

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	5
2. INTRODUCCIÓN GENERAL A LAS MAREAS	5
2.1. Teoría de equilibrio de las mareas	7
2.2. Teoría dinámica de las mareas	12
2.3. Método armónico para la predicción de mareas	14
2.4. Tipos de mareas astronómicas	17
3. REGISTRO DE MAREAS EN LA PALMA	18
3.1. Equipos utilizados	18
3.2. Localización de los mareógrafos	19
4. ANÁLISIS DE ARMÓNICOS	20
4.1. Armónicos de marea en Santa Cruz de La Palma	21
4.2. Armónicos de marea en el Puerto de Tazacorte	23
4.3. Armónicos de marea en Puerto Espíndola	24
4.4. Armónicos de marea en Barlovento	25
4.5. Armónicos de marea en El Pozo	25
4.6. Armónicos de marea en el Faro de Fuencaliente	26
4.7. Armónicos de marea en El Remo	26
4.8. Conclusiones	27
5. CERO HIDROGRÁFICO EN LA PALMA	28
5.1. Criterios de nivelación	28
5.2. Definiciones	28
5.3. Mareógrafos en el puerto de S/C de La Palma	29
5.4. Niveles de referencia en La Palma	30
5.4.1. Nivel Medio del Mar Local	30
5.4.2. Bajamar Máxima Viva Equinoccial	31
5.4.3. Bajamar Astronómica Más Baja	32
5.4.4. Cero del mareógrafo	32
5.4.5. Cero del Puerto	33
5.4.6. Cero Hidrográfico	33
5.5. Nivel de referencia del estudio	33
6. ESTUDIO COMPARATIVO DE LA ONDA DE MAREA EN LA PALMA	35
6.1. Santa Cruz de La Palma vs. Puerto de Tazacorte	35
6.2. Santa Cruz de La Palma vs. Puerto Espíndola	36
6.3. Santa Cruz de La Palma vs. El Pozo	37
6.4. Santa Cruz de La Palma vs. Faro de Fuencaliente	38
6.5. Santa Cruz de La Palma vs. El Remo	39
6.6. Puerto de Tazacorte vs. El Remo	40
6.7. Gráficas comparativas	41
6.8. Repuntes armónicos de Santa Cruz de La Palma vs. Puerto de Tazacorte	41
6.9. Conclusiones	43
7. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO	52
7.1. Conclusiones sobre el nivel de referencia	52
7.2. Conclusiones sobre la onda de marea	52

ANEJO 1. RESEÑA DE LOS MAREÓGRAFOS	54
1.1. Santa Cruz de La Palma	54
1.2. Puerto de Tzacorte	55
1.3. Puerto Espíndola	56
1.4. Barlovento	57
1.5. El Pozo.....	58
1.6. Faro de Fuencaliente.....	59
1.7. El Remo	60
ANEJO 2. REGISTRO GRÁFICO DEL MAREÓGRAFO DE S/C DE LA PALMA.....	61
ANEJO 3. ANUARIO DE MAREAS PARA LOS AÑOS 2005 A 2015	135
ANEJO 4. ESPECIFICACIONES DEL MAREÓGRAFO VALEPORT 740.....	159
ANEJO 5. RESEÑAS TOPOGRÁFICAS	160
ANEJO 6. TABLAS COMPARATIVAS DE LOS SIETE MAREÓGRAFOS	163

FIGURAS

Figura 1 .-	Movimiento de agua resultante de las aceleraciones motrices.....	9
Figura 2 .-	Diagrama de interacción de las mareas solares y lunares.....	11
Figura 3 .-	Representación gráfica de las componentes armónicas principales de las mareas	12
Figura 4 .-	Puntos anfidrómicos en el Atlántico, líneas comareales y de amplitud de marea	14
Figura 5 .-	Mareas en el Atlántico Norte	15
Figura 6 .-	Esquema del mareógrafo <i>Valeport 740</i>	18
Figura 7 .-	Localización de los mareógrafos en el litoral de La Palma	20
Figura 8 .-	Representación gráfica de los armónicos M2, S2, K1 y O1 y su sumatorio para La Palma	22
Figura 9 .-	Armónicos de marea a lo largo del litoral de La Palma.....	27
Figura 10 .-	Localización y referencias del mareógrafo Valeport740	29
Figura 11 .-	Red Integrada de mareógrafos	29
Figura 12 .-	Localización del mareógrafo del IEO en el puerto de S/C de La Palma ...	30
Figura 13 .-	Registro del mareógrafo del IEO para el año 1997 en S/C de La Palma..	31
Figura 14 .-	Nivelación y bajamar máxima del mareógrafo Valeport 740.....	31
Figura 15 .-	Nivelación del mareógrafo IEO para la base SS1M.....	32
Figura 16 .-	Detalle de la Carta Nautica de la Isla de La Palma.....	34
Figura 17 .-	S/C de La Palma vs. Puerto de Tazacorte en mareas vivas.....	35
Figura 18 .-	S/C de La Palma vs. Puerto de Tazacorte en mareas muertas	36
Figura 19 .-	S/C de La Palma vs. Puerto Espíndola en mareas vivas.....	36
Figura 20 .-	S/C de La Palma vs. Puerto Espíndola en mareas muertas	37
Figura 21 .-	S/C de La Palma vs. El Pozo en mareas vivas	37
Figura 22 .-	S/C de La Palma vs. El Pozo en mareas muertas	38
Figura 23 .-	S/C de La Palma vs. Faro de Fuencaiente en mareas vivas	38
Figura 24 .-	S/C de La Palma vs. Faro de Fuencaiente en mareas muertas.....	39
Figura 25 .-	S/C de La Palma vs. El Remo en mareas vivas.....	39
Figura 26 .-	S/C de La Palma vs. El Remo en mareas muertas.....	40
Figura 27 .-	Puerto de Tazacorte vs. El Remo en mareas vivas	40
Figura 28 .-	Puerto de Tazacorte vs. El Remo en mareas muertas	41
Figura 29 .-	Marea registrada vs. marea astronómica el día 25/11/2003	42
Figura 30 .-	Esquema de cotas para el Valeport 740 reducido al nivel de referencia del estudio	52
Figura 31 .-	Interpretación de las tablas de marea	135
Figura 32 .-	Grafica comparativa entre el registro de marea y la marea astronómica calculada	158

TABLAS

Tabla 1 .- Nombres, símbolos y frecuencias de las componentes de marea más importantes.....	16
Tabla 2 .- Amplitudes de los armónicos K1, O1, M2 y S2 en La Palma	17
Tabla 3 .- Armónicos de marea para S/C de La Palma	21
Tabla 4 .- Armónicos de marea para el Puerto de Tzacorte.....	23
Tabla 5 .- Armónicos de marea para Puerto Espíndola.....	24
Tabla 6 .- Armónicos de marea para Barlovento	25
Tabla 7 .- Armónicos de marea para El Pozo.....	25
Tabla 8 .- Armónicos de marea para el Faro de Fuencaliente	26
Tabla 9 .- Armónicos de marea para El Remo	26
Tabla 10 .- Comparativa de BMVE registrada y calculada en S/C La Palma.....	42
Tabla 11 .- Diferencias de amplitud referidas al mareógrafo patrón.....	175

1. INTRODUCCIÓN

El presente volumen recoge los estudios realizados sobre la evolución de la onda de marea a lo largo del litoral de la isla de La Palma, encaminados principalmente a la determinación del cero hidrográfico, los constituyentes armónicos de la marea y el nivel de referencia para los trabajos de planimetría.

