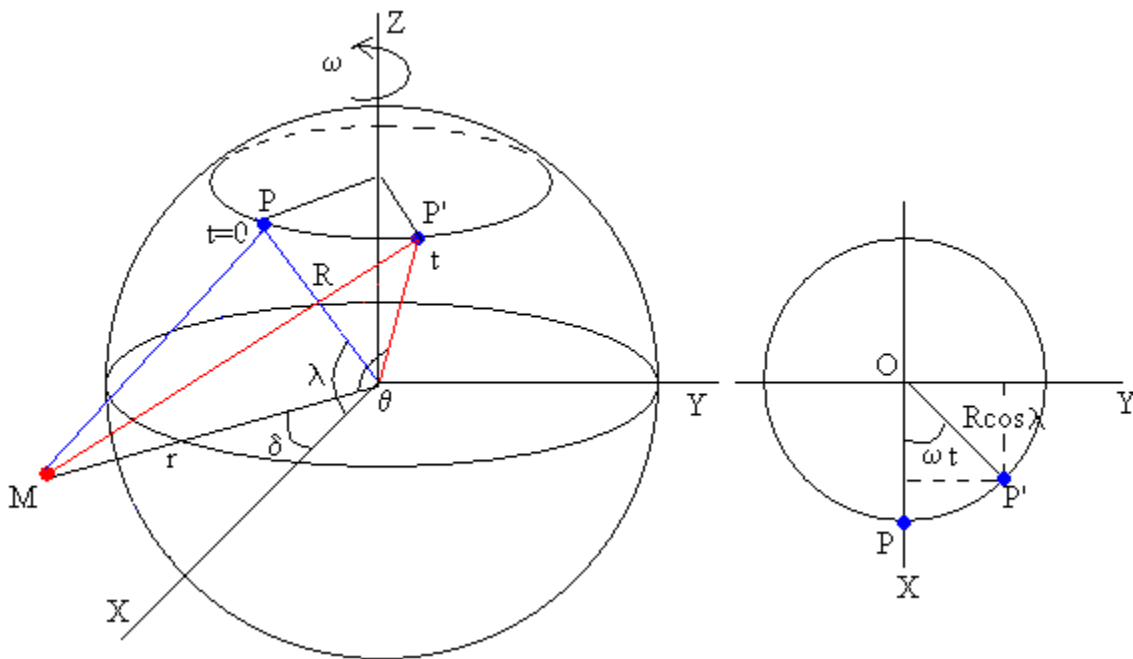
El producto escalar vale

$$\mathbf{r} \cdot \mathbf{R} = R \cdot r \cos \theta = R \cdot r \cos \lambda \cos(\omega t)$$

$$\cos \theta = \cos \lambda \cdot \cos(\omega t)$$

La elevación en función de la latitud y el ángulo de declinación

Si el cuerpo perturbador no está en el plano ecuatorial, sino que forma un ángulo δ , de declinación con dicho plano.



El vector \mathbf{r} se escribe ahora

$$\mathbf{r} = r \cos \delta \cdot \mathbf{i} + r \sin \delta \cdot \mathbf{k}$$

El producto escalar vale

$$\mathbf{r} \cdot \mathbf{R} = R \cdot r \cos \theta = R \cdot r \cos \lambda \cos(\omega t) \cos \delta + R r \sin \lambda \sin \delta$$

$$\cos\theta = \cos\lambda \cos(\omega t) \cos\delta + \sin\lambda \sin\delta$$

Finalmente, si P no parte del plano XZ (meridiano de Greenwich) sino de una meridiano inicial φ . La fórmula se convierte en

$$\cos\theta = \cos\lambda \cos(\omega t + \varphi) \cos\delta + \sin\lambda \sin\delta$$

Introduciendo $\cos\theta$ en la expresión de la elevación del agua, y teniendo en cuenta las identidades trigonométricas $\cos 2\beta = 2\cos^2\beta - 1$, $\sin^2\beta + \cos^2\beta = 1$, $\sin 2\beta = 2\sin\beta \cos\beta$, se llega al siguiente resultado.

$$h = \frac{MR^4}{2M_r r^3} \left(\begin{array}{l} \frac{3}{2} \sin 2\delta \sin 2\lambda \cos(\omega t + \varphi) + \\ \frac{3}{2} \cos^2 \delta \cos^2 \lambda \cos(2\omega t + 2\varphi) + \\ \frac{1}{2} (3\sin^2 \lambda - 1)(3\sin^2 \delta - 1) \end{array} \right)$$

- El primer sumando, depende armónicamente de ωt , y completa un periodo de oscilación cuando $\omega t = 2\pi$, es decir, cuando la Tierra da una vuelta completa. Estas son las mareas diurnas, lunares o solares según que M y r sean, respectivamente, los datos de la masa de la Luna y su distancia al centro de la Tierra, o los datos relativos al Sol.

En el ecuador estas mareas desaparecen ya que la latitud $\lambda=0$. En cambio, se hacen grandes para latitudes de $\lambda=45^\circ$.

- El segundo sumando, depende armónicamente de $2\omega t$, por tanto, cada 12 horas se produce un ciclo de marea. Su amplitud se hace nula en los polos $\lambda=90^\circ$, y son máximas en el ecuador $\lambda=0^\circ$.
- El tercer sumando, no depende del tiempo, y se anula para aquellas latitudes tales que $\text{sen}^2\lambda=1/3$, $\lambda\approx 35^\circ$, y tiene su máximo valor en los polos. Finalmente, depende del ángulo de declinación δ que a su vez depende del movimiento de la Luna y del Sol.

Mareas producidas por el Sol y la Luna

Cuando consideramos los efectos combinado de la de la Luna y del Sol, la elevación de la marea se obtiene sumando las elevaciones debidas cada uno de ellos.

$$h = \frac{M_L}{2M_T} \left(\frac{R}{r_L} \right)^3 R(3\cos^2\theta - 1) + \frac{M_S}{2M_T} \left(\frac{R}{r_S} \right)^3 R(3\cos^2\theta - 1)$$

La máxima diferencia de nivel entre la marea baja y pleamar es de $53.4+24.4=77.8$ cm. Cuando

los dos cuerpos celestes están en conjunción alineados con la Tierra se producen la máxima elevación, y cuando están en cuadratura se producen la mínima elevación.

Oscilaciones forzadas

La descripción de las mareas que se ha hecho en los apartados anteriores corresponde al efecto de la Luna y del Sol sobre una capa de agua de espesor uniforme que cubre la Tierra por completo. La Tierra está cubierta de agua en sus tres cuartas partes, y su distribución no es uniforme, tanto en profundidad como en extensión. Tenemos grandes océanos, mares cerrados como el Mediterráneo, lagos, bahías, etc. La diferencia de nivel entre la marea baja y la alta cambia de un lugar a otro, así en el mar Mediterráneo es muy pequeña, y en ciertas bahías como la de Fundy en Canadá es muy grande

Resonancia

Hemos observado, que un punto de la superficie líquida de la Tierra está sometido a una fuerza oscilante, cuyo periodo es de 12 horas aproximadamente, y cuya amplitud es variable. Una bahía es una cavidad con determinados

modos de oscilación, que dependen de su forma, extensión y profundidad de sus aguas. En ciertos lugares como Mont St Michel en la Bretaña francesa o la bahía de Fundy en Canadá se pueden producir situaciones de resonancia, con una diferencia de altura entre el flujo y el refluo que van desde los 15 metros en la localidad francesa a 20 m en la bahía de Canadá.

Efecto sobre la rotación de los cuerpos

El efecto de las mareas es una disminución progresiva en la velocidad de rotación de la Tierra. La duración del día se incrementa en 3.5 milisegundos por cada siglo.

Si consideramos que la Luna tuvo alguna vez en su historia remota una parte fluida, los efectos de marea provocados por la acción de la Tierra fueron enormes. Se puede hacer un cálculo y mostrar que estos son 6000 veces mayores que los que produce la Luna en la Tierra. El efecto de estas intensísimas mareas explica el hecho de que siempre vemos la misma cara de la Luna.

Venus que está mucho más cerca del Sol, tiene una baja velocidad de rotación, la duración de un día venusiano es de 243.16 días terrestres, el año venusiano consta aproximadamente de dos días solares.

No se pueden explicar ciertos movimientos de planetas y satélites sin recurrir al mecanismo de fricción de marea.

Actividades

Sistema inmóvil Tierra - Luna o Tierra – Sol.

En el primer applet comparamos los "efectos de marea" sobre la Tierra producidos separadamente por la Luna y por el Sol. Se supone que la Luna y el Sol están a una distancia fija de la Tierra, en su plano ecuatorial, y que ésta no tiene movimiento de rotación.

- Se activa el botón titulado **Luna**,
- Se pulsa el botón titulado **Nuevo**

Si se activa la casilla titulada **Fuerzas**, se observa las componentes tangencial y radial de las fuerza de marea que se ejercen en varios puntos de la superficie terrestre.

- Se activa el botón titulado **Sol**,
- Se pulsa el botón titulado **Nuevo**

La superficie de agua se desvía de la forma esférica y esta desviación como puede apreciarse, no está realizada a escala.

De la representación gráfica sacamos las siguientes conclusiones

1. Los valores máximos (positivos) aparecen en la zona de la superficie de la Tierra más cercana a la Luna ($q=0^\circ$) y en la zona más alejada ($q =180^\circ$). En estas zonas los cuerpos pesan menos, la superficie del agua se eleva.
2. Los valores mínimos (negativos) se producen en las zonas intermedias ($q =90^\circ$) y ($q =270^\circ$), en estas zonas los cuerpos pesan más, la superficie del agua se hunde.
3. Fijarse que la interacción gravitatoria disminuye con el cuadrado de la distancia a pesar de la enorme masa del Sol sus efectos sobre el nivel de las aguas es mucho menor que la producida por la Luna. El efecto del Sol es algo menos de la mitad que el producido por la Luna.

La gravedad y las mareas.

