

materia

Portos e Costas

unidade didáctica 4

Mareas

Rodrigo Carballo Sánchez, Gregorio Iglesias
Rodríguez e Marcos Sánchez Carricoba
Departamento de Enxeñaría Agroforestal
Escola Politécnica Superior



VICERREITORÍA DE ESTUDANTES,
CULTURA E FORMACIÓN CONTINUA

titulación

Grao en Enxeñaría Civil



unidade didáctica 4

Mareas

Rodrigo Carballo Sánchez, Gregorio Iglesias
Rodríguez e Marcos Sánchez Carricoba
Departamento de Enxeñaría Agroforestal
Escola Politécnica Superior



© Universidade de Santiago de Compostela, 2011

Deseño

Unidixital

Edita

Vicerreitoría de Estudantes, Cultura
e Formación Continua da
Universidade de Santiago de Compostela
Servizo de Publicacións
da Universidade de Santiago de Compostela

Imprime

Unidixital

Servizo de Edición Dixital da
Universidade de Santiago de Compostela

Dep. Legal: C 2365-2011

ISBN 978-84-9887-779-3

ADVERTENCIA LEGAL: reservados todos os dereitos.
Queda prohibida a duplicación, total ou parcial desta
obra, en calquera forma ou por calquera medio (elec-
trónico, mecánico, gravación, fotocopia ou outros) sen
consentimento expreso por escrito dos editores.

MATERIA: Portos e Costas
TITULACIÓN: Enxeñaría Civil
PROGRAMA XERAL DO CURSO
Localización da presente unidade didáctica

Unidade I. Introducción á Enxeñaría de Portos e Costas

BLOQUE TEMÁTICO I: PROCESOS LITORAIS

Unidade II. Ondas de gravidade. Ondada

Unidade III. Mecánica Ondulatoria

Unidade IV. Mareas

Introdución

Teoría de Equilibrio

Teoría Dinámica

O Método Harmónico

Outras variacións no nivel do mar

Exercicios propostos

Unidade V. Correntes litorais

Unidade VI. Transporte de sedimento

Unidade VII. Morfodinámica de praias

BLOQUE TEMÁTICO II: ACTUACIÓNS NO LITORAL

Unidade VIII. Actuacións na Costa

Unidade IX. Obras Portuarias

Unidade X. Xestión Integral da Zona Litoral

ÍNDICE

Presentación	7
Os Obxectivos	7
Os principios metodolóxicos	8
Os contidos básicos	9
1. Introducción	9
2. Teoría de Equilibrio.....	11
2.1. Fundamentos	11
2.2. Marea lunar.....	11
2.3. Marea solar.....	14
2.4. Interacción da marea lunar e solar	15
2.5. Variacións na marea.....	15
3. Teoría Dinámica	16
3.1. Fundamentos	16
3.2. Sistemas Anfidrómicos	17
3.3. Resonancia e Converxencia.....	19
4. O Método Harmónico.....	20
4.1. Fundamentos	20
4.2. Tipos de mareas	22
5. Outras variacións no nivel do mar	23
5.1. A marea meteorolóxica.....	23
5.2. Variacións de longo prazo	24
Exercicios propostos.....	25
Actividades propostas	25
Avaliación da UD	26
Bibliografía	26

PRESENTACIÓN

A presente Unidade Didáctica (en diante UD) encádrase dentro do Bloque Temático I da materia (Procesos Litorais), onde se caracterizan os distintos procesos que determinan o deseño das distintas actuacións no litoral (Bloque II). Para iso, é preciso coñecer o clima marítimo ao que estarán sometidas. Unha vez definidas as condicións da ondada (UD 2 e 3) resulta imprescindible ademais coñecer as variacións do nivel do mar.

O nivel do mar é unha variable de importancia capital na zona litoral. As súas variacións a curto prazo (horas ou días) repercuten sobre todos os procesos litorais, desprazando vertical e horizontalmente a zona da costa que recibe a enerxía da ondada, e polo tanto constituíndo un elemento esencial en calquera proxecto no ámbito da Enxeñaría de Portos e Costas. Estas oscilacións a curto prazo débense fundamentalmente, e salvo casos excepcionais, á marea astronómica. Aínda que as forzas causativas quedan explicadas pola Teoría de Equilibrio desenvolta por Newton, é preciso expoñer tamén a Teoría Dinámica de Laplace e o concepto de *Onda de Marea*, co obxecto de que os alumnos comprendan certos aspectos relevantes como a influencia da xeometría e profundidade dos océanos, mares e estuarios. Do mesmo xeito, explícanse outros conceptos básicos á hora de predicir a marea como é a análise harmónica. Finalmente, introducirase ao alumno a outro tipos de variacións no nivel do mar a curto prazo, como son as debidas á marea meteorolóxica, así como de longo prazo e que, en ocasións, poden chegar a ter unha incidencia importante sobre as distintas actuacións que o enxeñeiro civil realiza na zona litoral.

OS OBXECTIVOS

O obxectivo xeral desta UD é que o alumno coñeza as diferentes teorías e métodos existentes de modo que sexa capaz de determinar os niveis do mar e os seus efectos nunha determinada zona costeira. Con este fin fórmulanse os seguintes obxectivos específicos:

- Coñecer as distintas teorías que explican as variacións do nivel do mar a curto prazo debidos á marea astronómica.
- Coñecer o comportamento da onda de marea nos diferentes corpos de auga: océanos, mares e estuarios.
- Ser capaces de determinar os niveis do mar nunha localización xeográfica concreta.
- Determinar as posibles implicacións das variación do nivel do mar noutros procesos litorais.

OS PRINCIPIOS METODOLÓXICOS

A metodoloxía de ensino utilizado axustarase ás pautas do Espazo Europeo de Educación Superior (EEES), que computa as horas totais de traballo do alumno como a suma das horas presenciais e as horas non presenciais. O traballo non presencial inclúe toda unha serie de tarefas que os alumnos realizarán fóra das horas lectivas e que teñen como finalidade a preparación e o estudo posterior das actividades realizadas nas sesións presenciais. A continuación, detállanse as distintas actividades que o alumno realizará ao longo do desenvolvemento da presente UD:

- 1) **Clases expositivas.** Consistirán na presentación e desenvolvemento dos contidos teóricos fundamentais da materia que se realizará mediante clases en grupos grandes e de carácter principalmente maxistral. Os alumnos, ademais de asistiren e aproveitaren as explicacións realizadas durante o desenvolvemento das clases, deberán dedicar un determinado tempo á preparación previa dos contidos que se tratarán na clase, así como ao seu estudo posterior. Co fin de fomentar o traballo diario do alumno, dentro desta UD prográmase un control "tipo test".
- 2) **Seminarios interactivos.** Os seminarios están concibidos como un conxunto de actividades nos que a participación do alumnado é parte fundamental. Durante o seu desenvolvemento, os alumnos resolverán exercicios e problemas, fundamentalmente en grupos, que lles permitan poñer a punto e aplicar de forma práctica os coñecementos teóricos derivados das clases expositiva. Do mesmo xeito, tamén se formularán cuestións de difícil comprensión que deberán ser resoltas polo alumnado. Para o desenvolvemento axeitado dos seminarios será precisa a preparación previa dos contidos que se tratarán en cada unha das sesións. Con este fin, tanto os boletíns de exercicios e problemas como as cuestións serán facilitadas coa suficiente antelación. Finalmente, durante as sesións de seminarios interactivos os alumnos presentarán e defenderán un traballo de grupo (ver apartado correspondente).
- 3) **Prácticas.** Mostraranse ao alumno as diferentes partes das que consta un estudo de clima marítimo, así como a forma de proceder para a súa elaboración no que corresponde o estudo das mareas. Vinculadas ás practicas propónse unha actividade de grupo (ver apartado correspondente).
- 4) **Titorías en grupo e individuais.** Atenderase ao alumnado para discutir, comentar, aclarar e resolver cuestións concretas en relación as súas tarefas dentro da unidade didáctica. As titorías tamén permitirán ao profesor realizar un seguimento do traballo desenvolvido, así como verificar o correcto funcionamento dos grupos durante os seminarios interactivos e as actividade propostas.

OS CONTIDOS BÁSICOS

1. Introducción

O cambio máis aparente no nivel do mar é o asociado coa marea. Esta variación pode chegar a ser de varios metros nun mesmo día, sendo por este motivo polo que reciben o nome de variacións a **curto prazo**.

A importancia deste tipo de variacións vai ser fundamental nos procesos costeiros e polo tanto vai a influír a hora de levar a cabo practicamente calquera tipo de actuación no litoral. Este efecto pódese ilustrar do seguinte xeito. No caso de non existir marea, a porción dunha zona costeira baixo a acción da ondada estaría determinada fundamentalmente polo tamaño das ondas e polo seu *run-up* disipándose toda a enerxía nunha estreita franxa do litoral. Polo contrario, nunha costa onde existe una elevada variación no nivel do mar, a liña de costa cambia continuamente e, polo tanto, a zona afectada pola ondada é moito maior. Como resultado prodúcese unha variación na morfoloxía resultante, así como na distribución de sedimentos. Por outra banda, ademais da ondada, a marea pode ser causante de importantes correntes litorais. Este é o caso de espazos semicerrados, como por exemplo as rías galegas. Finalmente, cando se pretende realizar unha obra marítima, como pode ser un dique de abrigo, é preciso ademais determinar a súa cota de nivelación. Esta virá determinada polo nivel da onda sobre o noiro e dependerá tanto da altura da propia onda coma do nivel da marea.

Pódense distinguir dous tipos de mareas, a **marea astronómica** (Figura 1) e a **marea meteorolóxica** (Figura 2), vindo determinado o nivel total do mar pola suma de ambas.

A marea astronómica pódese describir como un ascenso e descenso periódico do nivel do mar causado polo Sol e a Lúa. A situación onde se acadan un maior nivel do mar denomínase preamar, mentres que a baixamar fai referencia á situación cun menor nivel. A diferenza entre ambos niveis é o que se coñece como carreira de marea. O período de tempo que transcorre entre unha preamar e a sucesiva baixamar denomínase marea enchente (fluxo), mentres que o que vai entre unha baixamar e a preamar consecutiva denomínase marea baleirante (refluxo). O intervalo de tempo que transcorre entre dúas preamares ou baixamares consecutivas é de aproximadamente 12 horas e 25 minutos en rexións semidiúrnas e de 24 horas e 50 minutos nas diúrnas. De modo xeral, as alturas de dúas preamares ou baixamares consecutivas son distintas, fenómeno que se coñece como desigualdade diúrna.

Pola súa banda, a marea meteorolóxica consiste nunha oscilación non periódica que ten como causa fundamental a acción do vento e os cambios na presión atmosférica. De modo xeral, e coa excepción de situacións extremas, a marea astronómica é moito máis importante que a meteorolóxica.

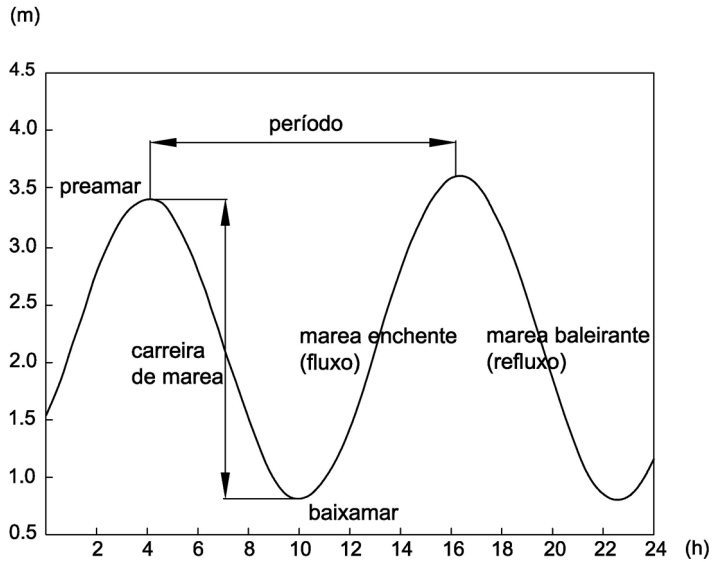


Figura 1. Termos principais da marea astronómica

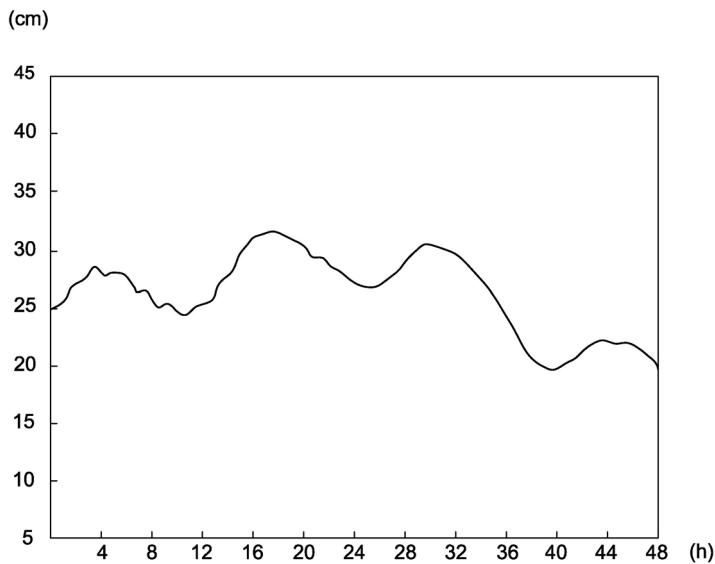


Figura 2. Variación do nivel do mar debido á marea meteorolóxica durante un temporal no Porto de A Coruña.