A tal efecto, se han dispuesto 7 mareógrafos alrededor de la isla, en las localizaciones y periodos de medida que se indican a continuación:

- Mareógrafo patrón: Ha medido la onda de marea de forma ininterrumpida durante 12 meses, y se ha ubicado en el interior del puerto de Santa Cruz de La Palma.
- Mareógrafos auxiliares: Midieron la onda de marea en seis localizaciones alrededor de la isla durante un periodo mínimo de un mes. Los puntos de ubicación de los mareógrafos fueron los siguientes (ver Figura 7):
 - Piscinas de Barlovento
 - Puerto Espíndola
 - El Pozo
 - Faro de Fuencaliente
 - El Remo
 - Puerto de Tazacorte

La determinación de la bajamar máxima viva equinoccial del estudio se ha realizado a partir de los registros del mareógrafo patrón, en tanto que los demás han servido para proporcionar las pautas de comportamiento de la onda de marea a lo largo de la isla.

Los siguientes epígrafes detallan los conceptos fundamentales empleados, las bases de partida, el procedimiento operativo y los resultados obtenidos.

2. INTRODUCCIÓN GENERAL A LAS MAREAS

En el presente apartado se desarrolla una introducción teórica al fenómeno de la marea astronómica, dependiente de las relaciones gravitacionales de Tierra, Sol y Luna principalmente. Sin embargo, la marea realmente observada resulta de la combinación de la marea astronómica y de las variaciones del nivel del mar inducidas por procesos meteorológicos como la presión atmosférica, el viento, el oleaje, etc.

Se denomina marea astronómica al descenso y elevación alternante del nivel del mar que se repite con un período medio de unas 12,4 horas (o 24,8 horas en algunas regiones).

La onda mareal es el fenómeno oceanográfico más regular y resulta de la atracción

gravitacional de la Luna y el Sol sobre la Tierra y de la aceleración inercial centrífuga debida a los movimientos orbitales de nuestro planeta respecto a esos dos astros. La actuación conjunta de estas aceleraciones da lugar a una variación regular del nivel del agua en el curso de un día. La atracción gravitacional entre la Tierra y cualquier otro planeta es tan pequeña que resulta inobservable, y puede ignorarse su efecto sobre las mareas.

La marea puede describirse de forma sencilla como una elevación y descenso periódicos, semidiarios o diarios, del nivel del mar. La mayor altura alcanzada se denomina pleamar, y la menor, bajamar. La diferencia entre ambas es la amplitud de la marea.

El ascenso y descenso del mar en áreas confinadas como bahías o rías implica el movimiento de grandes masas de agua, generando corrientes cuya importancia depende de la relación entre el prisma de marea generado y las dimensiones de la zona que confina el flujo. Estas corrientes producidas por la marea son denominadas flujo (o llenante) y reflujo (o vaciante). Las corrientes de marea pueden ser muy intensas, especialmente en áreas muy someras de la costa (marismas) o en cuerpos de agua confinados (estuarios o rías).

El intervalo medio entre pleamares o bajamares sucesivas, en zonas con régimen semidiurno, es de 12 horas y 25 minutos, aproximadamente. Así, la hora de la pleamar o de la bajamar se adelanta unos 50 minutos entre un día y el siguiente. La duración media de un ciclo de marea se corresponde con la mitad de un día lunar medio. Las alturas de dos pleamares o bajamares consecutivas son en general distintas y se conoce como desigualdad diurna. La desigualdad diurna es a veces tan grande que sólo parece haber una pleamar y una bajamar cada día lunar, en lugar de dos.

Con el paso de los días se experimenta también un cambio progresivo de las alturas y amplitudes mareales diarias. Ambas vuelven a repetirse después de transcurrir medio mes lunar. Esta fluctuación constituye la desigualdad semimensual. Durante los plenilunios y novilunios la amplitud de marea es máxima y se habla de mareas vivas; en los cuartos creciente o menguante la amplitud de marea es mínima y se habla de mareas muertas.

La altura de la marea se mide respecto a un datum, que se utiliza como referencia vertical y origen de mediciones batimétricas y topográficas.

Los niveles cero o datum utilizados pueden definirse de diferentes maneras:

- Bajamar Máxima Viva Equinoccial (España, Francia)
- Bajamar media de sicigias (Italia, Inglaterra)

- Nivel armónico de marea o nivel indio, (Inglaterra)
- Promedio de las bajamares más acentuadas (Pacífico EEUU, Asia)
- Promedio de todas las bajamares (Atlántico EEUU)
- Nivel medio de la mar (Región Báltica y Mar del Norte, útil en zonas con mareas poco apreciables)

Los niveles de referencia están, por definición, calculados sobre muchos años de observaciones.

2.1. Teoría de equilibrio de las mareas

Los movimientos relativos de la Tierra, la Luna y el Sol son complicados, y su influencia en los eventos mareales es igualmente compleja. Sin embargo, las fuerzas y aceleraciones que generan las mareas pueden ser formuladas con precisión, aunque la respuesta de los océanos a esas causas está influenciada por los efectos permanentes de la topografía y los transitorios de la meteorología.

Newton estudió la acción de los cuerpos celestes sobre las mareas, basándose en su ley de gravitación universal. Según ésta, la fuerza de atracción entre dos cuerpos es directamente proporcional a ambas masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Así, la atracción lunar sobre las masas del océano es sólo del orden de una diezmillonésima parte de la terrestre. Esta atracción comparativamente minúscula basta, no obstante, para explicar lo fundamental de las mareas.

Consideraremos, para empezar, sólo el sistema Tierra-Luna, e ignoraremos el movimiento de rotación diurno de la Tierra. Aunque desde la Tierra parece que la Luna orbita a nuestro alrededor, es igualmente exacto afirmar que ambos cuerpos están rotando alrededor de su centro de masas común. De hecho, el movimiento de este centro de masas se aproxima más a una trayectoria inercial, rectilínea y no acelerada, que al movimiento de rotación de la Tierra.

Tierra y Luna orbitan alrededor de su centro de masas con un período de 27,3 días, respecto a las estrellas fijas. Las fuerzas de interacción gravitacional entre ambos astros, y ninguna otra, son responsables de este movimiento orbital mutuo.

La masa de la Tierra es 81 veces la de la Luna, de manera que el centro de gravedad del sistema se halla unas 81 veces más cerca del centro de la Tierra que del de la Luna. Puesto que la distancia entre ambos astros es de unas 60 veces el radio de la Tierra, el centro de gravedad común se sitúa en el interior de la Tierra.

La órbita de la Luna es levemente elíptica, pero para simplificar la trataremos,

inicialmente, como circular. Por su parte, la órbita de la Tierra alrededor del centro de masas es un movimiento excéntrico, esto es, no centrado en nuestro planeta, bajo el cual todos los puntos de la superficie de la Tierra siguen trayectorias circulares con idéntico radio e igual velocidad angular, $\omega = 2\pi / 27,3$ rad/día. Todos los puntos de la superficie terrestre tienen así la misma aceleración ($r\omega^2$), y por tanto cualquier móvil experimentará en cualquier punto de la superficie de la Tierra la misma aceleración de inercia (centrífuga) que es resultado del movimiento orbital excéntrico de la Tierra entorno al centro de gravedad Tierra-Luna.