Todo el mundo ha oído que existe alguna relación entre las mareas y la Luna. ¿Es esto cierto?. El lector pensará inmediatamente: "pues claro, todo el mundo lo sabe". Y tiene razón, pero las relaciones causales no son al principio tan evidentes como uno podría creer. Es también una

creencia popular que la menstruación de la mujer y el ciclo lunar están relacionados. Esto es así porque el tiempo promedio que transcurre entre dos menstruaciones es similar al mes lunar (unos 29 días). Pero no existe ninguna justificación racional para esta creencia. Es una de esas muchas coincidencias. Un ejemplo de este tipo de coincidencias lo vimos anteriormente con los diámetros aparentes del Sol y la Luna (medio grado aproximadamente) vistos desde la Tierra. Por supuesto, que esto sea así no obedece más que a una afortunada coincidencia. De hecho, si refinamos nuestras medidas, vemos que estos diámetros aparentes no son exactamente iguales y además varían según la época del año, de la misma manera que el periodo de la menstruación presenta variaciones de una mujer a otra y, en la misma mujer, de un mes al siguiente.

Pero veamos cómo se podría producir el efecto de la Luna sobre la marea. Para empezar consideremos el caso más obvio de un poco de agua que se encuentra en la parte de la Tierra más cercana a la Luna y consideremos que la Tierra está orbitando alrededor de la Luna. Pero, ¡un momento!. ¿No es la Luna la que orbita alrededor de la Tierra?. Bueno, depende del punto de vista. Si uno se sitúa en la Luna verá cómo la Tierra cambia de posición a diario. La

Tierra atrae a la Luna, pero ésta también atrae a la Tierra, obviamente. Recordemos que para un cuerpo en órbita es necesaria una cantidad de aceleración centrípeta. En este caso, esa aceleración es debida a la atracción que produce toda la masa lunar sobre toda la masa de la Tierra, como si esta estuviera concentrada en su centro. Por tanto, el centro de la Tierra cae hacia el centro de la Luna con una aceleración:

$$a = G \frac{M_L}{d^2}$$

donde M_L es la masa de la Luna y d la distancia entre los centros de la Luna y la Tierra.

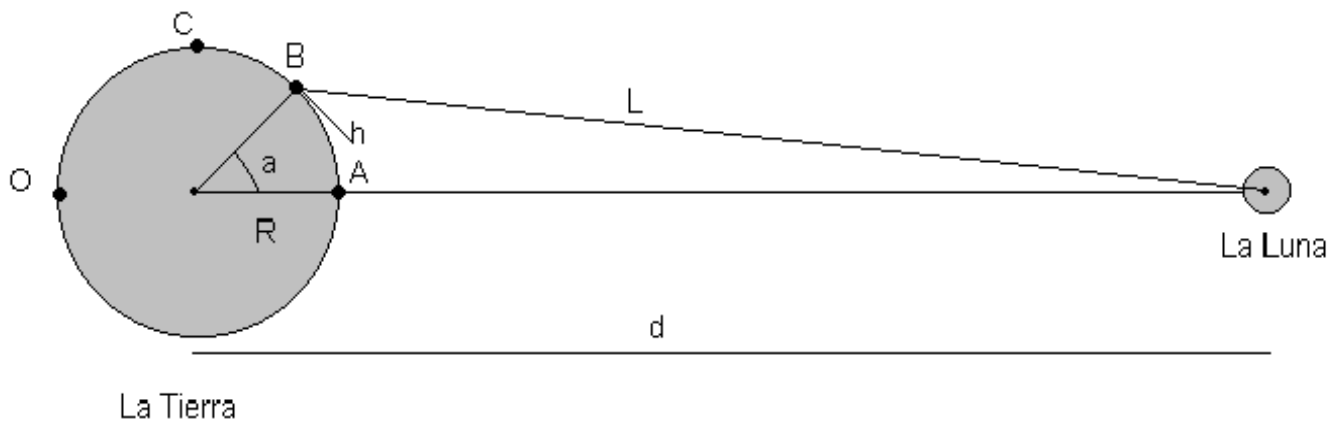


Figura 22

Pero que ocurrirá para una masa situada en un punto tal como el **A** de la **figura 22**, más cercano a la Luna que el centro de la Tierra. Obviamente este punto de la Tierra estará sometido a una aceleración, debido a la atracción lunar, de

$$a_A = G \frac{M_L}{(d - R)^2}$$

donde R es el radio terrestre. Pero como esta masa situada en **A** se mueve con la misma velocidad que el centro de la Tierra alrededor de la Luna, estará sometido a un exceso de aceleración que le hará caer hacia la Luna dada por:

$$a_A - a = G M_L \left[\frac{1}{(d - R)^2} - \frac{1}{d^2} \right] = G M_L \frac{2dR - d^2}{d^2(d - R)^2} \approx G M_L \frac{2R}{d^3}$$

donde hemos hecho una aproximación considerando pequeño R frente a d

$$\frac{R}{d} \approx \frac{1}{60}$$

según hemos visto anteriormente.

Sustituyendo los valores de $R = 6400000 \text{ m}$ y $d = 384000000 \text{ m}$ y $M_L = 7.2 \cdot 10^{22} \text{ kg}$, obtenemos que esta aceleración extra del cuerpo situado en **A** hacia la Luna es de 0.0000011 m/s^2 , lo que significa menos de la millonésima parte de la

aceleración de la gravedad en la superficie terrestre. El efecto directo de la Luna parece demasiado pequeño para producir el apreciable efecto de marea. Pero hay un efecto sutil que no podemos ver en un punto como **A**. Veamos que ocurre en un punto como **B**, desplazado respecto a la dirección de los centros de la Tierra y la Luna un ángulo α . Podemos apreciar que debe existir una componente de la aceleración en la dirección horizontal indicada por **h**. La cuestión es si esta componente es apreciable y en que sentido se dirige. Los cálculos se hacen aquí un poco más complejos, pero uno llega a que hay una componente horizontal dirigida hacia el lado de la Luna dada por

$$a_h = \frac{3}{2} GM_L \frac{R}{d^3} \text{Sen}(2\alpha) = 8 \times 10^{-8} \text{Sen}(2\alpha)$$

Que tiende a desplazar el agua hacia la posición de **A**, elevando el océano sobre el nivel medio esperado si no existiera la fuerza de marea y dado por

$$\text{elevación} = \frac{1}{4} GM_L \frac{R}{d^3} R (1 + 3 \text{Cos}(2\alpha)) = 8.8 \text{cm} (1 + 3 \text{Cos}(2\alpha))$$

La elevación es máxima en los puntos **A** y **O** ($\alpha = 0^\circ$ y $\alpha = 180^\circ$), con unos 35 cm de elevación sobre el nivel que cabría esperar si no existiera la Luna, y la elevación mínima es de unos -18 cm, lo que

significa que en realidad se produce un hundimiento sobre el nivel sin marea de 18 cm en puntos como el **C** y su opuesto ($\alpha = 90^\circ$ y $\alpha = 270^\circ$). Para un ángulo de 54.75° , 125.25° , 215.25° y 324.75° , la elevación es nula.

Aquí aparece un efecto curioso. Resulta que el océano también se eleva en puntos situados al lado opuesto de donde se halla la Luna (tales como el **O**). ¿Cómo podemos entender ese efecto?. La razón está relacionada con el hecho de que en estos puntos, la Luna no es capaz de generar una fuerza centrípeta suficiente para mantener a las masas (como el agua) en una órbita con velocidad igual a la del centro de la Tierra, y por tanto, tienen un defecto de aceleración con respecto al centro de la Tierra que hace que tiendan a quedarse rezagadas con respecto a éste. El efecto es tal como si existiera una pequeña aceleración que trata de expulsar el agua al lado opuesto de donde se encuentra la Luna.

Vamos a estimar ahora la contribución del Sol. Vemos que la aceleración que produce el efecto de marea aumenta con la masa y disminuye con el cubo de la distancia. La masa del Sol es unas 27 millones de veces mayor que la de la Luna, pero se encuentra unas 390 veces más lejos. Por

tanto, la contribución solar a la marea será $27000000/390^3 = 0.45$ veces la contribución lunar. Sin embargo el Sol y la Luna tienen posiciones relativas que varían mucho en cada momento del año. Esto hace que las mareas sea un fenómeno mucho más rico y variado de lo que hemos podido estudiar aquí. Lo que sí está claro es que la Luna domina la principal componente de la marea que se manifiesta en un periodo de unas 12 horas y media aproximadamente.

Pero el tamaño de la marea también está altamente influenciado por la estructura de la Tierra y los océanos. Existen lugares que destacan por las pronunciadas mareas. Esto puede ser debido a la escasa inclinación de la costa, a la interferencia producida por las masas de tierra, como es el caso de la influencia de las islas británicas sobre las pronunciadas mareas de Normandía, en la costa francesa, o por fenómenos de resonancia como ocurre en algunas bahías donde la el agua puede subir varios metros debido a que el tiempo de vaciado y llenado de la bahía es similar al periodo de la marea.

Mareas Solares

Para calcular la amplitud de las mareas solares, se construyen dos pozos imaginarios desde la superficie hasta el centro de la Tierra. Uno es paralelo a la recta que une la Tierra y el Sol y el otro es perpendicular.