Finalmente, é preciso mencionar que ademais deste tipo de variacións existen outras, as de **longo prazo**. Estas fan referencia a períodos de decenios ou séculos, e definen nada menos que a posición de costa e as súas formas predominantes. A incidencia destas variacións, aínda que ocorren de xeito moi lento, poden ser moi importantes. O seu maior perigo vén dado pola feble memoria do ser humano. Todo o mundo

esquece en pouco tempo o elevado ou reducido que pode chegar a atoparse o nivel do mar. Deste xeito, por exemplo, poucos anos despois de atoparnos nunha situación cun nivel do mar elevado, volvemos invadir a costa expoñéndonos de forma inevitable na próxima situación de nivel elevado. Do mesmo xeito, no caso de atoparnos nunha situación de nivel do mar elevada que se prolonga durante anos, sempre se constrúen todo tipo de peiraos e dársenas en áreas de escasa profundidade, que se verán por suposto inutilizadas no próximo evento de nivel do mar reducido.

Debido a maior relevancia da marea astronómica á hora de levar a cabo a elaboración dun proxecto no ámbito da Enxeñaría de Portos e Costas, esta UD centrase na análise das variacións do nivel do mar debidas a este factor (aptdos. 2, 3, 4). Unicamente o aptdo. 5 está dedicado a outras variacións no nivel do mar (debidas á marea meteorolóxica e a longo prazo).

2. Teoría de Equilibrio

2.1. Fundamentos

A primeira explicación real de por que existe e de como se comporta a marea astronómica débese a Isaac Newton e a súa publicación: *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1646), grazas á cal se validou a Lei de Gravitación Universal. Baseándose na hipótese de simplificación –a Terra está cuberta totalmente de auga– estableceu que a forza de atracción que a Lúa e o Sol exercen sobre a masa de auga dos océanos é a responsable das mareas.

A Lei de Gravitación Universal establece que cada partícula de masa do universo atrae ás demais partículas cunha forza, F , que é proporcional ao produto das súas masas, m , e inversamente proporcional ao cadrado da distancia que as separa, d :

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2} \quad (1)$$

Onde G é a constante de gravitación universal de valor $6.6 \times 10^{-11} \text{Nm}^2/\text{kg}^2$. No caso da Terra e a Lúa a forza de atracción é a suma de todas as forzas de atracción entre cada par de partículas, sendo o seu valor o mesmo que se consideramos que a masa dos corpos está concentrada nos seus respectivos centros.

2.2. Marea lunar

Comunmente crese, de xeito equivocado, que a Lúa orbita en torno á Terra. En realidade, os centros da Terra e Lúa orbitan en torno ao centro de masas (CM) dun sistema común, o sistema Terra–Lúa (Figura 3), cun período de 27.3 días (mes sideral). O motivo deste erro pódese deducir de xeito sinxelo se determinamos a posición do CM do sistema (exercicio 1).

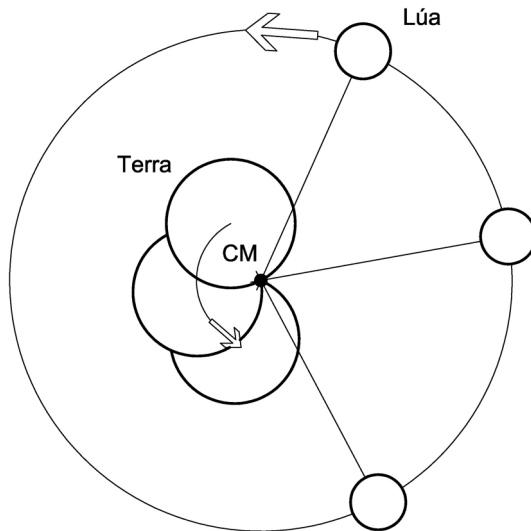


Figura 3 . Sistema Terra-Lúa.

Posto que a Terra orbita arredor dun mesmo CM (por simplificación trataremos as órbitas como circulares), todos os puntos no seu interior e sobre a súa superficie seguen traxectorias circulares dun mesmo raio, L_T (distancia entre o centro da Terra e do CM do sistema), e velocidade angular, ω . Deste xeito, todos os puntos experimentan unha mesma aceleración, $a=L_T\omega^2$, e polo tanto unha mesma forza centrífuga, F_c . Segundo a 2ª Lei de Newton, tense que $\Sigma F=ma$. No caso do sistema Terra-Lúa, a forza centrífuga contrarresta a forza de atracción entre os dous corpos, e o sistema no seu conxunto atópase en equilibrio. Este equilibrio é un equilibrio global; non obstante, en cada punto (excepto no centro da Terra) non se un produce equilibrio local xa que:

- A magnitude da forza de atracción exercida pola Lúa sobre a Terra non é a mesma sobre todos os puntos da superficie terrestre –non todos os puntos se atopan á mesma distancia.
- A dirección da forza de atracción está dirixida cara ao centro da Lúa e, polo tanto, salvo os puntos situados na liña que une os centros da Terra e da Lúa, esta non é paralela ás forzas centrífugas.

Denomínase Forza Produtora de Marea, FPM á resultante da forza centrífuga e da forza de atracción exercida por un determinado astro, neste caso a Lúa, podendo estar dirixida cara a dentro, cara a fóra ou paralela á superficie da Terra dependendo da súa posición. Distinguiremos dous compoñentes da FPM , un **compoñente tanxencial** e outro normal á superficie terrestre (Figura 4).

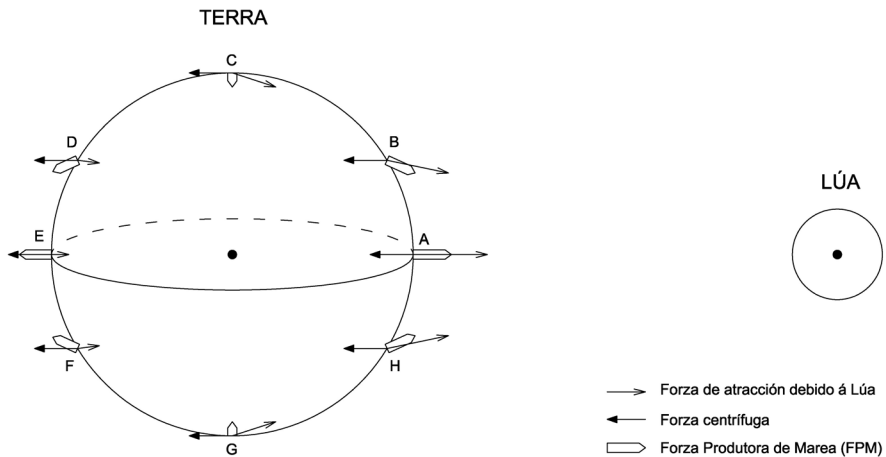


Figura 4 . Forza Produtora de Marea.