El movimiento excéntrico de la Tierra es un movimiento orbital, y es enteramente independiente de la rotación de la Tierra sobre su propio eje; no deben ser confundidos. Así, la aceleración centrífuga debida al movimiento excéntrico orbital, no debe ser confundida con la aceleración también centrífuga y también de inercia debida a la rotación diurna del planeta; ésta última aceleración depende de la latitud, pues la distancia al eje varía con el coseno de la misma, mientras que la debida al movimiento excéntrico es igual en toda la superficie terrestre.

Todos los cuerpos situados sobre la Tierra sufren, no menos que la propia Tierra, la aceleración gravitatoria debida a la atracción lunar. Esta atracción es mayor en los puntos más próximos a la Luna y menor en los más alejados. Por otra parte, los cuerpos situados sobre la superficie terrestre experimentan, como hemos discutido, una aceleración adicional inercial y centrífuga debida al movimiento excéntrico. Es la competición entre la aceleración gravitatoria lunar y esta última aceleración debida al movimiento excéntrico la que causa los movimientos diferenciados de las masas de agua en regiones distintas del planeta.

La competición se resuelve a favor de la aceleración gravitatoria en regiones próximas a la Luna, y a favor de la aceleración centrífuga en las regiones más alejadas. La resultante de las dos aceleraciones se llama aceleración de marea, a_m , y dependiendo de la posición con respecto a la Luna puede entrar, ser paralela a, o salir de la superficie de la Tierra. Las aceleraciones de marea son mínimas en las regiones de mayor proximidad y alejamiento de la Luna; allí aparecen las mareas altas.

La aceleración de marea no es directamente responsable de los movimientos de las masas de agua en una oscilación mareal, ya que esta aceleración no es, en general, paralela a la superficie del agua (es decir, no es localmente horizontal). En particular, en los puntos de máximo alejamiento y de máxima cercanía a la Luna, la a_m es localmente vertical y, por lo tanto, no produce desplazamientos horizontales del agua. Llamamos aceleración motriz (a_h) a la parte horizontal de a_m en cada punto. El

movimiento del agua que resulta de las aceleraciones motrices se representa en la Figura 1.

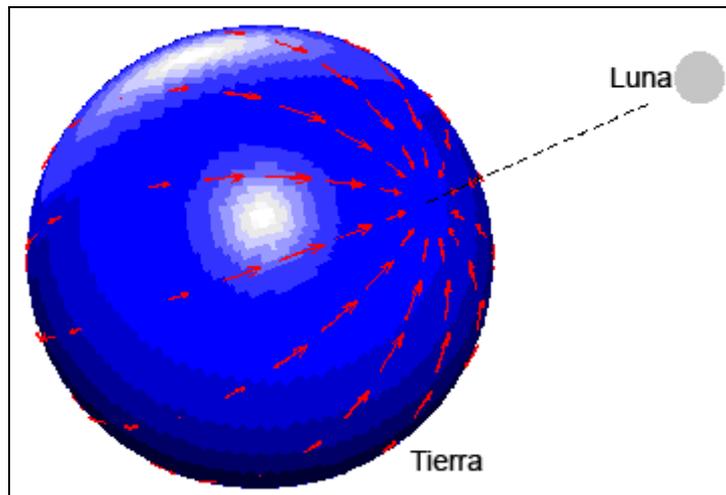


Figura 1.- Movimiento de agua resultante de las aceleraciones motrices

Supóngase que la Luna se encuentra en el plano ecuatorial terrestre, como sucede cada cierto tiempo. Al darse esta circunstancia, las aceleraciones de marea son aproximadamente iguales en magnitud en los dos puntos de cada paralelo situados en lados opuestos de la Tierra, teniendo su módulo máximo en el Ecuador. Las aceleraciones motrices que resultan, de módulo máximo en latitudes medias y cero en el Ecuador, harían que el agua se desplazara hacia los puntos más cercanos y más alejados de la Luna; se establecería un estado de equilibrio (marea de equilibrio) produciéndose un elipsoide con sus dos abombamientos en dichos puntos. Así, paradójicamente, aunque las aceleraciones motrices son mínimas en estos lugares, hacia ellos iría el agua. El eje mayor de este elipsoide de equilibrio coincide con la línea que contiene a los centros de la Tierra y la Luna y el elipsoide es, en este caso, simétrico respecto al Ecuador terrestre.

El elipsoide de la marea de equilibrio no se produce en la realidad, por las razones que se exponen a continuación.

Las posiciones y orientaciones relativas de la Tierra y la Luna no se repiten exactamente ni cada día lunar ni tampoco cada mes lunar, por la existencia de otros fenómenos que hacen que el sistema tenga una periodicidad más compleja. De ellos los dos más importantes, que se manifiestan en variaciones de detalle de la marea, ya descritas, son la declinación de la Luna respecto al plano ecuatorial y la forma elíptica de su órbita.

La órbita de la Luna está inclinada con respecto al plano del Ecuador terrestre. El ángulo que forman ambos planos es de 28° y éste es el valor máximo de la declinación lunar, esto es, de su altura angular respecto al Ecuador. El tiempo que tarda la Luna

en repetir su declinación respecto al Ecuador terrestre es de 28,2 días, más largo, pues, que el de la traslación orbital Tierra-Luna, de sólo 27,3 días. La declinación lunar varía entre -28° y 28° conforme la Luna se va desplazando en su órbita, y vale 0° cuando la Luna está cruzando el plano ecuatorial.

Cuando la Luna tiene una declinación no nula, ya sea norte o sur, las aceleraciones en lados opuestos de un mismo paralelo son desiguales, y por tanto lo son también las dos pleamares correspondientes; este es el origen de la desigualdad diurna. El elipsoide de equilibrio que corresponde a esta situación sigue teniendo su eje principal en la línea que une los centros de la Tierra y la Luna, pero no es ya simétrico respecto al Ecuador.

Cuando la Luna tiene su máximo ángulo de declinación, el plano de los abombamientos del elipsoide mareal está igualmente inclinado respecto al Ecuador, resultando la máxima desigualdad mareal diurna, entre dos pleamares o dos bajamares consecutivas. En latitudes suficientemente elevadas, la desigualdad diurna puede ser tan acusada que de hecho la "pleamar" más baja (correspondiente al paso de la luna por el meridiano inferior del lugar) produzca un nivel del mar inferior al de las bajamares, resultando así el tipo de marea conocido como marea diurna.

La máxima declinación lunar, que produce la desigualdad diurna máxima, corresponde aproximadamente al paso de la Luna por la vertical de los trópicos (latitud 23° S y N), por lo que se conocen las mareas de esta situación como mareas tropicales. Por el contrario cuando la Luna atraviesa el plano ecuatorial y la desigualdad diurna desaparece se habla de mareas ecuatoriales.