La fuerza y la aceleración que siente el agua en el pozo perpendicular son casi paralelas al eje Tierra-Sol, pero no exactamente. La razón es que el Sol está a una distancia finita y las fuerzas están dirigidas hacia el centro del Sol y no son totalmente paralelas. Calculemos la componente de la aceleración de gravedad perpendicular al eje Tierra-Sol, Δa_s , que experimenta el agua situada a una distancia r del centro de la Tierra. Sin más que proyectar el vector de aceleración, se llega a que:

$$\frac{\Delta a_s}{a_s} = \frac{r}{d}$$

Aquí, a_s es la aceleración debida a la atracción del Sol:

$$a_s = G \frac{M_s}{d^2}$$

En esta última fórmula, $M_s = 1,987 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ es la masa del Sol y $d = 150 \cdot 10^9 \text{ m}$ es la distancia de la Tierra al Sol. Por su parte, la componente perpendicular al eje queda:

$$\Delta a_s = G \frac{M_s}{d^2} \frac{r}{d}$$

Esta aceleración varía linealmente entre el centro de la Tierra y la superficie. El valor medio se obtiene reemplazando r por $\frac{R}{2}$, donde $R=6,366 \cdot 10^6 m$ es el radio de la Tierra. Esta aceleración añade un "peso" adicional a la columna de agua del pozo y hace que la presión en el fondo aumente una cantidad $\rho \overline{\Delta a_s} R$, donde ρ es la densidad del agua. Este aumento de la presión, transmitido a la superficie del océano, se corresponde con una variación h del nivel del océano dada por la fórmula $P=\rho g h$ (donde $g=9,81 m/s^2$ es la aceleración de gravedad terrestre):

$$h = G \frac{M_s R^2}{d^3 2g}$$

El cálculo numérico da una variación de 8,14 cm. Se pasará ahora a calcular la disminución Δa_g de la aceleración de gravedad ocasionada por el Sol en un punto situado a una distancia r del centro de la Tierra. Añadiendo esta distancia adicional en la fórmula de la aceleración gravitatoria:

$$a_g = G \frac{M_s}{(d+r)^2} = G \frac{M_s}{d^2 + 2rd + r^2} = G \frac{M_s}{d^2 \left(1 + 2\frac{r}{d} + \left(\frac{r}{d}\right)^2\right)} \simeq G \frac{M_s}{d^2} \left(1 - 2\frac{r}{d}\right)$$

El primer sumando se corresponde con la aceleración para un cuerpo situado a una distancia d . Por tanto, la *disminución* de la aceleración es:

$$\Delta a_g = G \frac{M_s}{d^2} 2 \frac{r}{d}$$

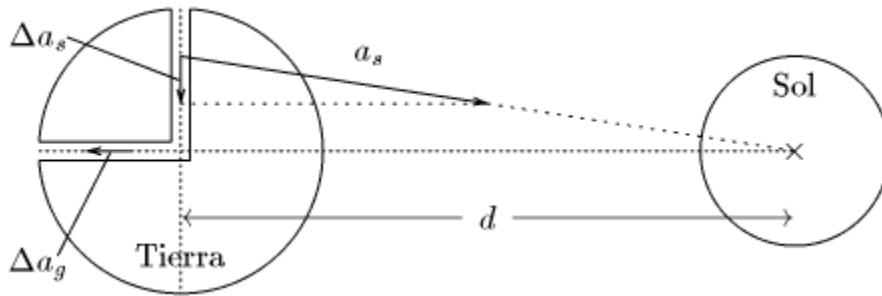
A su vez, la aceleración media es:

$$\overline{\Delta a_g} = G \frac{M_s}{d^3} R$$

La variación de presión es, como en el caso anterior, $\rho \overline{\Delta a_g} R$, por lo que:

$$h = G \frac{M_s}{d^3} \frac{R^2}{g}$$

Esta aceleración da un aumento de la altura del océano de 16,28 cm. Con la suma de los dos efectos, el semieje mayor del elipsoide es 24,4 cm mayor que el semieje menor. Como la Tierra gira, un punto situado en el Ecuador ve la altura del mar llegar a un máximo (pleamar) dos veces por día: cada vez que dicho punto pasa por el semieje mayor. De la misma manera, cada vez que el punto pasa por un semieje menor, la altura del mar pasa por un mínimo (bajamar). La diferencia entre la pleamar y la bajamar es de 24,4 cm. Pero no hay que olvidar que esto sólo es la parte debida al Sol, que no hay continentes y que no se ha tenido en cuenta la inclinación del eje de rotación de la Tierra. La variación de la altura del mar se puede aproximar por una sinusoide con un período de 12 horas.



El agua del pozo vertical siente una aceleración hacia el centro porque la atracción del Sol está dirigida hacia el centro del Sol. Las escalas no se han respetado.

Mareas lunares

La Luna gira alrededor de la Tierra, pero esta última no está inmóvil. En realidad, tanto la Luna como la Tierra giran alrededor del centro de masas de las dos. Este punto se sitúa a 4.670 km del centro de la Tierra. Como el radio de la Tierra es de 6.366 km, el centro de masas se encuentra a unos 1.700 km de profundidad bajo su superficie. La Luna tiene una masa $M_\ell = 7,349 \cdot 10^{22}$ kg y está a una distancia media de la Tierra de $d_\ell = 3,84 \cdot 10^8$ m. El cálculo de las mareas lunares es similar al cálculo de las mareas solares. Basta con reemplazar la masa y la distancia del Sol por las de la Luna. La diferencia de altura del océano debida al no paralelismo de las fuerzas es:

$$h = G \frac{M_\ell}{d_\ell^3} \frac{R^2}{2g}$$

El cálculo numérico nos da una variación de 17,9 cm.

La diferencia de altura del océano provocada por diferencia de atracción debida a las distancias diferentes respecto a la Luna es:

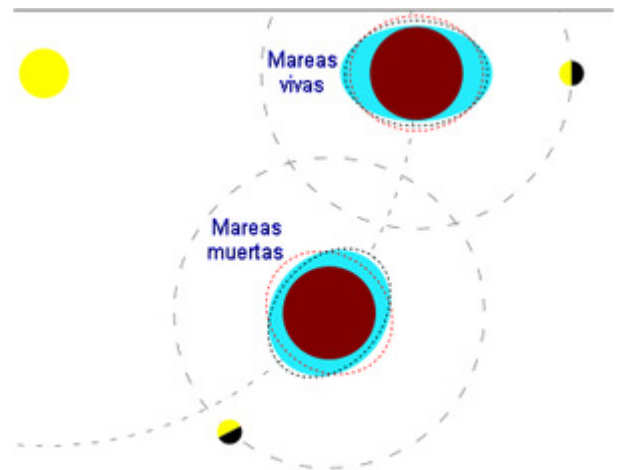
$$h = G \frac{M_l}{d_l^3} \frac{R^2}{2g}$$

El cálculo numérico nos da una variación de 35,6 cm.

La diferencia de longitud entre el semieje mayor y el semieje menor del elipsoide debido a las mareas lunares de 35,6 cm. Por tanto, la amplitud de las mareas lunares es, aproximadamente, dos veces mayor que las de las mareas solares. Como para las mareas solares, la variación de la altura del mar en un punto de la superficie terrestre se puede aproximar por una senoide. Esta vez, el período es 12 horas, 25 minutos y 10 s .

Mareas vivas y mareas muertas

El elipsoide debido a las mareas solares tiene el eje mayor dirigido hacia el Sol. El elipsoide debido a las mareas lunares tiene el eje mayor dirigido hacia la Luna. Como la Luna gira alrededor de la Tierra, los ejes mayores de los elipsoides no giran a la misma velocidad. Con respecto a la estrellas, el periodo de



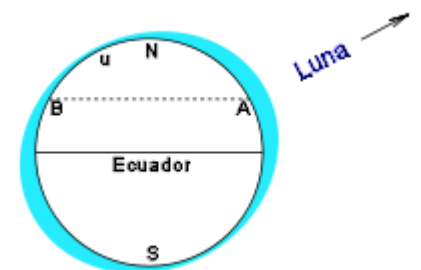
Cuando la Luna y el Sol están alineados, los elipsoides (en punteado) se refuerzan y las mareas son más grandes. Cuando la Luna está en cuadratura con el Sol, los elipsoides se cancelan parcialmente y las mareas son pequeñas.

rotación del elipsoide solar es de un año. El elipsoide de la Luna es de 27,32 días. El resultado es que los ejes de los dos elipsoides se acercan cada 14,7652944 días. Cuando los ejes mayores de los dos elipsoides están alineados, la amplitud de las mareas es máxima y se llaman **mareas vivas** o **mareas sizigias**. Esto sucede en las lunas nuevas y en las lunas llenas. En cambio, cuando el eje mayor de cada elipsoide está alineado con el eje menor del otro, la amplitud de las mareas es mínima. Esto sucede en los cuartos menguantes y los cuartos crecientes. Estas mareas se llaman **mareas muertas** o **mareas de cuadratura**.

Inclinación del eje de la Tierra:

Hasta ahora se ha ignorado el hecho de que el eje de rotación de la Tierra está inclinado unos $23,27^\circ$ con respecto a

la eclíptica (el plano que contiene la órbita de la Tierra y el Sol). Además, el plano de la órbita de la Luna está inclinado unos $5,145^\circ$ con respecto a la eclíptica. Esto significa que el Sol ocupa posiciones que van desde $23,44^\circ$ al norte del plano ecuatorial hasta $23,44^\circ$ al sur del mismo plano.



El Eje mayor del elipsoide de marea está dirigido hacia la Luna. Las dos pleamares diarias, vistas en una latitud de la Tierra, no presentan la misma amplitud.

La Luna puede ocupar posiciones desde $28,6^\circ$ hasta $-28,6^\circ$. La consecuencia de esto es que los ejes mayores de los elipsoides que se han utilizado raramente coinciden con el plano del ecuador terrestre.

En la imagen de la derecha, el punto A está en pleamar. Cuando se produzca la próxima pleamar, 12 horas, 25 minutos y 10 segundos más tarde, el mismo punto se encontrará en B. Esta pleamar será menor que la precedente y que la posterior.

Esta alternancia diurna entre pleamares grandes y pequeñas hace pensar en la suma de dos periodicidades: una diurna y otra semidiurna. Se habla entonces de ondas de marea diurna y semidiurna, tanto lunar como solar. Esto se corresponde con un modelo matemático y no con la realidad física.

Nótese que el punto **u** y las localizaciones situadas más al norte, solo ven una pleamar por día.

Cuando deberían estar en la pequeña pleamar, están aún en el mismo lado del elipsoide. Una situación similar se produce en el Hemisferio Sur.

Matemáticamente, la amplitud de la onda semidiurna es demasiado pequeña para que pueda crear máximos o mínimos adicionales.

Las mareas son máximas cuando las dos pleamares son iguales.

Eso solo ocurre cuando el eje mayor de los elipsoides es paralelo al plano ecuatorial. Es decir, cuando el sol se encuentra en el plano ecuatorial. Esto ocurre durante los equinoccios. Las mareas de equinoccio son las mayores del año.

Influencia de los continentes

En el cálculo simplificado que se ha realizado, en el cual la Tierra no tiene continentes y está recubierta de una hidrosfera continua, la distancia entre las dos posiciones de pleamar es de 20.000 km. La zona de océano cuyo nivel es más alto que el valor medio tiene un diámetro de 10.000 km. Esa distancia es mayor que la distancia entre América y Europa o África y se corresponde con el ancho del Océano Pacífico. Para que todo un océano como el Atlántico o el Pacífico aumentasen de nivel, su contenido total de agua tendría que aumentar. Como los continentes impiden ese movimiento lateral de todo el océano, el modelo de la onda semidiurna no se corresponde con la realidad. En la imagen de derecha se puede ver que la altura de los océanos no sigue una onda que se desplaza de derecha a izquierda (hacia el Oeste).