A continuación imos analizar os efectos da *FPM* sobre o movemento das masas de auga dos océanos. Para isto estudaremos o que acontece nos puntos A e E. Estes son o máis próximo e afastado da Lúa respectivamente e, deste xeito, onde a diferenza entre a forza centrífuga e de atracción é maior. Non obstante, nestes puntos a *FPM* só dispón de compoñente normal, que queda practicamente anulada o estardirixida de forma oposta á propia forza de gravidade terrestre –de magnitude 9×10^{-6} veces maior. Polo contrario, nos puntos B, D, F e H, ademais dun compoñente normal, existe un importante **compoñente tanxencial** –tamén denominado *forza motriz*– que é o que provoca que as masas de auga dos océanos se poñan en movemento. Aínda que a súa magnitude é pequena en comparación co campo gravitacional terrestre, non ten oposición en ningunha forza lateral relevante. O resultado final é que este compoñente tanxencial provoca o movemento da auga cara aos puntos A e E, desenvolvéndose neste caso simplificado un elipsoide con dúas protuberancias dirixidas cara á Lúa e en dirección oposta. Deste xeito, aínda que a compoñente tanxencial da *FPM* nos puntos A e E é mínima, é cara estes puntos onde se dirixen as masas de auga e onde os seus efectos son máis aparentes.

Na práctica, este elipsoide non se desenvolve. Ata o momento non se tivo en conta a rotación da Terra: son os propios puntos da Terra e non as protuberancias os que rotan, de modo que é a propia rotación da Terra a que leva a un determinado punto a través de dúas protuberancias. Deste xeito, un mesmo punto experimentaríase dúas preamares e dúas baixamars nun mesmo día (**marea semidiúrna**). En realidade, o tempo exacto é de 24 horas e 50 minutos ou o que é o mesmo, a marea atrasase case que 1 hora cada día. Isto débese a que a Lúa xira en torno ao CM do sistema Terra-Lúa (unha vez cada 27.3 días) na mesma dirección que a Terra rota (unha vez cada 24 horas) sobre o seu propio eixo (Figura 5). Posto que a Lúa se despraza 13.2° cada día ($360^\circ / 27.3$ días) en torno ao CM do sistema, un

determinado punto da superficie terrestre tarda máis de 24 horas en volver estar aliñado coa Lúa, sendo este tempo adicional, $\Delta t \approx 13.2^\circ \times 24h / 360^\circ \approx 50$ min. Temos entón que o período da marea semidiúrna, ou o que é o mesmo, o intervalo de tempo existente entre unha preamar e a seguinte preamar é de $24h \ 50 \text{ min} / 2 = 12h \ 25 \text{ min}$.

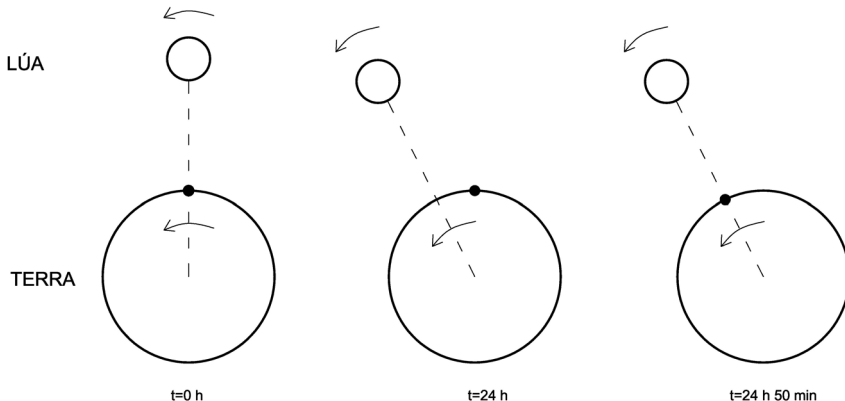


Figura 5 . Influencia da rotación da Terra no período da marea.

2.3. Marea solar

De modo similar á Lúa, e facendo uso do explicado con anterioridade, o Sol produce dúas protuberancias. A importancia relativa das protuberancias producidas por ambos os astros pódese obter de xeito sinxelo se tomamos o punto A (Figura 4) como representativo. Para isto é preciso determinar unha expresión da *FPM* debido ao Sol e a Lúa. Segundo se demostrará no exercicio 2 proposto, estas expresións son:

$$FPM_S = G \frac{m_s 2r}{L_s^3} \quad (2)$$

$$FPM_L = G \frac{m_L 2r}{L_L^3} \quad (3)$$

Onde m representa a masa, L é a distancia entre o punto A e o correspondente astro, e os subíndices S e L fan referencia ao Sol e a Lúa respectivamente. Finalmente, r é o raio da Terra. A relación entre ambas é entón:

$$\frac{FPM_S}{FPM_L} = \frac{m_s}{m_L} \left(\frac{L_L}{L_S} \right)^3 = 0.46$$

ou o que é o mesmo, as protuberancias xeradas polo Sol representan un 46% das xeradas pola Lúa.

2.4. Interacción da marea lunar e solar

Aínda que as *FPM* debidas a Lúa e ao Sol se trataron de forma separada, os seus efectos déixanse sentir ao mesmo tempo sobre a superficie dos océanos. Ademais, da súa combinación resultan dúas situacións características: as **mareas vivas** e as **mareas mortas**. A medida que a Lúa se move na súa órbita en torno ao CM do sistema Terra – Lúa, a súa posición relativa respecto da Terra e do Sol varía, dando lugar ao que se coñece como fases da Lúa (Figura 6).

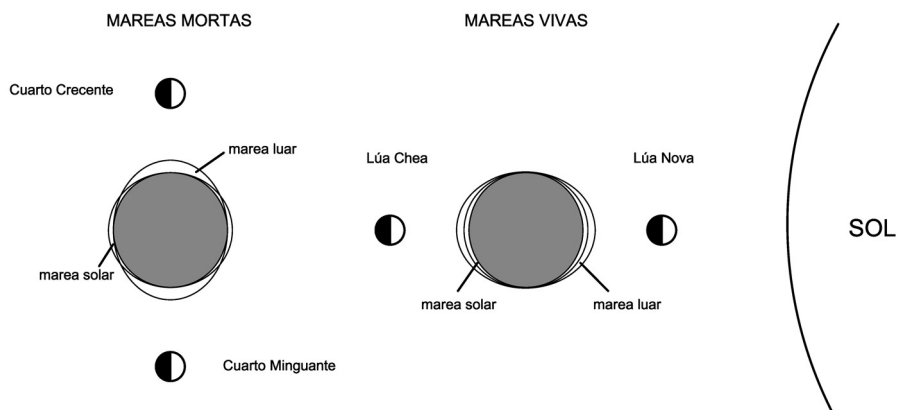


Figura 6 . Fases da Lúa. Mareas Vivas e Mortas.

No caso de que o Sol e a Lúa estean en Sicixia, é dicir aliñados (Lúa Nova e Chea), as correspondentes *FPM* e protuberancias xeradas superporanse; polo tanto, existirán preamares máis altas e baixamares máis baixas que a media. A esta situación denomínase mareas vivas. Polo contrario, no caso de que o Sol e a Lúa estean en cuadratura (Cuarto Crecente e Minguante) os correspondentes eixos maiores das protuberancias son perpendiculares resultando en mareas menos acusadas denominadas mareas mortas.