La órbita de la Luna alrededor del centro de masas común con la Tierra no es circular, sino ligeramente elíptica, con una excentricidad $e = 0,055$. Varía así la distancia entre los dos astros y con ella la magnitud de las fuerzas generadoras de las mareas. Cuando la Luna está más próxima a la Tierra, en el perigeo, estas fuerzas se incrementan hasta un 20% con respecto a su valor medio. Cuando la Luna está más lejana, en el apogeo, las fuerzas se reducen en otro 20% respecto a la media. El intervalo entre dos perigeos sucesivos es de 27,5 días.

Si uno considera el sistema Tierra-Sol, ligado gravitacionalmente, y con un período orbital de 365,25 días obtendría un sistema de mareas de equilibrio cualitativamente idéntico al de las lunares. Las diferencias están en los períodos asociados a las varias fluctuaciones y en el hecho de que por estar el Sol tan alejado la magnitud de las aceleraciones de marea solares son un 46% menores que las lunares, por lo que tienen un efecto menor, pero apreciable.

El elipsoide de equilibrio producido por el Sol barre la Tierra en el mismo sentido de desplazamiento de nuestra estrella, hacia el oeste, con un período de exactamente 12 horas (el mismo que el Sol). La declinación del Sol, nula en los equinoccios y máxima en los solsticios, da lugar a desigualdades diurnas en las componentes solares de la marea. La órbita de la Tierra alrededor del Sol es también elíptica, con una excentricidad de 0,017. Entre perihelio y afelio hay una diferencia de sólo un 4%, mientras que es de un 13% entre perigeo y apogeo.

Los efectos de las mareas lunar y solar se dejan sentir al mismo tiempo sobre la Tierra, y de sus combinaciones resultan diversas situaciones características.

En el caso más simple, en el que las declinaciones de ambos astros respecto al Ecuador sean cero, las cuatro posiciones relativas más significativas que pueden darse se representan en la Figura 2, vistas desde el cenit polar. El ciclo completo dura 29,5 días. En (a) conjunción y (c) oposición (también llamadas sicigias), las direcciones de las aceleraciones de marea lunar y solar coinciden, habrá por ello pleamares más altas y bajamares más bajas que la media. Éstas son las mareas vivas. En (b) y (d), que son las cuadraturas, los ejes de los dos elipsoides de equilibrio son perpendiculares y resultan las mareas menos acusadas, las mareas muertas o de cuadratura. El intervalo entre dos mareas muertas (o vivas) es de 14,75 días. Se produce así la desigualdad semimensual.

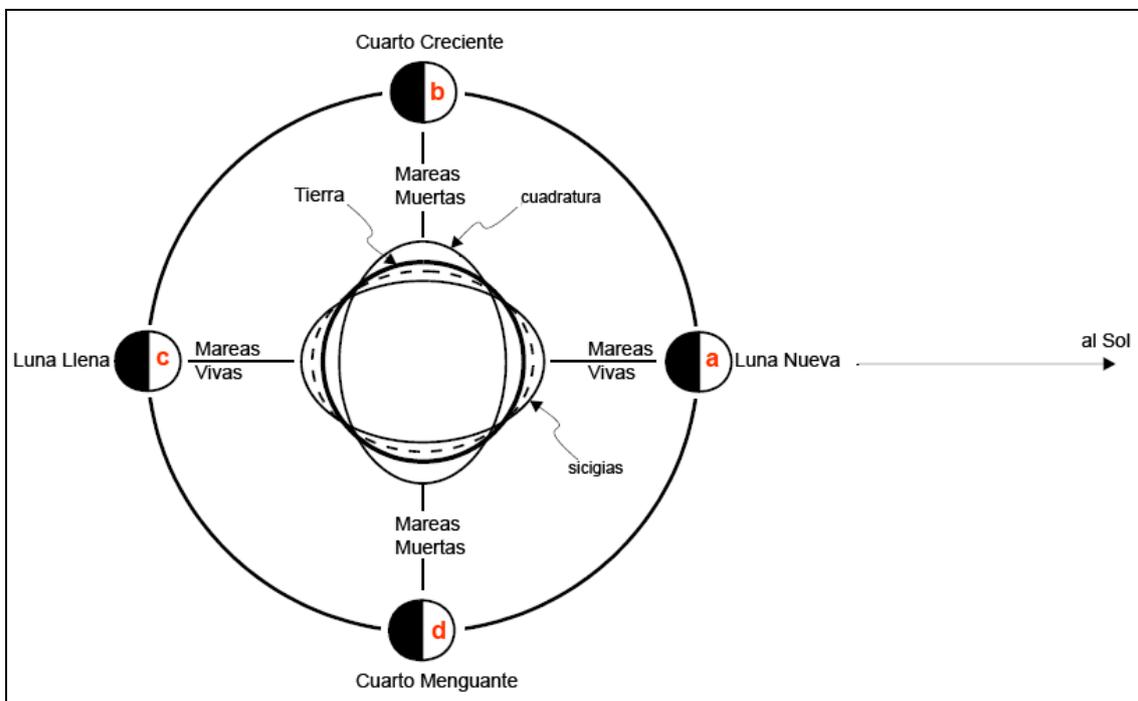


Figura 2.- Diagrama de interacción de las mareas solares y lunares
(a partir de Waves, Tides and Shallow-Water Processes, Open University, Butterworth-Heinemann, 2001)

Los cambios de las declinaciones de Sol y Luna hacen que las combinaciones de sus dos elipsoides de marea vayan variando, de modo que las mareas vivas y muertas presentan también fluctuaciones a lo largo de los meses.

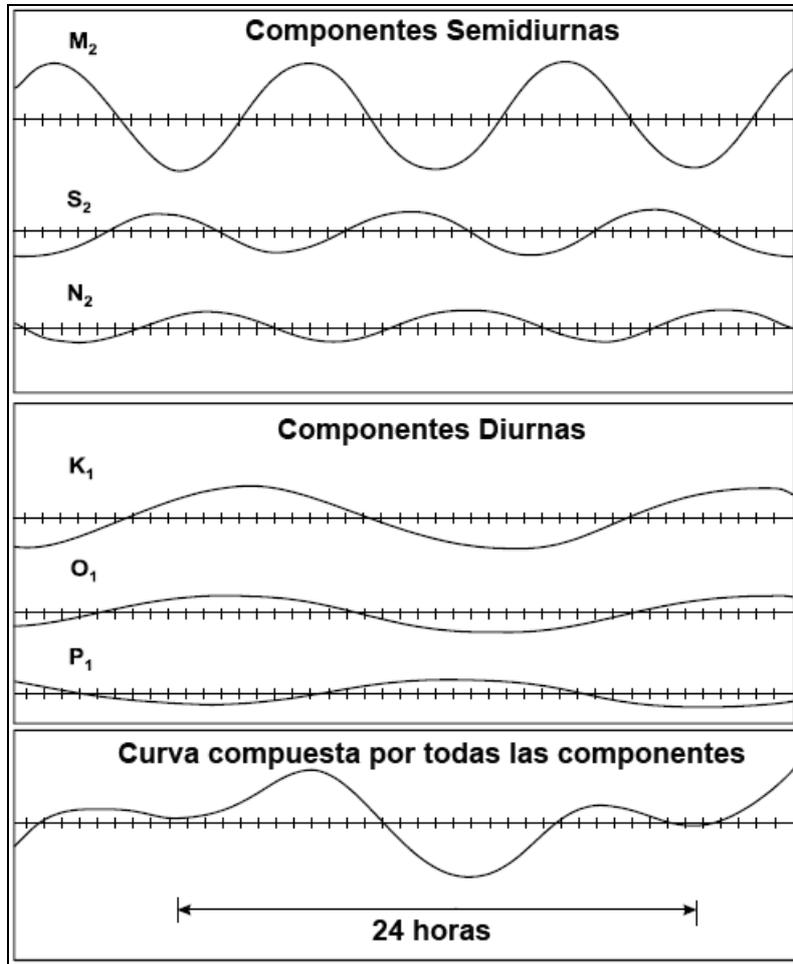


Figura 3.- Representación gráfica de las componentes armónicas principales de las mareas
(a partir de Waves, Tides and Shallow-Water Processes, Open University, Butterworth-Heinemann, 2001)