El desplazamiento del agua y de los máximos y mínimos es mucho más complicado.

En el modelo sin continentes, las líneas cotidales coinciden con los meridianos. En la imagen de la derecha en color están representadas las líneas cotidales del planisferio y el color del fondo corresponde a la amplitud de mareas. En la imagen en blanco y negro, las líneas cotidales están más detalladas y el número se corresponde con el retardo en horas con respecto a una línea de referencia. Estas líneas cotidales se corresponden con una situación astronómica particular (Luna creciente, equinoccios, etc.) y cambian con el tiempo. En las dos imágenes se observa que hay líneas cotidales que convergen hacia puntos anfidrómicos, en los cuales la amplitud de la marea es cero.

La situación es aún más marcada en los mares interiores, cuyas dimensiones son aún menores que las de los océanos. Así, el Atlántico no puede llenar o vaciar el Mar Mediterráneo a través el estrecho de Gibraltar. Las aguas del Mediterráneo solo pueden desplazarse hacia el Este o hacia el Oeste, subiendo en un extremo y bajando en el otro. El resultado final se complica por la forma de las costas que limitan y desvían ese movimiento lateral.

Las mareas en las costas

Como se ha visto, la amplitud de las mareas en alta mar es menor que 1 metro. En cambio, cerca de las costas la amplitud es generalmente mayor y en algunos casos alcanza o sobrepasa los 10 metros. En la tabla siguiente figuran algunos de los lugares donde se producen grandes mareas.³ Se ha puesto un solo lugar por zona.

Se explica ahora cómo una marea de menos de un metro en alta mar puede crear una marea de varios metros en la costa. La razón es la resonancia de la capa de agua situada sobre la plataforma continental. Esta capa es poco profunda (menos de 200 m) y, en algunos casos, tiene una gran extensión hasta el talud continental. Por ejemplo, el Canal de la Mancha es una capa de agua de 500 km de largo (desde la entrada hasta el Paso de Calais), 150 km de ancho y solo 100 m de profundidad. A escala, eso se corresponde con una masa de agua de 50 metros de largo y de 1 cm de profundidad. Cuando el nivel del mar aumenta en la entrada, el agua entra en el canal de la Mancha.

Como la extensión es grande y la profundidad pequeña, la velocidad del agua aumenta hasta unos 4 a 5 nudos (2 a 2,5 m/s). Alcanzar esa velocidad toma su tiempo (unas tres horas en el caso del Canal de la Mancha), pero detenerse también requiere un período similar. Una vez lanzada, el agua continúa avanzando, transcurriendo otras tres horas hasta que se para e invierte su dirección. El comportamiento oscilatorio se debe a la inercia y al retardo que tiene la capa de agua para responder a la excitación: la variación de altura del océano más allá del talud continental. La marea será más grande en función de que el período de oscilación propio de la zona sea más próximo al período de la excitación externa, que es de 12 horas y 25 minutos.

El período de oscilación propio de la Bahía de Fundy en Canadá es de 13 horas. Como es muy próximo al período de excitación, las mareas son muy grandes. Por el contrario, cuando el período propio se aleja de las 12,4 h, las amplitudes de las mareas son menores. El período de oscilación propio depende de la forma de la costa y de la profundidad y longitud de la plataforma.

Grandes mareas	
Localidad	Amplitud (m)
Burntcoat Head, Minas Basin, <u>bahía de Fundy</u> (Nueva Escocia, Canadá)	11,7
Leaf Lake, <u>bahía de Ungava</u> (Quebec, Canadá)	9,8
Newport, <u>canal de Bristol</u> (Inglaterra)	9,2
Sunrise, Turnagain Arm, en el <u>Cook Inlet</u> (Alaska, EE.UU.)	9,2
Río Gallegos (Reducción Beacon) (Argentina)	8,8
Entrada del río Koksoak, en la <u>bahía de Hudson</u> (Canadá)	8,7
Granville, <u>bahía del Monte Saint-Michel</u> (Francia)	8,6
Banco Dirección, en el <u>estrecho de Magallanes</u> (Chile)	8,5

HISTORIA



Desde 1581 hasta 1822, en Londres, capital de Inglaterra, funcionó, sobre el río Támesis, una gran rueda movida por la marea, que permitía bombear el agua hasta el centro de la ciudad.

Modernamente, en el estuario del río Rance, en Francia y en Kislaya, URSS, existen sendas centrales mareomotrices. La potencia instalada en la central francesa es de 250MW.

La primera marea negra con graves consecuencias ocurrió en marzo de 1967 cuando el superpetrolero de 120.000 toneladas **Torrey Canyon** embarrancó en Cornwall, Inglaterra. Se derramaron 120.000 toneladas de crudo y la marea negra afectó las costas de Cornwall, isla de Guernsey y la Bretaña Francesa, principalmente Treguier.

La pesca quedó en ruinas y murieron más de 200.000 aves.

El operativo de limpieza utilizó efectivos militares y voluntarios y, por la falta de experiencia en este tipo de sucesos, se produjeron daños peores que los que se pretendía evitar al dispersar más de 15.000 toneladas de detergente que se sumaron al vertido acabando con flora y fauna. Las autoridades decidieron bombardear el buque e incendiarlo para lo cual se lanzaron 1.000 bombas, 44.000 litros de queroseno, 12.000 litros de napalm y 16 misiles que crearon una enorme

cortina de humo negro que duró casi un mes, hasta que el buque desapareció de la superficie.

Tres años después, el **Polycommander** embarrancó cerca de las Islas Cies en Galicia, vertiendo 116.000 toneladas de crudo que afectaron Bayona y Panzón.

Al año siguiente el petrolero estadounidense **Texaco Oklahoma** se hunde en las proximidades del Cabo Aterras, en la costa este de Estados Unidos, derramando 33.000 toneladas de crudo.

En junio de 1972 el buque **Trader** derrama 35.000 toneladas de crudo al sur de Grecia. Dos meses después colisionan en la costa sudafricana los petroleros de bandera liberiana **Taxanita** y **Oswego Guardian** derramando otras 10.000 toneladas de crudo. En diciembre del mismo año naufraga en el Golfo de Amán el **Sea Star** que vierte 115.000 toneladas de crudo.

En el año 1974 se produjeron dos nuevos accidentes, en agosto embarranca en el estrecho de Magallanes el **Metula** de 206.700 toneladas que arruina 150 kilómetros de la costa chilena con 50.000 toneladas de petróleo. Ese mismo año se ven afectadas las costas de Irlanda y Francia por el choque de dos petroleros

y en Marsella, una maniobra errónea causa una marea negra.

Al año siguiente en el Océano Indico se hunde el **Showa Maru** con 237.000 toneladas de petróleo en los tanques.

En enero de 1975, el buque de bandera francesa **Olimpyc Braveary** se parte en dos frente a la costa de Quessant (Francia), con unas 250.000 toneladas de petróleo en sus tanques.



Cuatro meses después el **Urquiola** encalla en La Coruña y derrama 20.000 toneladas de crudo que afectan El Ferrol, Ares y la Coruña.

En 1978 ocurre uno de los peores vertidos de hidrocarburos de la historia cuando el **Amoco Cádiz** derrama 1,6 millones de barriles de crudo frente a las costas francesas de Bretaña.

En el año 1979 un pozo petrolífero en el Golfo de México derrama 560 millones de litros de petróleo, uno de los más grandes de todos los tiempos, solo superado en la Guerra del Golfo.

Un mes después colisionan el **Aegean Captain** y **Atlantic Empress** vertiendo 140.000 toneladas de crudo en las cercanías de trinidad y Tobago.

Cuatro meses más tarde, **el Burmah Agate** colisionó con el **Mimosa**, en el Golfo de México. Se estimó un vertido de hidrocarburos de 650.000 litros en el medio marino, sin embargo, alrededor de 1.900.000 litros ardían en la atmósfera.

El 5 de agosto de 1983 el petrolero español **Castillo de Bellver** naufraga en el Cabo de Buena Esperanza, frente a Sudáfrica y vierte 250.000 toneladas de petróleo. Pasados diez años se vuelve a producir un nuevo vertido procedente de los 100.000 litros que permanecían en los tanques debido a la corrosión del casco. Ese mismo año, durante el conflicto Irán-Irak, se produjo en el campo de **Nowruz**, en el golfo Pérsico, un vertido de 540.000 toneladas de petróleo procedentes de las plataformas petrolíferas



En marzo de 1989, el petrolero **Exxon Valdez** derramó 40.000 toneladas de crudo en Alaska. En una sola semana generó una

marea negra de 6.700 km², poniendo en peligro la fauna silvestre y las pesquerías de la zona. Es considerado uno de los más grandes desastres en la historia de las mareas negras.

No había pasado el efecto cuando tres meses después el petrolero maltés **Puppy** aborda a otro buque cerca de Bombay, en La India y derrama 40.000 toneladas de crudo.

En diciembre del mismo año, el petrolero iraní **Khark** se accidenta frente a las costas de Marruecos, vertiendo al mar más de 25.000 toneladas de crudo.

El 6 de marzo de 1990, el **Cibro Savannah**, explota y se incendia en Linden, New Jersey, vertiendo alrededor de 32.000 litros de hidrocarburos.

En junio, el **Mega Borg** derrama 20,5 millones de litros de hidrocarburos al sur-sureste de Galveston, Texas, tras un accidente y posterior incendio.

El 16 de septiembre, el **Júpiter**, que transportaba gasolina, arde por completo en City Bay, Michigan, por un incendio declarado a bordo.

El 11 de abril de 1991, el petrolero de bandera chipriota **Haven** protagonizó una explosión con

posterior incendio en el puerto de Génova (Italia), causando un vertido de 80.000 toneladas de crudo que generó una mancha de 25 km². Durante la guerra del golfo Pérsico, otras 460.000 toneladas fueron derramadas por efecto de los ataques aéreos a refinerías de petróleo y buques de transporte de crudo, que produjeron daños a toda la vida marina de la zona. Un efecto ecológico de importancia se dio cuando Irak intentó dificultar el avance aliado, arrojando al golfo más de una decena de millones de barriles de crudo. Está considerada como el mayor derrame petrolero de la historia

El año 1992 se despide con el accidente del **Aegean Sea** que encalla frente a la costa de La Coruña. El buque se incendia y se hunde, no sin antes generar una marea negra, y perderse en la atmósfera grandes cantidades de crudo en forma de una inmensa columna de humo.