O ciclo completo non se corresponde exactamente co mes sideral (27.3 días). É preciso ter en conta que mentres a Lúa dá unha volta completa ao redor do sistema Terra – Lúa, a Terra continuou a súa translación arredor do Sol percorrendo uns 30°. Deste xeito, unha vez que a Lúa completou a súa órbita en torno ao CM do sistema Terra – Lúa, o Sol, a Terra e a Lúa non se atopan nas mesmas posicións relativas de partida. Para que isto suceda, é preciso que transcorran pouco máis doutros dous días. Por conseguinte, o período de repetición dunha mesma fase lunar é duns 29.5 días, o denominado mes sinódico ou mes lunar.

2.5. Variacións na marea

As posicións e orientacións relativas da Terra e a Lúa e a Terra e o Sol non son constantes debido á existencia de certos factores condicionantes. Os máis importantes son a declinación e forma das órbitas.

Declinación

A declinación é o ángulo dun astro sobre o plano do ecuador terrestre. No caso da Lúa, esta varía nun ciclo de 27.2 días (Mes Nódico) acadando valores duns 28° ; mentres, a declinación solar varía nun ciclo anual con valores máximos de 23.5° . Debido á declinación, unha das protuberancias percíbese con maior intensidade ca outra nun determinado punto (a excepción dos puntos situados sobre o Ecuador), provocando a denominada **desigualdade diúrna** (Figura 7).

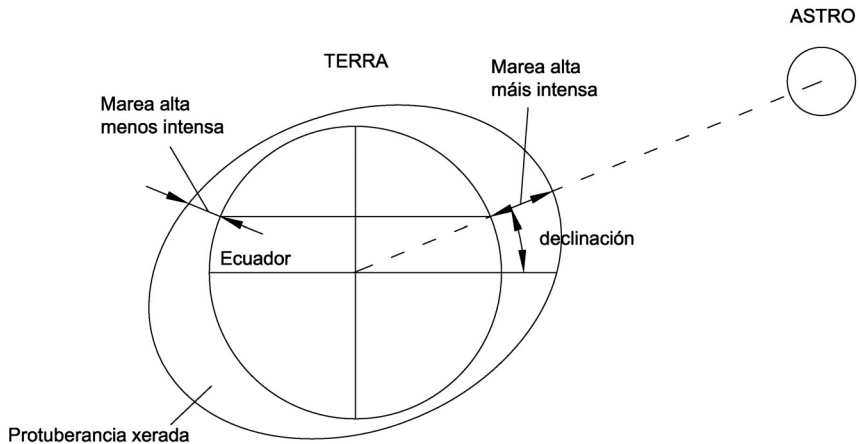


Figura 7 . Desigualdade na marea inducida pola declinación dun astro.

Efectos de paralelaxe

Tanto a órbita da Lúa arredor do CM do sistema Terra-Lúa como a da Terra arredor do CM do Sistema Solar non son circulares senón elípticas. Cando a Lúa está máis próxima á Terra atópase no perixeo, mentres que cando se atopa no punto máis afastado está no apoxeo, aumentando ou reducíndose as forzas xeradoras de marea nun 20% respecto á media respectivamente. Mentres, cando a Terra se atopa máis próxima ao Sol estará no perihelio e cando estea máis afastada, no afelio, sendo os efectos sobre a marea máis reducidos que no caso anterior.

3. Teoría Dinámica

3.1. Fundamentos

A Teoría de Equilibrio explica as causas astronómicas da marea pero falla á hora de describir a marea nun determinado punto. As principais razóns polas que a marea non se comporta segundo a Teoría de Equilibrio son:

- A profundidade media dos océanos é moi inferior aos 20 km necesarios para producir un Estado de Equilibrio, polo que a marea real atrasaríase. (Para a comprensión deste feito fórmulanse os exercicios3 e 4).
- A presenza de masas de terra (continentes) que impiden que as protuberancias xeradas pola marea dean a volta á Terra.
- Os efectos das augas superficiais e as irregularidades da costa sobre a onda de marea. (Para a comprensión deste feito fórmulanse os exercicios5 e 6).
- A suposición de que as masas de auga non posúen inercia. En realidade a rotación da Terra arredor do seu propio eixo é demasiado rápida para que as masas de auga respondan inmediatamente as forzas de atracción.
- A rotación da Terra introduce a forza de Coriolis que desvía os movementos das masas de auga.

Para superar as dificultades anteriores, Laplace formulou o que se coñece como Teoría Dinámica, na cal a marea se considera como unha onda de período longo que se despraza arredor da superficie da Terra en distintos sistemas, os denominados **Sistemas Anfidrómicos**.

3.2. Sistemas Anfidrómicos

Para ilustrar a súa existencia e o seu comportamento, en primeiro termo, en lugar de protuberancias xeradas polas *FPM*, imos pensar en termos de ondas de marea, onde a crista da onda intenta seguir ao astro correspondente, por exemplo á Lúa. A continuación imos introducir a influencia da configuración dos océanos. Para isto, consideremos as ondas xeradas no Océano Atlántico. A onda de marea producida pola Lúa avanza de Leste a Oeste ata que se atopa coas masas de terra, onde se reflicte e dirixe en dirección oposta. A onda reflectida combínase coas ondas que se moven cara ao Oeste, formándose unha onda estacionaria cos seus correspondentes nodos e antinodos, ou ben, se consideramos a onda en tres dimensións, liñas nodais e antinodais (UD II).

Por outra banda, debido á rotación da Terra, actúa ademais a forza de Coriolis que modifica esta onda estacionaria desviando a crista da onda cara á dereita ou esquerda da súa traxectoria no Hemisferio Norte e Sur respectivamente. O resultado vai ser unha Onda de Kelvin que rota en sentido antihorario e horario respectivamente, dependendo do hemisferio que se atope (salvo certas excepcións), arredor dun punto determinado formando o que se coñece como sistema anfidrómico. En cada un deles podemos definir (Figura 8):

- Punto anfidrómico: punto arredor do que xira a crista da onda de marea completando unha volta cada período de marea (12h25 min no caso de mareas semidiúrnas). Neste punto a carreira de marea é nula, incrementándose a medida que nos atopamos en localizacións máis afastadas. Cada liña nodal, ao ter en conta a forza de Coriolis, transfórmase nun punto anfidrómico.

- *Co-tidallines* ou liñas co-mareais: liñas que unen puntos que se atopan na mesma fase da marea seguindo unha distribución radial con orixe no punto anfidrómico.
- *Co-rangelines* ou liñas con igual carreira de marea: liñas que cortan ás liñas co-mareais aproximadamente de forma perpendicular, unindo puntos coa mesma carreira de marea. Estas liñas forman círculos máis ou menos concéntricos arredor do punto anfidrómico, posuíndo maiores carreiras de marea a media que se afastan del.