La mayor marea de equilibrio que puede darse corresponde a la Tierra en perihelio (principios de enero), la Luna en el perigeo, Sol y Luna con declinación cero, y en conjunción (será en el año 6.580).

2.2. Teoría dinámica de las mareas

La teoría de equilibrio, formulada por Newton, explica la relativamente compleja periodicidad de las mareas, pero no es capaz de dar cuenta de las amplitudes observadas. Otro hecho que la teoría de equilibrio no explica es el retraso que la pleamar sufre en algunas latitudes respecto al paso de la Luna por el meridiano. Esto no es sorprendente, ya que la teoría de equilibrio no tiene en cuenta las limitaciones existentes al movimiento de los volúmenes de agua necesarios para el avance de la onda mareal, ni las restricciones impuestas por los límites continentales, ni el efecto de

la aceleración de Coriolis sobre todos los movimientos planetarios de gran escala.

Para superar estas dificultades, Laplace propuso una teoría dinámica, en la cual las mareas se consideran como ondas de período largo (el mismo que las fuerzas que las generan), que se desplazan alrededor de la superficie del planeta, y cuya longitud de onda es tal que hay dos crestas viajando alrededor de la Tierra, en el caso de las mareas semidiurnas, y una sola en el caso de las diurnas. Se trataría pues de una oscilación forzada, que podría verse amplificada por resonancia en caso de poder excitar un sistema oscilante de igual frecuencia.

La marea se entiende así como una gigantesca ola (forzada no por el viento sino por la gravedad lunar y solar) cuya longitud de onda es muy superior a la profundidad del océano y que, por lo tanto, viaja sobre aguas someras (al igual que sucede con cualquier ola, la onda mareal apenas transporta consigo ninguna masa, sólo la involucrada en la elevación y descenso del nivel del mar, inferior en media a una milésima de la columna de agua). La velocidad de las olas sobre aguas someras es $v = (gH)^{1/2}$, siendo H la profundidad del agua y g la aceleración de la gravedad terrestre. Si se considera H el valor medio de la profundidad de los océanos, unos 4 km, el valor de v sería de unos 200 m/s. Pero para que la cresta de una onda mareal recorra toda la circunferencia de la Tierra en poco más de un día solar, a la latitud del ecuador, ha de desplazarse a unos 450 m/s; a latitudes superiores sólo tiene que recorrer una distancia disminuida en un factor coseno de la latitud, de modo que necesita una velocidad menor, que ya es sólo de unos 200 m/s hacia los 65°. El resultado es que a bajas latitudes la marea "dinámica" se retrasa 90° de longitud (fuera de fase) respecto a la de la teoría de equilibrio. En estas latitudes la pleamar se retrasa un cuarto de día solar respecto al paso de la luna por el meridiano; se conocen estas mareas como mareas indirectas.

Al aumentar la latitud, el retraso va disminuyendo hasta ser nulo hacia los 65°. En esta latitud la pleamar coincide con el paso de la luna por el meridiano: son las mareas directas. El establecimiento de puerto es nulo en este caso.

Las latitudes a las que corresponden las mareas directas están, sin embargo, ocupadas en grandes áreas por los hielos en el Ártico y por el continente en el Antártico. Las masas continentales son un obstáculo obvio que impide a la onda de marea circunvalar el globo. De la combinación de la geometría de las cubetas oceánicas y la acción de la aceleración de Coriolis, que actúa sobre todo lo que se mueve sobre la superficie del planeta, resulta el desarrollo de los sistemas anfidrómicos. En cada uno de éstos hay un punto central, llamado punto anfidrómico, en el que el nivel del mar se mantiene estacionario, y alrededor del cual gira una onda

mareal de amplitud creciente conforme nos alejamos del punto anfidrómico. En un sistema anfidrómico las líneas que unen puntos de igual fase de marea, que convergen hacia el punto anfidrómico, se llaman líneas comareales o líneas de igual fase. Las cortan aproximadamente en ángulo recto las curvas que unen puntos donde la amplitud de marea es igual; estas líneas de igual amplitud forman curvas cerradas de radio creciente alrededor de los puntos anfidrómicos. En cada sistema anfidrómico la onda mareal tiene una geometría radial y gira en sentido antihorario en el hemisferio norte (Figura 4 y Figura 5) y en sentido horario en el hemisferio sur.

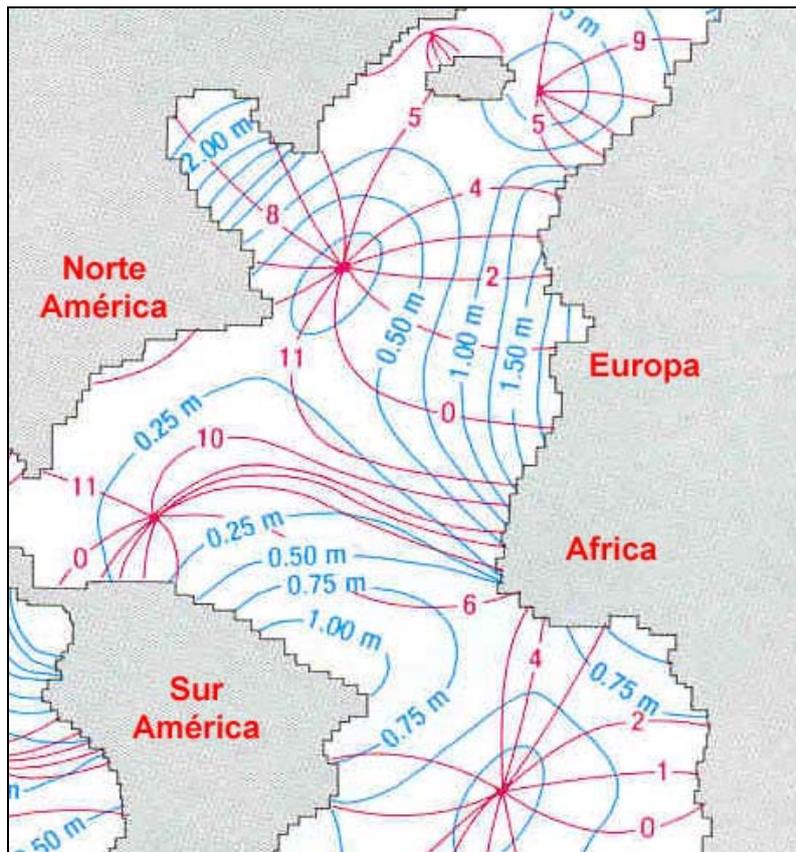


Figura 4.- Puntos anfidrómicos en el Atlántico, líneas comareales (ro.) y de amplitud de marea (az.)
(a partir de Waves, Tides and Shallow-Water Processes, Open University, Butterworth-Heinemann, 2001)

2.3. Método armónico para la predicción de mareas

Se ha visto que sobre la marea influyen una serie de fenómenos periódicos, dependientes todos ellos de los movimientos orbitales de los sistemas Tierra-Luna y Tierra-Sol. La altura observada de la marea puede calcularse como suma de un cierto número de mareas parciales correspondientes a cada uno de los fenómenos que se han discutido. En cada punto de la Tierra cada marea parcial tiene una amplitud y una fase (esto es, un retraso respecto a un tiempo de referencia adecuado, como el paso de la Luna por el meridiano) distintos y característicos de las circunstancias geográficas concretas en ese lugar.