El 5 de enero de 1993, el petrolero **Braer** naufraga en la costa de las Islas Shetland. Las 85.000 toneladas de petróleo que vierte dañan únicamente a las piscifactorías locales y poblaciones de aves marinas gracias a la acción favorable del viento, estado sumamente agitado del mar y densidad del petróleo derramado, que quedó dispersado en pocos días.

Quince días después, el petrolero de bandera danesa **Maersk Navigator**, con 255.000 toneladas de crudo, aborda frente a la isla Indonesia de Sumatra al petrolero japonés **Sanko Honor** con 96.000 toneladas.

El 10 de agosto, colisionan tres buques en la bahía de Tampa; el **Bouchard B155**, el **Balsa 37** y el **Ocean 255**. El **Bouchard B155** derramó alrededor de 84.000 litros de combustible que se extendió por toda la bahía.

El 18 de agosto, colisionan en el golfo de Fos-sur-mer (Francia), un petrolero y un submarino francés de propulsión nuclear, vertiéndose al mar unas 2.800 toneladas de petróleo. En este suceso, además del vertido, se suma el peligro de un accidente nuclear.

El año 1994 comienza con la explosión en el mar de China, a 530 Km. de Hong Kong, del petrolero con bandera de Malta **Cosmas**, que transportaba 23.000 toneladas de crudo. En octubre de ese año, en la antigua Unión Soviética, se vierten entre 60.000 y 80.000 toneladas de petróleo por la rotura de un oleoducto cerca de **Usinsk**, debido al abandono y corrosión de los materiales.

El 13 de marzo, colisionan en el Estrecho del Bósforo el petrolero **Nassia** y un carguero, ambos de bandera Chipriota, incendiándose y vertiéndose al mar unas 5.000 toneladas de crudo.

En febrero, el petrolero Liberiano **Sea Empress** embarranca en la costa de Gales, derramando 70.000 toneladas de crudo.

También en febrero, el petrolero de bandera panameña **San Jorge** encalla frente a las costas de Uruguay, derramando al mar una parte importante de las 80.000 toneladas de hidrocarburos que portaba en sus tanques.

En enero de de 1997, cinco millones de litros de combustible muy denso fueron vertidos en el mar del Este por el petrolero ruso **Najodka**, tratándose de la mayor catástrofe de este tipo en esa región en 20 años. La costa occidental del Japón quedó cubierta por densas manchas en cientos de kilómetros, causando graves daños a la industria

pesquera, reservas naturales, playas, etc.



El 12 de diciembre de 1999, el petrolero **Erika**, de bandera de Malta, cargado con 31.000 toneladas de combustible diesel-oil

pesado del nº 2, se hunde frente a las costas de Bretaña (Francia), provocando un gran desastre ecológico al derramar entre 7.000 y 10.000 toneladas de sus tanques. La marea negra que se generó alcanzó y devastó los recursos naturales a lo largo de unos 420 Km. de costa, además de sectores económicos clave de esa región, como el turismo o la pesca. La fauna quedó seriamente afectada, considerándose como la mayor catástrofe ornitológica sucedida en toda la zona del litoral atlántico; se estima que ocasionó la muerte de entre 100.000 y 300.000 aves.

En octubre de 2000, el petrolero panameño **Natuna Sea** derrama unas 7.000 toneladas de crudo frente al estrecho de Singapur.

El 16 de enero de 2001, el buque tanque **Jessica** de bandera ecuatoriana, durante una operación rutinaria de transporte de combustible, embarrancó frente al archipiélago de las Galápagos, desgarrando los tanques de estribor y derramando más de 600.000 litros de fuel-oil pesado y diesel-oil. El rápido despliegue para la recogida de residuos, el fuerte oleaje del lugar, y las características de las playas y litoral de las islas favorecieron las labores de limpieza y minimizaron la catástrofe.

En marzo del mismo año, colisionan dos buques de carga en el mar Báltico, provocando un vertido de 1.900 toneladas de crudo frente a las costas de Dinamarca.



Y llegamos al 19 de noviembre de 2002, cuando el petrolero **Prestige** se hunde después de varios días de maniobras

que ameritarán una aclaración sobre la responsabilidad de quienes tomaron algunas decisiones, cuando menos polémicas, a 133 millas del cabo Fisterra, y a 3.500 metros de profundidad, conservando en sus tanques unas 70.000 toneladas de fuel-óleo. Durante su remolque y posterior hundimiento, el **Prestige** generó una gran marea negra que alcanzó zonas muy sensibles de la costa gallega, bancos pesqueros y recursos marisqueros, además de afectar a decenas de miles de aves de diferentes especies. Posteriormente la marea negra alcanzó las costas de Asturias, Cantabria y Euzkadi.

El fenómeno de mareas es conocido desde la antigüedad. Parece ser que Piteas (siglo IV a. C.) fue el primero en señalar la relación entre la amplitud de la marea y las fases de la Luna así como su periodicidad. Plinio el Viejo (23-79) en su Naturalis Historia describe correctamente el fenómeno y piensa que la marea está relacionada con la Luna y el Sol. Mucho más tarde, Bacon, Kepler y otros trataron de explicar ese fenómeno, admitiendo la atracción de la Luna y del Sol. Pero fue Isaac Newton en su obra Philosophiae Naturalis Principia Mathematica ('Principios matemáticos de la Filosofía Natural', 1687) quien dio la explicación de las mareas aceptada actualmente. Más tarde, Pierre-Simon Laplace (1749-1827) y otros científicos ampliaron el estudio de las mareas desde un punto de vista dinámico. Isaac Newton realizó varios estudios científicos del comportamiento de las mareas y calculó la altura de éstas según la fecha del mes, la estación del año y la latitud. Más tarde, Simon Laplace complementó los estudios de Newton.

La catástrofe ecológica, en forma de marea negra, que se está sufriendo en el golfo de México no es, desgraciadamente, un caso excepcional. A lo largo de la historia se han

registrado accidentes similares, sin ningún tipo de discriminación geográfica, que han contaminado las aguas de todos los mares. Las más destacadas son las siguientes:

- Bahía de Campeche (México), 3 de junio de 1979. El buque plataforma mexicano *Ixtoc One* se rompió y vertió al mar 420.000 toneladas de crudo. La enorme marea negra afectó durante más de un año las costas de un área de más de 1.600 kilómetros cuadrados.

- Prince William Sound (Alaska), 24 de marzo de 1989. El buque norteamericano *Exxon Valdez* chocó contra un arrecife y vertió al agua 42.000 toneladas de petróleo. El accidente, que causó una marea negra de 6.000 kilómetros cuadrados, es aún considerado como el mayor desastre ecológico en la historia de EEUU.

- Golfo Pérsico, enero 1991. Este vertido de petróleo es el único de los destacados que no fue un accidente. El Gobierno de Irak arrojó más de un millón de toneladas de crudo de los pozos de Kuwait para dificultar el desembarco aliado. La mancha de petróleo se extendió alrededor de 3.200 kilómetros cuadrados e infligió enormes daños ecológicos.

- Komi (Rusia), agosto de 1994. La rotura de un oleoducto en la república autónoma causó una catástrofe ecológica de grandes dimensiones, al derramar entre 200.000 y 300.000 toneladas de petróleo sobre los campos de Usinsk y los ríos Usa y Kolva.

- Mar de Timor (Indonesia), 21 de agosto del 2009. Un derrame de gas y petróleo en dos plataformas petroleras de la compañía PTTEP Australasia causó un vertido de 450 toneladas de crudo que formó una extensa marea negra que cubrió 10.000 kilómetros cuadrados.

- Port Arthur (Tejas), 23 de enero del 2010. Un buque cisterna, de 182 metros de eslora que transportaba petróleo, y un barco grúa, que remolcaba una barcaza, colisionaron y derramaron 1.700 toneladas de crudo.

La costa es la zona limítrofe entre la tierra firme y el mar. Se encuentra constantemente sometida a la acción erosiva del agua, por lo cual adquiere formas muy diversas, dependiendo del tipo de terreno y de la actividad de las olas, mareas y corrientes marinas.

Tiene acantilados y playas, deltas y estuarios, y, a veces, aparece recortada en antiguos valles

inundados. Las corrientes marinas se llevan parte del material erosionado hacia el mar en unos lugares y lo deposita, desgastado, en otros. Así se forma un acantilado en un lugar y una playa en otro.

Las costas acantiladas son aquellas que terminan abruptamente en la línea de la costa. Por debajo del acantilado en sí mismo, de fuerte pendiente o vertical, están el punto de inflexión, justo encima de la línea de costa, y la plataforma suavemente inclinada hacia el mar, que puede ser arenosa o de cantos o rocosa.

La acción del oleaje y las corrientes marinas arranca material rocoso, lo acumula al pie del acantilado y forma un depósito que, al principio, queda bajo el agua pero después puede emerger formando una pequeña playa. La acción de las mareas también es importante, ya que durante un tiempo introduce agua entre las rocas, reblandeciéndolas, y durante el resto del día las deja a la intemperie para que actúen los agentes atmosféricos. Además, proporciona varios niveles de actuación de las olas.

El material aportado al océano por los ríos y retrabajado por la erosión del oleaje es distribuido a lo largo de las costas, donde forman playas, o

transportado por corriente marinas hacia la plataforma continental y las parte más profundas del océano.

Las playas son la expansión del balance entre la erosión marina producida por las olas, mareas y corrientes marinas y los aportes suministrados por la propia erosión marina desde otras zonas y por los ríos. Los agentes del modelado costero son las olas, las corrientes y las mareas.



El litoral gallego ha sido escenario en los últimos 32 años de seis catástrofes marítimas vinculadas con accidentes de buques en sus costas, cinco de éstos petroleros, el más reciente el Prestige, en noviembre de 2002. Completa la lista el siniestro frente a Fisterra del "Casón", que cargaba 2. 000 bidones con productos altamente tóxicos que arrasaron el marisqueo en una franja de cien kilómetros.