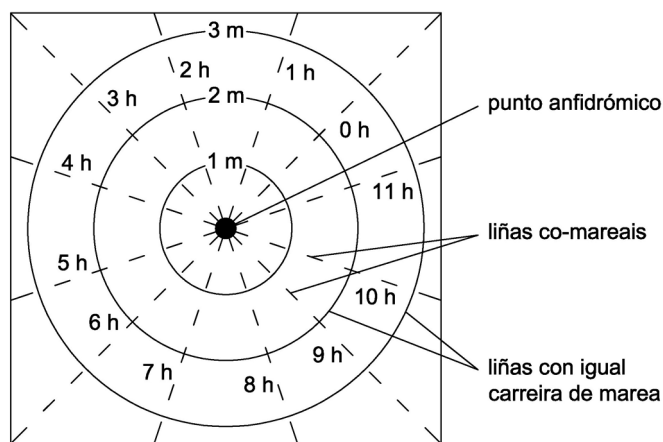


Figura 8 . Sistema anfidrómico.

Para maior claridade do explicado e as súas implicacións na marea real observada nun determinado lugar, imos ilustrar o que acontece nas Illas Británicas (Figura 9). Ao seu redor, desenvólvense unha serie de Ondas de Kelvin ao estar rodeado por un conxunto de corpos de auga relativamente pequenos: o Mar do Norte, dous segmentos do Canal da Mancha e o Mar de Irlanda. No caso do Mar do Norte desenvólvense tres sistemas anfidrómicos. (Para a comprensión deste feito fórmase o exercicio 5). No sistema máis ao Norte, o punto anfidrómico está moi próximo á costa de Noruega. A onda de marea entra dende o Atlántico experimentando unha rotación antihoraria arredor do punto anfidrómico. O mar do Norte é relativamente superficial, o que provoca que a onda de marea sufra unha fricción co fondo que, xunto con outras perdas de enerxía menos importantes, provoca que o punto anfidrómico se desprace da fonte de enerxía de marea. No caso do Mar do Norte, a fonte de enerxía provén do Atlántico polo que a fricción traslada o punto anfidrómico cara ao Leste. Un resultado importante disto é que a costa Leste de Inglaterra posúe carreiras de marea moi elevadas ao estar distante do punto anfidrómico; mentres, as costas de Noruega posúen carreiras de marea menores.

No caso da Canle de Inglaterra, o efecto da fricción é aínda maior. O punto anfidrómico sitúase completamente en terra (no Sur de Inglaterra)

de xeito que a onda de marea se move na mesma dirección tanto ao longo da costa Sur de Inglaterra como ao longo da costa Norte de Francia. Nas proximidades á Illa de Wight (en torno ao punto anfidrómico) a carreira de marea é moi pequena, mentres que polo contrario, a costa Norte de Francia experimenta a maior carreira de marea en Europa.



Figura 9 . Sistemas anfidrómicos en torno ás Illas Británicas.

3.2. Resonancia e converxencia

Os sistemas anfidrómicos anteriores mostran algúns dos efectos que as augas someras provocan na onda de marea, así como a influencia das irregularidades da costa. Estes efectos son comúns e xeralmente importantes á hora de entender o comportamento da marea nunha determinada localización. Ademais, en corpos de auga semicerrados pode acontecer que a carreira de marea se incremente en gran medida debido a dous fenómenos: **converxencia** e **resonancia**.

Estes fenómenos ímolos a ilustrar para a Baía de Fundy (Canadá) onde existe a maior carreira de marea do mundo. Esta baía caracterízase por posuír unha gran lonxitude (270 Km) cunha boca moi ancha que se vai estreitando progresivamente a medida que nos situamos augas arriba, rematando en dous brazos moi estreitos (Figura 10).

A carreira de marea na boca da Baía de Fundy, aínda que é elevada (6 m en mareas vivas medias) non é excepcional. Un incremento considerable prodúcese a medida que avanzamos augas arriba. En St. John, a carreira de marea incrementouse ata os 9 m e nas proximidades de Baía de Chigneto é xa de 14 m. Na parte mais alta de Minas Basin, a carreira de marea incrementábase ata preto dos 16 m, a maior carreira de marea no mundo. Este incremento é debido, en parte, a que a medida que o fronte de onda de marea avanza augas arriba, a forma de funil desta baía constrinxen e acumula a auga nunha determinada sección provocando o incremento da altura da onda de marea. Este proceso denomínase converxencia. Por outra banda, no caso dalgunhas baías abertas ao mar – como é o caso desta baía – é posible que un nodo da onda de marea coincida na súa boca e un antinodo se sitúe augas arriba no límite coa terra, de modo que se produce a resonancia da onda de marea que resulta do mesmo xeito nun incremento da carreira de marea.

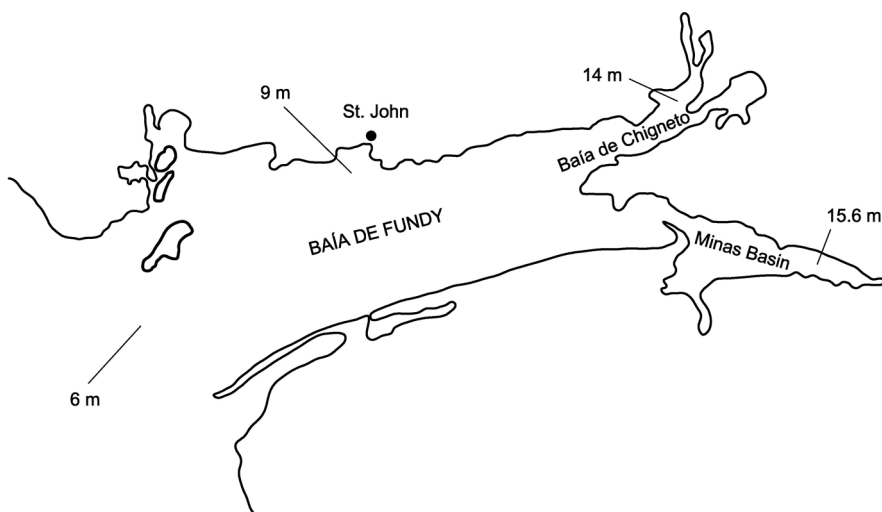


Figura 10. Baía de Fundy.

4. O método harmónico

4.1. Fundamentos

Nos apartados anteriores viuse como sobre a marea inflúen unha serie de fenómenos periódicos resultado dos movementos relativos entre a Terra, a Lúa e o Sol. Deste xeito, a marea observada pódese calcular como a suma dunha serie de mareas parciais ou compoñentes cuxo período se corresponde co período dun destes movementos (Táboa 1), tendo cada un deles unha amplitude e unha fase específicos para unha localización dada.

Táboa 1. Períodos dos principais compoñentes da marea.