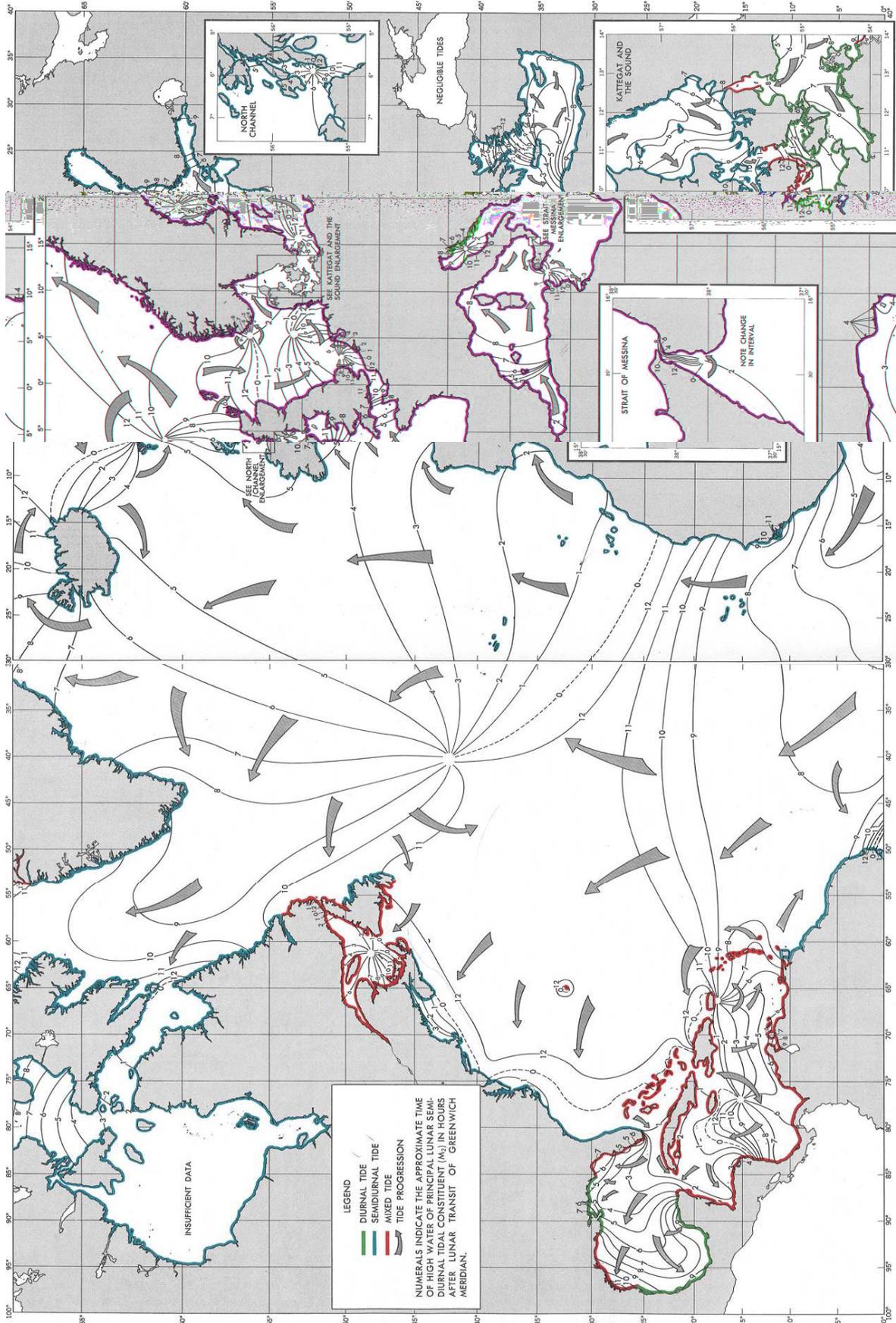


Figura 5.- Mareas en el Atlántico Norte
 (según Oceanographic Atlas of the North Atlantic, US Naval Oceanographic Office, 1965)

A partir de registros de las alturas de marea durante períodos largos comparados con el de la marea parcial que quiera estudiarse, es posible calcular las amplitudes y fases de las componentes que se deseen para un lugar concreto. Desde el punto de vista matemático, éste es un proceso de descomposición de una función, la altura de marea real, en las que se llaman sus componentes armónicas, las mareas parciales. Cada marea parcial se considera como una función cosinusoidal pura, es decir, armónica; de ahí el nombre del método.

Componentes		Periodo en horas	Importancia relativa
<i>Semidiurnas</i>			
M ₂	Lunar principal semidiurna	12,42	100
S ₂	Solar principal semidiurna	12,00	47
N ₂	Lunar elíptica mayor	12,66	19
K ₂	Luni-solar semidiurna	11,97	13
<i>Diurnas</i>			
K ₁	Luni-solar diurna	23,93	58
O ₁	Lunar principal diurna	25,82	42
P ₁	Solar principal diurna	24,07	19
Q ₁	Lunar elíptica mayor diurna	26,87	8
<i>Periodo largo</i>			
M _f	Lunar quincenal	327,9	17
M _m	Lunar mensual	661,3	9
S _{sa}	Solar semianual	4383	8
S _a	Solar anual	8766	1

Tabla 1.- Nombres, símbolos y frecuencias de las componentes de marea más importantes

En España, el Instituto Hidrográfico de la Marina se ocupa de la elaboración de tablas de alturas de mareas a partir de las amplitudes y fases de los armónicos más significativos en los puertos españoles más importantes. Estos valores, junto con los cálculos de las pleamares y bajamares correspondientes se publican en el Anuario de Mareas. Las tablas de mareas recogidas en ésta y otras publicaciones permiten el cálculo de las alturas de marea a cualquier hora y en cualquier puerto español y otros de interés durante el año al que corresponda la tabla.

La previsión de las alturas reales de marea requiere no sólo el cálculo de la marea astronómica, sino también la consideración de los efectos meteorológicos locales, en especial la presión atmosférica y la posible existencia de vientos locales cuya acción prolongada haya podido resultar en modificaciones del nivel del mar. En particular, un viento fuerte y constante soplando en dirección a la costa puede producir una

sobreelevación de la marea y, lo contrario, un viento terral, produciría una depresión del nivel del mar.