"Polycomander", "Urquiola", "Andrios Patria", "Mar Egeo",

y "Prestige" son los nombres de los buques accidentados en el litoral gallego desde 1970 y que provocaron, consecuentemente, cinco mareas negras. El Casón, por tratarse su carga de productos químicos (sodio metálico, exileno, ácido sulfúrico, resina en solución, difenilmetano y anilina, entre otros).

No obstante, eran altamente tóxicos y su combustión frente a la Costa da Morte en 1987 causó la alarma en los municipios de Cee, Corcubión y Fisterra, además de la muerte de 21 de los 31 tripulantes. En todo caso, todos éstos ocasionaron los peores desastres ecológicos conocidos en el litoral de Galicia.

Estos seis accidentes en 32 años revelan una media de un accidente grave en las costas gallegas cada cinco años, una cifra en la que pesa el dato de que frente al litoral de la comunidad navegan una media diaria de 38 buques con mercancías potencialmente peligrosas, lo que anualmente supone unos 14. 000.

El petrolero "Polycommander" es el primero de la lista de estos seis graves accidentes en estas tres décadas. En 1970 embarrancó a la entrada de la Ría de Vigo y el crudo que vertió afectó al parque natural de las Illas Cíes.

Seis años más tarde, en 1976, el "Urquiola" naufragó en la ría de A Coruña con 108. 000 toneladas de petróleo

a bordo, el incendio provocó una gran humareda negra. El capitán del barco murió al permanecer en el buque hasta el último momento. En la catástrofe se derramaron 100.000 toneladas que llegaron hasta la ría de Betanzos, Ferrol y Ares.

La costa coruñesa volvió a ser escenario de un nuevo accidente dos años más tarde, en 1978, cuando el "Andrios Patria" sufrió una vía de agua en sus depósitos y, casi una década después, en 1987, encalló en la Costa da Morte el carguero "Casón".

Las rías de O Burgo, Ares, Betanzos y Ferrol volvieron a soportar en 1992 la afectación del vertido de más de 80.000 toneladas de crudo del petrolero de bandera griega "Mar Egeo", procedente del Mar del Norte y con destino a la refinería Repsol en A Coruña y que embarrancó frente a la Torre de Hércules, en la capital herculina.

Finalmente, la catástrofe más reciente en el litoral gallego ha sido la del "Prestige", que vertió 63.000 toneladas de crudo desde que se accidentó el 13 de noviembre de 2002, mientras que las 14.000 toneladas restantes que transportaba permanecieron en los tanques del petrolero, que se hundió a 260 kilómetros de la costa de la comunidad, tras partirse por la mitad el 19 de noviembre.

En noviembre de 2002, el hundimiento del petrolero “Prestige” fue un episodio que vino a sumarse a la larga y siniestra letanía de desastres ecológicos: Urquiola, Casón, Mar Egeo, Erika.

Una monotonía en la que los distintos gobiernos han demostrado su escasa voluntad política para adoptar medidas

tendientes a solucionar el problema de fondo, más allá de las declaraciones de rigor y la propaganda institucional. El negocio de la energía que mueve el mundo no se ralentizó por la catástrofe del “Prestige”. Una y otra vez se ha constatado la falta de medidas preventivas eficaces frente a estas catástrofes, la ausencia de planes de acción previos, la escasez de recursos, la inoperancia, la descoordinación...

En el caso del “Prestige”, la inoperancia del Gobierno español y la Xunta de Galicia alcanzó cotas difícilmente superables, mientras en un primer momento se optaba por una política sistemática de desinformación y censura sobre el alcance y las consecuencias del vertido.

Cinco años después del hundimiento del “Prestige”, las costas españolas siguen sin contar con sistemas de vigilancia adecuados y los tribunales no se han pronunciado sobre los culpables.

Como reacción contra todo ello, a partir de las más diversas organizaciones sociales y políticas, entre las que se encuentra Ecologistas en Acción, se constituyó en Galicia la Plataforma Ciudadana “NUNCA MÁIS”, cuyo objetivo es impedir la repetición de nuevos desastres ecológicos y exigir la reparación de los daños sociales, ambientales y económicos causados por la marea negra. Su significado, no obstante, ha trascendido el ejemplo concreto para convertirse en un símbolo de la rabia y la impotencia de las miles de familias que vieron sacudidas sus vidas con el accidente y los miles de kilómetros de costa que vieron trastocada para siempre su riqueza natural.

El fenómeno del voluntariado fue la nota positiva. Miles de personas llegaron a Galicia desde todas partes de España

para demostrar que la solidaridad de la calle, al contrario que la clase política, estaba a la altura de las circunstancias.

Un año después de la peor catástrofe ecológica vivida en España, Gobierno del Partido Popular y oposición (PSOE) hacen una valoración muy diferente del año transcurrido tras la tragedia.

Mientras para el Ejecutivo Popular el problema está prácticamente solucionado, el Bloque Nacionalista Galego y el PSOE acusan al Gobierno de triunfalismo.

Pasado este período, las investigaciones siguen siendo complicadas. Los tribunales aún no se han pronunciado sobre a quiénes hay que considerar los culpables del desastre.

Además del Juzgado de Corcubión, que investiga los hechos, hay denuncias en Estados Unidos contra la sociedad inspectora de buques que dio el visto bueno para navegar al “Prestige”. También el Gobierno Central y el Ejecutivo vasco han demandado allí a la sociedad inspectora estadounidense.

Un informe elaborado por un equipo de investigadores de la Universidad de La Coruña, con más de mil muestras recogidas entre enero y marzo de 2003 en las playas y costas españolas, cuestiona los controles alimenticios de la Junta de Galicia y pone en duda los parámetros marcados por el gobierno gallego para medir la toxicidad de mariscos, pescados y moluscos. Los expertos consideran que son límites muy permisivos y desconfían de los datos oficiales.

Los investigadores advierten de que, aunque las muestras fueron recogidas hace siete meses, la contaminación puede durar años en la cadena alimenticia, algo omitido en los discursos autocomplacientes que destacan la rapidez con la que el pueblo gallego ha superado la tragedia.

El informe considera que la Junta actuó precipitadamente al abrir las zonas de pesca y marisco, ya que en el caso del “Erika”, en Francia, estuvo prohibido faenar durante más de un año. En Alaska, con el “Exxon Valdez”, hubo zonas cerradas durante casi una década. Pese a ello, desde la Junta de Galicia Popular y desde el gobierno se insiste en que “no hay incidencias en la cadena alimenticia” y que la calidad de los productos gallegos está asegurada.

Mucho por hacer:

Pese a que en los últimos meses se ha avanzado en proyectos piloto para la extracción del fuel que queda aún en el interior del barco, los medios de salvamento marítimo en la zona de Galicia apenas han variado un año después.

El Instituto Español de Oceanografía estimaba, en un

informe de 2003, que en los fondos marinos de la plataforma de Galicia aún quedan unas 526,3 toneladas de combustible.

El ministerio de Fomento y la Xunta de Galicia se han apresurado a informar, un año después del desastre, sobre la próxima construcción de remolcadores y barcos de salvamento.

Según los expertos, esos buques no estarán en funcionamiento hasta dentro de al menos tres años. Tampoco se ha elaborado ningún nuevo protocolo de actuación para un nuevo accidente, ni se han producido ceses ni dimisiones entre los dirigentes que tuvieron alguna intervención en el caso "Prestige". Es más, según el diario "El País", se han producido algunos ascensos de personas involucradas en la gestión de la crisis.

Consecuencias legales Pese a las enormes deficiencias respecto a los sistemas de defensa poseídos y a la confusión sobre las decisiones de las horas previas al hundimiento, las autoridades se volcaron en anunciar grandes partidas presupuestarias destinadas a los afectados.

Si hay algo que ha puesto de relieve el accidente del "Prestige" ha sido la ineficacia de la normativa para proteger el mar de la contaminación que se deriva del

tráfico marítimo.

Desde que sucedió la catástrofe, algunas de las peticiones de organizaciones como Adena o Greenpeace han sido en parte atendidas en los acuerdos alcanzados por los Ministros de Transportes europeos y en las normativas aprobadas por el gobierno español. Para disminuir el riesgo de mareas negras, la UE prohibió la entrada y salida de los puertos europeos de buques petroleros de casco único.

El gobierno español ha restringido aún más este punto al impedir que transiten por nuestras aguas este tipo de embarcaciones cualquiera que sea su bandera. Sin embargo, estas prohibiciones afectan únicamente al transporte de fueles pesados, que suponen sólo el 7 por ciento del total de hidrocarburos transportados.

Se ha intentado aumentar el control y las inspecciones para reducir el número de buques que incumplen las normas de seguridad y contaminación, cuyo grado de cumplimiento a nivel internacional será comprobado por la Organización Marítima Internacional (OMI). Se ha establecido un aumento del control sobre las sociedades de clasificación y la posibilidad de que respondan de los daños cuando se determine que están causados por una acción u omisión negligente imputable a dichas organizaciones.

Aunque la Comisión Europea ha propuesto que se incrementen los límites de indemnización en caso de producirse mareas negras graves hasta 1.000 millones, colectivos sociales y ecologistas creen que los operadores relacionados con el transporte de sustancias peligrosas deberían cubrir todos los gastos ocasionados, incluidos los gastos

Un poco de historia:

La primera gran catástrofe de la historia de las mareas negras fue de tal envergadura que generó una honda preocupación en todo el mundo, a pesar de que la conciencia social sobre nuestro medio ambiente empezaba a despuntar, y que los movimientos ecologistas aún no se encontraban en todo su apogeo, ni gozaban del crédito que se le dan en la actualidad.

El superpetrolero Torrey Canyon, de 120.000 t.p.m., viajaba el 18 de marzo de 1967 a 17 nudos de velocidad cuando golpeó contra los arrecifes de Seven Stones, en el archipiélago de las Scilly, al Suroeste de Cornwall (Inglaterra), el violento impacto rasgó y abrió seis de sus tanques, además de dejar otros muy maltrechos.

120.000 toneladas de crudo rápidamente fueron derramadas de sus tanques (unos 860.000 barriles) ayudadas por los golpes de mar, generaron en unos pocos días una inmensa marea negra, que alcanzó las costas y playas de Cornwall, isla de Guernsey y litoral francés de la Bretaña, principalmente en la comarca de Treguier.

Las bahías y ensenadas de Cornwall quedaron sumergidas en una negra, espesa, y letal sustancia que destruyó todo a su paso. Mas de 200.000 aves murieron y la industria de la pesca quedó completamente arruinada. Nunca antes se había enfrentado la humanidad a un accidente de este nivel y características.