Compoñentes da marea	Período (horas)
M_2	12.42
S_2	12.00
N_2	12.66
K_2	11.97
K_1	23.93
O_1	25.82
P_1	24.07

Os valores da amplitude e da fase dos distintos compoñentes pódense obter a partir dos rexistros de niveis da marea para un período longo. Unicamente será preciso empregar o cofecido como método harmónico, que consiste nun proceso de descomposición dunha función, neste caso o nivel do mar, nos seus compoñentes parciais ou harmónicos de marea. Do mesmo xeito, existen diferentes bases de datos obtidas a partir de modelos numéricos que permiten determinar os distintos harmónicos para unha localización xeográfica concreta (Figura 11, Táboa 2). As máis comunmente empregadas son a base de datos de LeProvost e a de Topex/Poseidon.

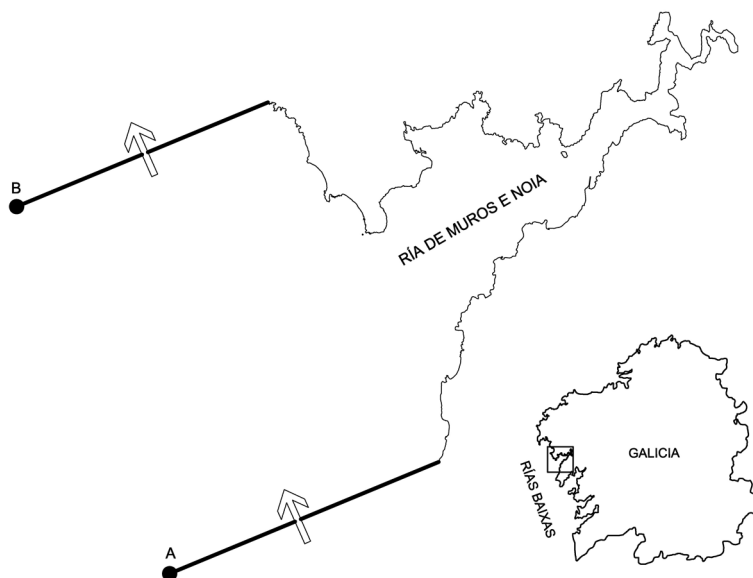


Figura 11. Sentido de avance da onda de marea fronte á Ría de Muros e Noia.

Táboa 2. Amplitudes (η) e fases (φ), dos compoñentes principais da marea astronómica nos puntos A e B (Figura 11). Base de datos de LeProvost.

Compoñente da marea	A		B	
	η (m)	φ (°)	η (m)	φ (°)
M ₂	1.079	79.792	1.085	82.181
S ₂	0.377	107.994	0.379	110.774
N ₂	0.237	60.663	0.238	62.806
K ₂	0.105	104.553	0.105	107.280
K ₁	0.067	66.663	0.068	68.556
O ₁	0.062	319.691	0.061	320.835
P ₁	0.022	56.314	0.022	58.187

4.2. Tipos de mareas

As forzas que predominarán á hora de producir a marea nun determinado corpo de auga serán aquelas que se correspondan co período natural de oscilación ou período resoante de dito corpo, sendo a resonancia o factor que aumente a súa importancia.

Por exemplo, debido a súa lonxitude e profundidade, os corpos de auga no océano Atlántico posúen un período de oscilación próximo ás 12 horas, que se corresponde aproximadamente cos compoñentes M₂, S₂, N₂ e K₂. Polo tanto, nestes corpos predominarán as mareas semidiúrnas, é dicir, dúas preamares e dúas baixamares no mesmo día. Polo contrario, noutras zonas como o Golfo de México, o período resoante está próximo ás 24 horas, correspondéndose cos compoñentes K₁, O₁, P₁ e Q₁. Como resultado, nestas zonas existirá tan só unha preamar e unha baixamar cada 24 horas, o que se coñece como mareas diúrnas. Finalmente, existen outros corpos de auga cuxo período de oscilación non se corresponde nin cos compoñentes diúrnos nin semidiúrnos. Neles existirán as denominadas mareas mixtas, unha mestura dos dous tipos anteriores, podendo presentar unha predominancia semidiúrna ou diúrna.

Para caracterizar o tipo de marea nunha determinada localización xeográfica defínese o *Factor de Forma*, F :

$$F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2} \quad (4)$$

onde cada símbolo representa a amplitude de cada marea parcial na localización considerada. A Táboa 3 recolle o tipo de marea en función do valor de F obtido.

Táboa 3. Tipos de marea en función de F .

F	Tipo de marea
> 3	Diúrna
1.5 - 3	Mixta con predominancia diúrna
0.25 - 1.5	Mixta con predominancia semidiúrna
< 0.25	Semidiúrna

5. Outras variacións no nivel do mar

5.1. A marea meteorolóxica

A marea meteorolóxica fai referencia ao desprazamento vertical da superficie libre do mar forzado polas variacións de presión atmosférica e a acción tanxencial do vento. En xeral, a importancia da marea meteorolóxica respecto da astronómica é escasa, aínda que en ocasións pode chegar a ser importante.

No caso das variacións na presión, pódese determinar de xeito sinxelo a súa incidencia sobre o nivel do mar. A presión media sobre a superficie do mar é de 1013 mbares. No caso do tránsito dun anticiclón ou dunha borrasca de gran importancia, a presión pode aumentar ou diminuír uns 50 mbares como máximo aproximadamente. Posto que unha presión de 1 bar equivale a 10 m.c.a, unha variación de 50 mbares producirá unha variación do nivel do mar de 50 cm, moito menos importante que a variación do nivel debido á marea astronómica en Galicia (uns 4 m), aínda nesta situación extrema.

Pola súa banda, a tensión tanxencial do vento sobre a superficie do mar tamén provoca variacións no nivel que, segundo a súa dirección de incidencia, poderá provocar un amoreamento da auga cara a costa ou ben o seu arrastre na dirección contraria. En casos extremos, e a diferenza das variacións na presión, o vento pode chegar a provocar importantes trocos no nivel do mar. Este é o caso do *Storm Surge*, que consiste nunha subida anormal do nivel do mar (por encima da marea astronómica) xerada por unha tormenta, que pode causar grandes inundacións en zonas costeiras, en particular se a súa presenza coincide coa marea alta. O factor principal xerador deste proceso é o forte vento asociado a unha tormenta que empuxa a masa de auga cara á costa (*Storm Surge* positivo) ou en dirección oposta (*Storm Surge* negativo); mentres, a incidencia das baixas presións asociadas a dita tormenta, aínda que como se comentou anteriormente tamén contribúe a variación no nivel do mar, é reducida.

A intensidade dun *Storm Surge* nunha determinada localización depende de diversos factores: intensidade, velocidade de avance, tamaño e ángulo de aproximación á costa da tormenta, así como a forma e características da zona costeira ou a anchura e pendente da plataforma continental, entre outros.

5.2. Variacións a longo prazo

Pódense distinguir dous tipos de variacións a longo prazo: eustáticas e isostáticas.