2.4. Tipos de mareas astronómicas

Según el comportamiento que la marea tenga a lo largo de cada día se distinguen tres tipos principales de mareas:

- Si hay dos pleamares y dos bajamares, de alturas muy semejantes cada una de ellas, la marea se denomina semidiurna.
- Si en cambio se observa una única pleamar y una bajamar se dice que la marea es diurna.
- Finalmente, si las dos pleamares (o las dos bajamares) consecutivas son significativamente distintas, y de amplitud relativa variable, se habla de marea mixta, con predominancia diurna o semidiurna según la evolución que sufra.

El tipo de marea que se dé en cada costa, y su evolución en amplitud y altura, depende de muchos factores, entre los que se cuentan la latitud, la forma del receptáculo o cuenca donde se suceda la marea, las posibles resonancias de la oscilación del agua en la cuenca, y las posiciones relativas y declinación con respecto a la Tierra de Sol y Luna.

Para caracterizar numéricamente el tipo de marea se define el parámetro $F = (K1 + O1) / (M2 + S2)$, donde K1, O1, M2 y S2 son las amplitudes de los correspondientes constituyentes armónicos.

- Marea semidiurna si $F < 0,25$
- Marea mixta predominantemente semidiurna si $0,25 < F < 1,5$
- Marea mixta predominantemente diurna si $1,5 < F < 3$
- Marea diurna si $F > 3$

Las amplitudes armónicas de los constituyentes K1, O1, M2 y S2 en La Palma se muestran en la Tabla 2 (los armónicos de las mareas registradas se comentan y describen con detalle en el Apartado 4).

K1	O1	M2	S2
0.0582	0.0451	0.6586	0.2595

Tabla 2.- Amplitudes de los armónicos K1, O1, M2 y S2 en La Palma

Así pues, el cálculo para la caracterización numérica del tipo de marea en La Palma, desarrollado en la ecuación de Courtier [2.4-1], indica que se trata de una onda de marea típicamente semidiurna (Figura 5).

$$F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2} = \frac{0,0582 + 0,0451}{0,6586 + 0,2595} = 0,1125 \quad [2.4-1]$$

Las mareas también se caracterizan por la amplitud del rango de marea, es decir, la diferencia que existe entre una bajamar y una pleamar sucesivas. La amplitud de marea varía a lo largo del ciclo de marea dependiendo de la fase lunar (mareas vivas y muertas).

Se hace la siguiente clasificación:

- Rango micromareal si la amplitud de marea equinoccial oscila entre 0m y 2m
- Rango mesomareal si la amplitud de marea equinoccial oscila entre 2m y 4m
- Rango macromareal si la amplitud de marea equinoccial es mayor a 4m

Dado que el rango de marea máximo registrado es de unos 2,6m, se puede concluir que se trata de una onda de marea de rango típicamente mesomareal.

3. REGISTRO DE MAREAS EN LA PALMA

Para registrar el comportamiento de la onda de marea en la isla se instaló un mareógrafo de precisión en el puerto de Santa Cruz de La Palma, así como otros seis mareógrafos repartidos por el litoral (ver Figura 7).

Debido al relieve y exposición de la costa palmera, se apreció en los registros una gran cantidad de perturbaciones ajenas a la marea astronómica, salvo en los puertos de Santa Cruz de La Palma y Tazacorte, los mejor protegidos de la isla.

3.1. Equipos utilizados

Para el registro de las mareas se utilizó en todos los puntos de registro un mareógrafo de precisión *Valeport 740*.

El *Valeport 740* consta de un sensor de presión con venteo a superficie de precisión $\pm 0.1\%$ en todo el rango, resolución de 1mm, memoria de estado sólido de 128kb y frecuencia de registro de 4Hz.

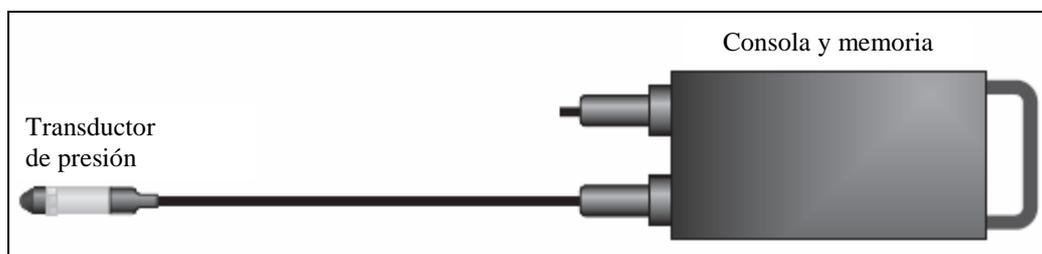


Figura 6.- Esquema del mareógrafo *Valeport 740*

No es necesario aplicar ningún tipo de corrección atmosférica, ya que el sensor compensa automáticamente el peso de la columna de aire mediante el venteo.

De acuerdo con la Dirección de la Asistencia Técnica se establecieron ciclos de medidas de 60 segundos a 4 Hz (240 medidas discretas promediadas) cada 10 minutos.

3.2. Localización de los mareógrafos

Se instalaron siete mareógrafos a lo largo del litoral de la isla siguiendo criterios de accesibilidad y resguardo, procurando la distribución más homogénea posible.

Son los siguientes:

- Santa Cruz de la Palma (puerto patrón de referencia para el cero hidrográfico)
- Barlovento
- Puerto Espíndola
- El Pozo
- Faro de Fuencaliente
- El Remo
- Puerto de Tazacorte

No obstante, debido a la poca abundancia de puertos o refugios en la isla y lo accidentado y expuesto del litoral, únicamente se pudieron ubicar tres mareógrafos en lugares apropiados para la medición de mareas (Puerto de Santa Cruz de La Palma, Puerto de Tazacorte y Puerto Espíndola); mientras que el resto (Faro de Fuencaliente, El Pozo, Piscinas de Barlovento y El Remo) se instalaron en zonas que, si bien estaban expuestas al oleaje, ofrecían un acceso relativamente sencillo y alguna estructura para fijar el equipo y establecer una base topográfica de referencia (escaleras, explanadas, etc.).

El mareógrafo de Santa Cruz de La Palma recogió datos cada diez minutos durante doce meses, mientras que los otros seis mareógrafos lo hicieron de forma simultánea durante un periodo mínimo de treinta días.

Debido a lo accidentado, expuesto e inaccesible de la costa noroeste de la isla (Barlovento y Garafía), no fue posible encontrar un lugar de instalación que asegurara una mínima calidad del registro.

La Figura 7 muestra la localización de los siete mareógrafos instalados en el litoral de la isla.



Figura 7.- Localización de los mareógrafos en el litoral de La Palma

4. ANÁLISIS DE ARMÓNICOS

Se ha realizado el cálculo de los armónicos para los registros completos obtenidos en cada uno de los mareógrafos instalados en el litoral de la isla.

Para el cálculo de los armónicos se han utilizado dos herramientas informáticas:

- Mike 21 (DHI Water & Environment)
- Rutina Easy Tide (Prof. John Boon, Virginia Institute of Marine Science) ejecutada con Matlab (The MathWorks)

Conocer los armónicos que caracterizan la onda de marea permite realizar una predicción de la marea astronómica para un lugar determinado en un momento concreto con gran precisión.