Las fuerzas armadas se dispusieron a combatir el desastre, mientras las autoridades locales, con un ejército de civiles, luchaban sin descanso intentando salvar playas y costas. La mancha de crudo cubría una superficie aproximada de unos 70 kilómetros de largo por 40 de ancho. En un intento por atajar semejante vertido, se realizaron todo tipo de trabajos, aunque de forma improvisada y arbitraria. La falta de experiencia en este tipo de accidentes produjo consecuencias peores que las que se pretendían evitar, al procederse a la dispersión de ingentes cantidades de detergentes (15.000 toneladas), que se sumaron al derrame

causando una contaminación de considerables proporciones, que afectaron gravemente a la flora y fauna de la zona.

Las autoridades, conscientes del enorme desastre que estaban viviendo, y a la vista de las inmensas proporciones de la marea negra, que terminaría llevando a la miseria todo lo que tocara, tomaron la decisión de bombardear el crudo y el buque para que ardieran.

Durante tres días seguidos, ocho aviones dejaron caer 1.000 bombas, 44.000 litros de queroseno, 12.000 litros de napalm y 16 misiles. Una columna de humo negro y espeso que ocultaba el sol completamente, podía ser divisada desde cualquier punto como si se perdiera en el confín de la Tierra, en un espectáculo sobrecogedor.

Finalmente, el viernes 21 de abril de 1967 el Torrey Canyon desapareció de la vista, pero las gravísimas consecuencias del accidente se mantendrían vigentes durante mucho tiempo. El nombre de Torrey Canyon permanecerá siempre en la historia de las mareas negras como un símbolo de devastación.

1969:

El 28 de enero, sólo dos años después de la catástrofe del Torrey Canyon, se volvió a repetir otra catástrofe de características parecidas, esta vez sobre las costas de California. Un pozo offshore que trabajaba frente a

las playas norteamericanas, derramó una considerable cantidad de crudo que contaminó una extensa zona del canal de Santa Bárbara.

A pesar de la conmoción en la opinión mundial, particularmente en la norteamericana, sólo cuatro meses después del accidente el pozo entraba de nuevo en servicio.

Según el Tanker Advisory Center de Nueva York, en un corto periodo de 5 años solamente (entre 1969 y 1973), se perdieron en todo el mundo 82 petroleros, con un total de 3.299.000 t.p.m., derramando en conjunto unas 719.000 ton. de petróleo. Hasta finales de 1974 se habían contabilizado en todo el mundo, alrededor de quinientos accidentes con pérdidas de crudo.

1970:

El 5 de mayo, embarrancó y se incendió próximo a las islas Cíes (Vigo - Pontevedra - NO (noroeste) de España) el Polycommander, de 50.380 tn. vertiéndose un total de unas 13.000 tn. (los informes detallados hablan de 400.000 barriles) de crudo que afectaron a las localidades de Baiona y Panxón.

El 9 de agosto, embarrancaba en el estrecho de Magallanes el Metula, de 206.700 tn., perdiéndose 50.000 tn. de petróleo y arruinando 150 km. de costa chilena.

Durante el último trimestre de este año se registraron mareas negras en la bahía de Bantý (Irlanda), en

Normandía, provocada por el choque de dos petroleros, y también en el puerto de Marsella debido a la falsa maniobra de otro petrolero.

1971:

El 29 de marzo, el petrolero estadounidense "Texaco Oklahoma" naufraga a cien millas de cabo Hatteras (costa este de EEUU) vertiendo al mar 32.900 toneladas.

1972:

El 11 de junio, El "Trader" naufraga a unas 180 millas al sur de Grecia, perdiéndose 35.000 toneladas.

El 21 de agosto, la colisión de dos petroleros liberianos, el "Taxanita" y el "Oswego Guardian", en el litoral de Sudáfrica, provocó el derrame de 10.000 toneladas de crudo.

El 19 de diciembre, el "Sea star" se hunde en el Golfo de Amán y 115.000 toneladas de petróleo caen al mar.

1975:

El 7 de junio, el petrolero japonés "Showa Maru" naufraga en el estrecho de Malaca, en el océano Indico, con 237.000 toneladas de petróleo en su interior.

1976:

El 24 enero, el buque francés "Olimpyc Braveary", con

una carga de 250.000 toneladas de petróleo, se partió en dos frente a la costa norte de Quessant, en Francia.

El 12 de mayo, el “Urquiola”, de 111.225 tn. embarrancó en la rada de A Coruña (NO de España), derramando unas 20.000 toneladas, que produjeron graves daños a las costas de las rías de El Ferrol, Ares y A Coruña.

1978:

El 16 de marzo, el petrolero “Amoco Cádiz” embarranca y derrama 1,6 millones de barriles de crudo frente a las costas francesas de Bretaña. Este vertido se encuentra en la lista de los más grandes de la historia.

1979:

El 3 de junio, el pozo petrolífero “IXTOC I” es protagonista de otro de los vertidos más grandes de todos los tiempos (sólo eclipsado por los vertidos provocados en la Guerra de Golfo de 1991) al derramar 560 millones de litros de hidrocarburos en la bahía de Campeche, Ciudad del Carmen, en el golfo de México.

En julio, se produjo un inmenso vertido de unas 141.000 toneladas, debido a la colisión de los petroleros “Aegean Captain” y “Atlantic Empress”, cerca de Trinidad y Tobago.

El 1 de noviembre, el "Burmah Agate" colisionó con el Mimosa, al SE (sudeste) de Galveston Entrance, en el Golfo de México.

Se estimó un vertido de hidrocarburo de solo 650.000 litros en el medio marino, sin embargo, alrededor de 1.900.000 litros ardían y se perdían en la atmósfera.

1983:

El 5 agosto de 1983, el naufragio del petrolero español "Castillo de Bellver" frente al cabo de Buena Esperanza, en la costa sudafricana, causó el vertido al mar 250.000 toneladas de crudo. La corrosión del petrolero español Castillo de Bellver, que naufragó en 1983 en las costas sudafricanas, provocó un nuevo escape en el buque que aún contenía más de 100.000 litros de crudo en su interior el 25 junio 1994.

1989:

El 24 de marzo, el petrolero "Exxon Valdez" derramó más de 40 millones de litros de crudo (entre 40 y 50.000 tn.) en el Prince William Sound, Alaska, afectando a una de las más importantes reservas ecológicas norteamericanas.

En una sola semana generó una marea negra de 6.700 km², poniendo en peligro la fauna silvestre y las pesquerías de la zona. Este desastre es considerado uno de los más grandes en la historia de las mareas negras.

El 28 de junio, el petrolero de bandera maltesa "Puppy" choca contra otro navío a 1.350 millas de Bombay (India). Se derraman 40.000 toneladas.

El 19 de diciembre, el "Khark 5" iraní se accidenta en las costas marroquíes y vierte más de 25.000 toneladas de crudo al Atlántico.

1990:

El 6 de marzo, el "Cibro Savannah", explota y se incendia en Linden, New Jersey (EEUU), vertiendo alrededor de 32.000 litros de hidrocarburos.

El 8 de junio, el "Mega Borg" derramó 20,5 millones de litros de hidrocarburos a 60 millas al sur-sureste de Galveston, Texas (EEUU), tras un accidente y posterior incendio.

El 16 de septiembre, el "Júpiter", que transportaba gasolina, arde por completo en City Bay, Michigan (EEUU), por un incendio declarado a bordo.

1991:

El 25 de enero, Irak arrojó al golfo Pérsico unos 11 millones de barriles de crudo de los pozos de Kuwait para dificultar el desembarco aliado, causando el mayor desastre ecológico de la historia.

El 11 de abril, el petrolero chipriota "Haven" se incendió

debido a una explosión en el puerto italiano de Génova y derramó 80.000 toneladas de crudo que causaron una mancha de 25 kms cuadrados.

1992:

El 13 de diciembre, el "Mar Egeo" ("Aegean Sea") encalla frente a la costa de A Coruña (NO de España) donde se incendia y hunde posteriormente, las subvenciones tardan 10 años en llegar a los afectados.

La Agencia Espacial Europea que en 1991 había lanzado el satélite ERS-1 provisto de un sensor radar cuyas propiedades permiten observar la Tierra a través de la nubes captó la imagen de la marea negra producida por el petrolero.

1993:

El 5 de enero, el petrolero "Braer" naufraga en la costa de las Islas Shetland. Las 85.000 toneladas de petróleo (680.000 barriles) que vierte, causa daños únicamente a las piscifactorías locales y poblaciones de aves marinas gracias a la acción favorable del viento, estado sumamente agitado del mar y densidad del petróleo derramado, que quedó dispersado en pocos días.

El 20 de enero, el superpetrolero danés "Maersk Navigator", con unas 255.000 toneladas de crudo, chocó contra el japonés "Sanko Honor", con 96.000 toneladas, frente a la isla indonesia de Sumatra.

El 10 de agosto, colisionan tres buques en la bahía de Tampa; el "Bouchard" B155, el Balsa 37 y el Ocean 255. El Bouchard B155 derramó alrededor de 84.000 litros de combustible del nº 6 que se extendieron por toda la bahía.

El 18 de agosto, un submarino francés de propulsión nuclear y un petrolero colisionaron en el golfo de Fos-sur-Mer, en la costa mediterránea gala, y unas 2.800 toneladas de hidrocarburos se derramaron en el mar.

1994:

El 24 de enero, el petrolero maltés "Cosmas" explotó en el mar de China, a 530 kms al SE de Hong Kong, cuando transportaba 23.000 toneladas de crudo.

13 marzo de, el petrolero "Nassia", con 98.000 toneladas de crudo, y un carguero, ambos chipriotas, se incendiaron tras chocar en el Estrecho del Bósforo, 5.000 toneladas de crudo se vertieron al mar.

1996:

El 15 de febrero, el petrolero de bandera liberiana "Sea Empress" embarrancó en la costa suroeste de Gales, derramando 70.000 toneladas de crudo.

1997:

El 2 de enero, un fuerte temporal hizo naufragar a unos

160 kms de las costas de la isla nipona de Oki, en el Mar del Japón, al petrolero ruso "Najodka", cargado con 19.000 toneladas de crudo, que formaron una mancha de petróleo de unos 1.800 metros de largo y de entre 100 y 500 de ancho. La costa occidental del Japón quedó cubierta por densas manchas en cientos de kilómetros, causando graves daños a la industria pesquera, reservas naturales, playas, etc.