O termo eustático fai referencia ao cambio global do nivel do mar como resultado do afundimento ou conxelación das capas de xeo polar, así como á expansión térmica das masas de auga co cambio na temperatura. Hai aproximadamente 25000 anos o nivel do mar atopábase uns 150 m por debaixo do actual. Dende entón e ata hai 3000 anos, o nivel do mar subiu uns 7 mm/ano ata o nivel actual. A taxa actual de incremento eustático é reducida e, polo tanto, difícil de medir, estimándose que se atopa entre 1 e 1.5 mm/ano. De todos os xeitos, sería preciso ademais ter en consideración a posible influencia do cambio climático, xa que todo quecemento adicional incrementará esta taxa. A estimación da incidencia dos efectos dos gases de efecto invernadoiro sobre a temperatura e o nivel do mar non é nada sinxela, e moito menos precisa. Os modelos numéricos actuais produciron diferentes escenarios do nivel do mar. Os peores estiman que para o ano 2050 o incremento do nivel do mar será aproximadamente de 1.3 m.

Por outra banda, os cambios isostáticos fan referencia ao cambio no nivel do mar local debido ao axuste do manto coas variacións nos glaciares continentais. Máis en concreto, estes cambios son resultado do axuste da codia terrestre debido á redución da presión exercida pola capa de xeo que a cubría durante a última glaciación, e que provocaba unha importante depresión (subsidencia) nas zonas próximas e unha elevación (rebote) nas zonas máis afastadas dos glaciares. Este proceso séguese a producir hoxe en día, aínda que de forma moito máis lenta.

En xeral, o rebote isostático reduce o impacto do incremento de nivel eustático, aínda que en moitas ocasións os efectos deste rebote non son tan sinxelos (e.g. Grandes Lagos). Do mesmo xeito, aínda que a subsidencia acontece de xeito natural, a acción do home, en certas ocasións, ten unha gran incidencia. A causa máis común é, sen dúbida, a extracción de auga, petróleo ou gas natural do interior da Terra. Este feito pódese ilustrar claramente para a cidade de Venecia. O delta no que se atopa esta cidade afúndese a unha velocidade moi reducida polo que o nivel do mar deberíase incrementar do mesmo xeito. Non obstante, o bombeo de auga e gas natural durante este século provocaron un importante proceso de subsidencia que trouxo consigo que a cidade estea sometida de xeito máis regular a situacións de *Aqua Alta*.

Exercicios propostos

A continuación propóñense unha serie de exercicios que se resolverán durante as sesións de seminarios interactivos.

- 1) Determine a posición do CM do Sistema Terra-Lúa.
- 2) Determine a *FPM* no punto A da Terra (Figura 4) debido á forza de atracción dun astro calquera.
- 3) Tomando un valor de 40000 km para a circunferencia da Terra, determine a velocidade necesaria da onda de marea para manter un Estado de Equilibrio arredor do Ecuador considerando tan só a forza de atracción da Lúa (supoñer que a Lúa se atopa sobre o plano do Ecuador).
- 4) Determine a profundidade que deberían ter os océanos para que a onda de marea se desprace como unha onda en augas superficiais á velocidade calculada no exercicio 3.
- 5) Explique a existencia de 3 puntos anfidrómicos no Mar do Norte, sabendo que este sistema posúe una lonxitude aproximada de 1250 km e unha profundidade media de 50 m.
- 6) Determine o período natural de oscilación da Baía de Fundy (lonxitude = 270 km, profundidade media = 60 m), así como a posibilidade de que a onda de marea entre en resonancia dentro deste sistema.

ACTIVIDADES PROPOSTAS

Ao longo do desenvolvemento da UD iranse propoñendo diferentes boletíns de exercicios e problemas (ademais dos presentados no aptdo. anterior). Algúns deles serán resoltos de forma individual, mentres que os de maior complexidade resolveranse en grupos durante os seminarios interactivos. Ademais, certos problemas e exercicios de interese terán que ser entregados á finalización das sesións de seminario, ou ben nos prazos que no seu momento se determinen no caso de ser preciso traballo autónomo por parte do alumno.

Por outra banda, vinculado ás prácticas realizadas, propónse un traballo de grupo que consistirá na elaboración dun estudo de clima marítimo nunha zona costeira concreta. Este traballo será conxunto para as UD 2, 3 e 4 posto que deberá recoller, ademais dos contidos referentes ás mareas, os correspondentes á ondada. Ademais, deberá ser presentado e defendido nas sesións de seminarios interactivos, sendo precisa a participación de todos os compoñentes do grupo.

AVALIACIÓN DA UNIDADE DIDÁCTICA

A avaliación desta UD farase no conxunto da materia. Recorreráse a un sistema de avaliación continua no que se terán en consideración diferentes aspectos relacionados non só cos coñecementos finais adquiridos senón tamén co propio proceso de aprendizaxe. Os diferentes aspectos que se avaliarán, os criterios e instrumentos que se empregarán, así como o seu valor na cualificación final do alumno recóllense na Táboa 4

Táboa 4. Aspectos, criterios e instrumentos de avaliación.

Aspectos	Criterios	Instrumento	Valor (%)
Clases expositivas	<ul style="list-style-type: none">- Asistencia- Coñecementos teóricos	<ul style="list-style-type: none">- Folla de sinaturas- Control	20
Seminarios Interactivos	<ul style="list-style-type: none">- Asistencia- Participación- Capacidade de traballo en grupo- Formulación e resolución de exercicios e problemas	<ul style="list-style-type: none">- Folla de sinaturas- Observacións e anotacións- Entrega de problemas e exercicios	20
Prácticas	<ul style="list-style-type: none">- Asistencia- Aproveitamento das prácticas	<ul style="list-style-type: none">- Folla de sinaturas- Observacións e anotacións- Entrega e defensa de actividade proposta	20
Exame	<ul style="list-style-type: none">- Coñecementos teóricos- Formulación e resolución de exercicios e problemas	<ul style="list-style-type: none">- Proba escrita	40

BIBLIOGRAFÍA

- DEFANT, A. (1958): *Ebb and Flow*. Ambassador Books.
- EGBERT, G. D., BENNET, A. F., FOREMAN, M. G. G., (1994): *Topex/Poseidon tides estimated using a global inverse model*. Journal of Geophysical Research 99, pp. 24821-52.
- EMERY, K. O. (1991): *Sea Levels, Land Levels and Tide Gauges*. Springer-Verlag.
- IPPEN, A. T. (1966): *Estuary and Coastline Hydrodynamics*. McGraw Hill.
- KAMPHUIS, J. W. (2000): *Introduction to Coastal Engineering and Management*. World Scientific.
- PUGH, D. T. (1987): *Tides, Surges and Mean Sea-Level*. J. Wiley & Sons.



Unha colección orientada a editar materiais docentes de calidade e pensada para apoiar o traballo do profesorado e do alumnado de todas as materias e titulacións da universidade



Impreso en papel 100% reciclado e libre de cloro



SERVIZO DE NORMALIZACIÓN
LINGÜÍSTICA