El 8 de febrero, el petrolero panameño "San Jorge" encalló frente a las costas uruguayas vertiendo al mar parte de las 80.000 toneladas de petróleo y combustibles que llevaba.

1999:

El 12 de diciembre, el petrolero "ERIKA" de 180 mts. de eslora se hundía tras partirse en dos al SO de Penmarc'h (Finistère, Francia). Provoca un desastre ecológico al vertir 10.000 tn. de petróleo que contaminan 400 km. de costa. Esta catástrofe desencadena una serie de medidas (conocidas como Erika I y Erika II) por parte de la Comisión Europea para evitar que desastres así vuelvan a producirse.

2000:

El 3 de octubre, el petrolero de bandera panameña "Natuna Sea" vierte 7.000 toneladas de crudo frente al estrecho de Singapur.

2001:

El 19 de enero, el buque tanque “Jessica” de bandera ecuatoriana, embarrancó frente al archipiélago de las Galápagos, mítico paraíso en el que Darwin basó su famosa teoría de la evolución de las especies.

Produce un derrame de más de medio millón de litros de combustible después de encallar, debido a un error de navegación, en las inmediaciones de la isla San Cristóbal. Era un buque de mediano porte que realizaba un abastecimiento de rutina de combustible a las islas. La amenaza de contaminación a uno de los más importantes santuarios naturales de aves, tortugas e iguanas del mundo lleva a requerir a Ecuador la asistencia en las tareas de recuperación a grupos especializados de otros países.

El rápido despliegue para la recogida de residuos, el fuerte oleaje del lugar, y las características de las playas y litoral de las islas favorecieron las labores de limpieza.

Afortunadamente, aunque inicialmente se consideró que se había producido un gran desastre ecológico, posteriormente se comprobó que, aunque preocupante, no tenía el alcance que se le había

atribuido.

El 28 de marzo, el choque entre dos barcos de carga en el mar Báltico provoca el vertido de 1.900 toneladas de petróleo frente a las costas de Dinamarca.

2002:

18 de noviembre, el petrolero "Prestige" después de navegar con una brecha en su casco de 40 metros por la que vierte entre 12 y 15.000 toneladas de fuel al mar, se parte en dos a 133 millas del cabo Fisterra- A Coruña (NO de España), y se hunde con 77.000 toneladas en sus tanques, el fuel que transportaba es del tipo pesado (del tipo nº2 según la clasificación francesa, por su contenido en azufre o M-100 según la clasificación rusa). Se emplea en la combustión industrial (centrales térmicas, hornos, cementeras) y el suministro de barcos propulsados por motores diesel lentos, de gran potencia. Los fueles pesados son los residuos de la destilación de los petróleos crudos. Para facilitar la mezcla de los residuos pesados procedentes de la destilación, a menudo se añaden sustancias de destilación más ligeras, llamadas "cutter stock".

Provoca un enorme desastre ecológico, con 900 km. de costa afectados por las sucesivas mareas negras. La aparición de fisuras en el casco hace emerger el crudo a la superficie, la velocidad de estos nuevos

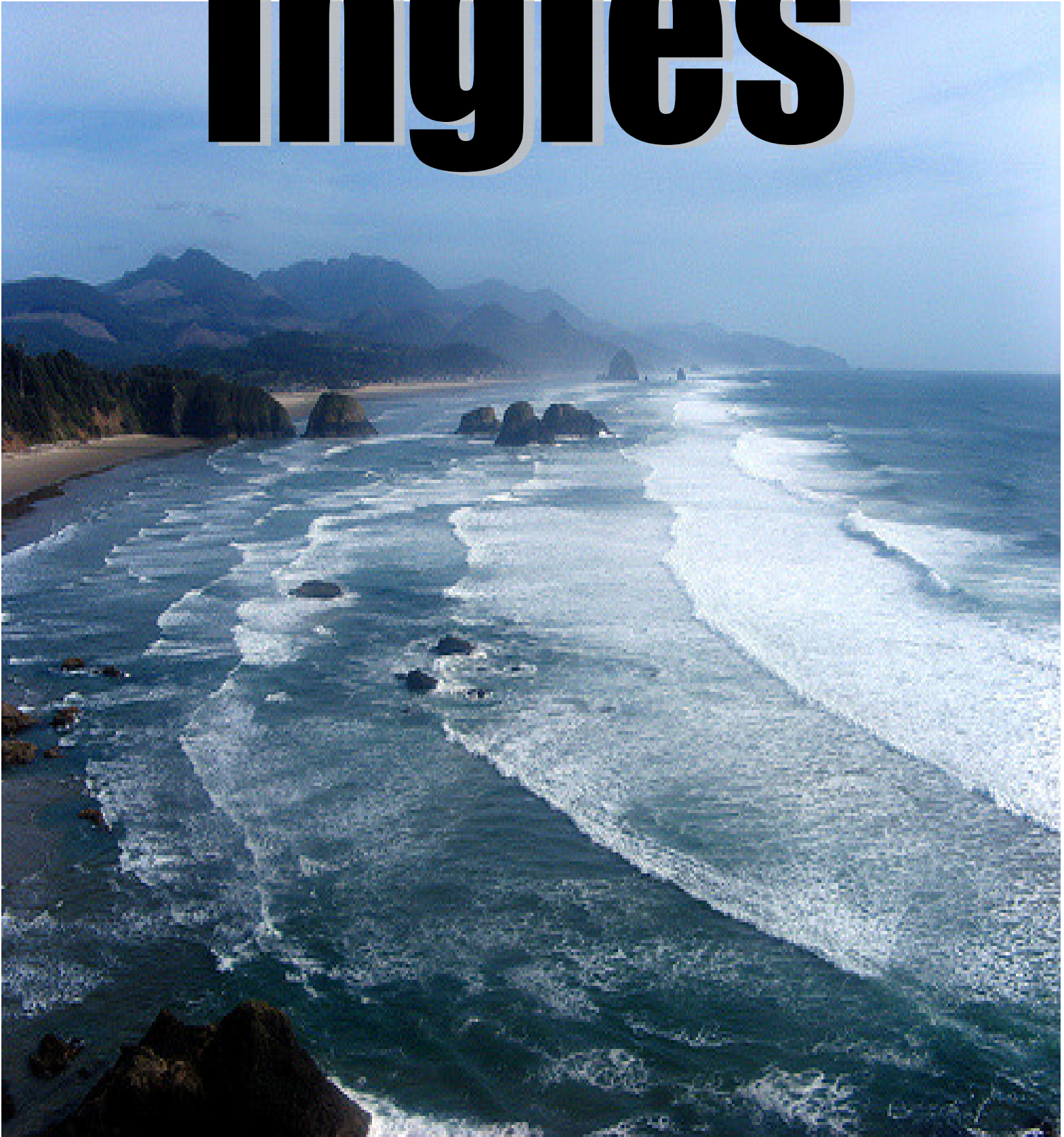
vertidos dependerá de las condiciones de la zona en especial de la temperatura en el fondo y la aparición de nuevas grietas por efecto de la presión.

Historia de estudio de las mareas:

El fenómeno de mareas es conocido desde la antigüedad. Parece ser que Piteas (siglo IV a. C.) fue el primero en señalar la relación entre la amplitud de la marea y las fases de la Luna así como su periodicidad. Plinio el Viejo (23-79) en su *Naturalis Historia* describe correctamente el fenómeno y piensa que la marea está relacionada con la Luna y el Sol. Mucho más tarde, Bacon, Kepler y otros trataron de explicar ese fenómeno, admitiendo la atracción de la Luna y del Sol. Pero fue Isaac Newton en su obra *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* ('Principios matemáticos de la Filosofía Natural', 1687) quien dio la explicación de las mareas aceptada actualmente.

Más tarde, Pierre-Simon Laplace (1749-1827) y otros científicos ampliaron el estudio de las mareas desde un punto de vista dinámico. Isaac Newton realizó varios estudios científicos del comportamiento de las mareas y calculó la altura de éstas según la fecha del mes, la estación del año y la latitud. Más tarde, Simon Laplace complementó los estudios de Newton.

Inglés



Tide

Tide is the periodic change of the level of the sea, produced principally by the gravitational forces that exercise the Moon and the Sun. Other phenomena can produce variations of the level of the sea. One of the most important is the variation of the atmospheric pressure. The tidal phenomenon known since antiquity. It seems that Pytheas (fourth century BC) was the first to point out the relationship between the amplitude of the tide and moon phases and the frequency thereof. Pliny the Elder (123-97) in his *Naturalis Historia* correctly describes the phenomenon and think that the tide is related to the Moon and the Sun. Much later, Bacon, Kepler and others tried to explain this phenomenon, acknowledging the attraction of Moon and the Sun. But it was Isaac

Newton in his *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* ("Mathematical Principles of Natural Philosophy", 1687) who gave the explanation of the tides currently accepted. Later, Pierre-Simon Laplace (1749-1827) and other scientists expanded the study of tides from a dynamic point of view. . Isaac Newton made a number of scientific studies of the behavior of the tides and calculated the height of these, as the date of the month, season and latitude. LaLater, Simon Laplace complemented the studies of Newton.

Later there are gathered the principal terms used in the description of the tides:

- High tide or tide: moment in which the water of the sea reaches his maximum height inside the cycle of the tides.
- Tide goes down or low tide: opposite moment, in which the sea reaches his minor height.

The ellipsoide due to the solar tides has the major axis directed to the Sun. The ellipsoide due to the lunar tides has the major axis directed to the Moon. As the Moon it turns about the Earth, the major axes of the ellipsoides do not turn to the same speed. With regard to you her star, the period of rotation of the solar ellipsoide is one year. When the major axes of the two ellipsoides are aligned, the extent of the tides is maximum and they are called alive tides or you annoy sizigias. This happens in the new lunas and in the full lunas. On the other hand, when the major axis of every ellipsoide is aligned by the minor axis of other one, the extent of the tides is minimal. This happens in the diminishing quarters and the increasing quarters. These tides are called dead tides or tides of squaring.

Cívica y Ética





© Clark Little / SWNS.COM

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 Centrifuga

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.

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.