La predicción de la onda de marea mediante armónicos consiste en superponer los numerosos componentes sinusoidales que la forman, caracterizados por las amplitudes y frecuencias determinadas durante el análisis matemático de la onda registrada por el mareógrafo.

4.1. Armónicos de marea en Santa Cruz de La Palma

Los armónicos, o constituyentes de marea, obtenidos del análisis de la serie temporal completa (01/09/03 - 06/09/04) del mareógrafo instalado en el puerto de Santa Cruz de La Palma se representan en la Tabla 3.

S/C de La Palma		
Método del IOS (*1)		
Armónico	Amplitud(m)	Fase(º)
M2	0.6517	29.97
S2	0.2583	52.46
N2	0.1368	16.44
K2	0.0735	50.03
K1	0.0594	42.04
O1	0.0445	294.38
SA	0.0326	187.12
MU2	0.0272	350.06
SSA	0.0260	282.71
NU2	0.0250	17.54
2N2	0.0237	5.86
MSM	0.0200	298.65
P1	0.0166	30.04
T2	0.0158	59.29
Q1	0.0152	234.99
L2	0.0143	43.89
MF	0.0130	28.85
S1	0.0066	196.42
EPS2	0.0065	330.96
NO1	0.0059	12.71
M4	0.0055	84.47
H1	0.0054	256.60
MM	0.0049	13.08
M3	0.0048	155.28
MSF	0.0046	18.23
ETA2	0.0043	74.30
R2	0.0042	140.08
2Q1	0.0037	185.64
MS4	0.0036	167.04
MN4	0.0035	41.07
OQ2	0.0033	344.82
SIG1	0.0031	207.74
H2	0.0028	112.31

S/C de La Palma		
Método Almirantazgo Británico (*2)		
Armónico	Amplitud(m)	Fase(º)
M2	0.6586	29.26
S2	0.2595	52.09
K1	0.0582	41.65
O1	0.0451	-68.75
F4	0.0102	42.59
F6	0.0028	-107.19

(*1) IOS Tidal Package, 1977, Institute of Ocean Sciences, British Columbia, Canada

(*2) The Admiralty simplified harmonic method of tidal prediction, 1977, UK Hydrographic Office, London, UK

Pto. S/C de Tenerife		
Puertos del Estado (2004)		
Armónico	Amplitud(m)	Fase(º)
M2	0.732	29.14
S2	0.279	52.30
N2	0.150	14.87
K2	0.080	48.95
K1	0.064	41.01
SA	0.055	240.33

Pto. de Las Palmas		
Puertos del Estado (2004)		
Armónico	Amplitud(m)	Fase(º)
M2	0.765	28.16
S2	0.290	51.81
N2	0.158	14.05
K2	0.082	48.44
K1	0.062	40.89

Tabla 3.- Armónicos de marea para S/C de La Palma

Se ha incluido la información disponible en Puertos del Estado para S/C de Tenerife y Las Palmas de Gran Canaria como elementos de comparación.

En la Figura 8 se representan de forma gráfica para un periodo de cinco días los armónicos M2, S2, K1, O1 y la combinación de todos ellos, calculados a partir del registro de S/C de La Palma

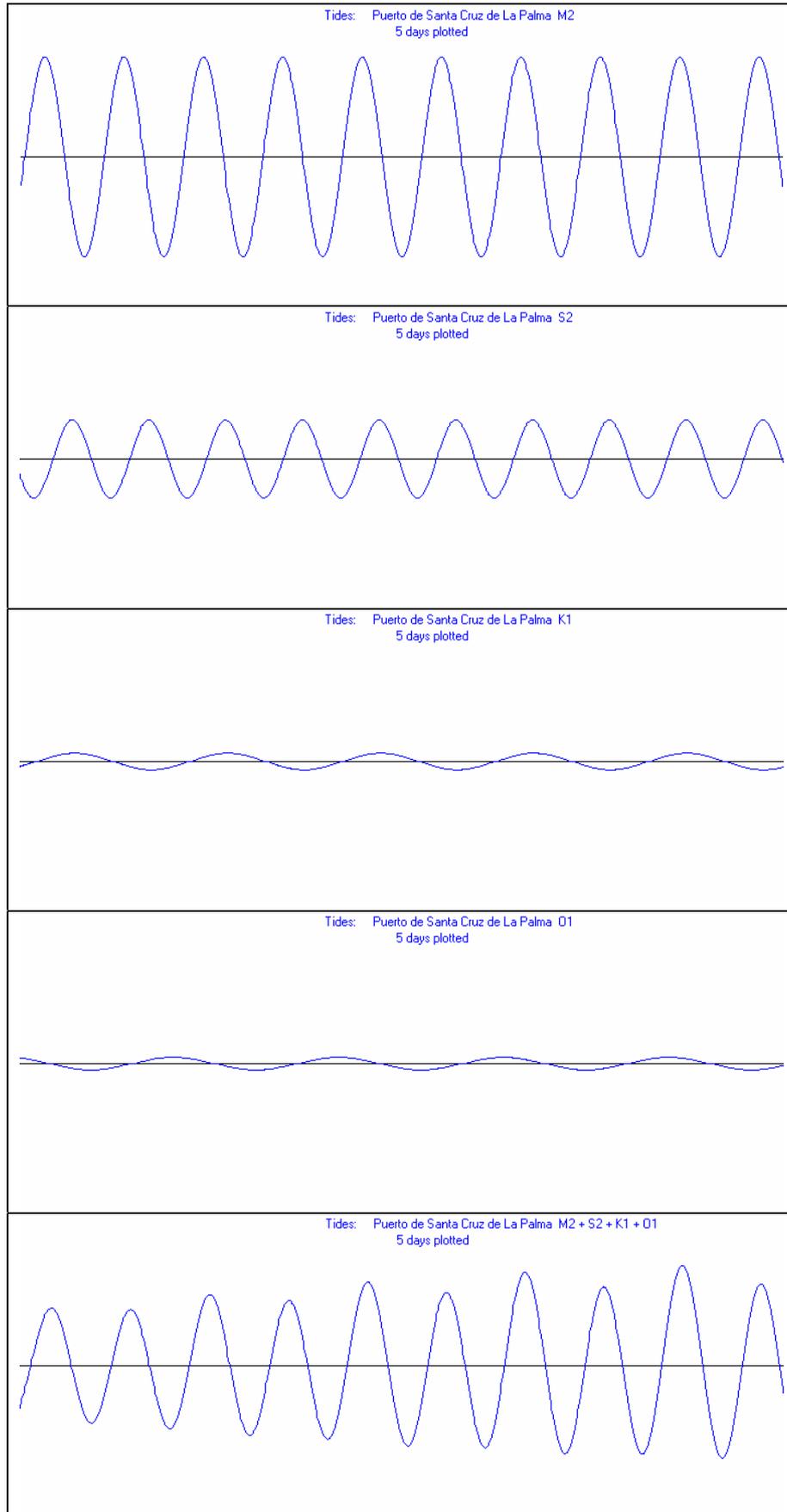


Figura 8.- Representación gráfica de los armónicos M2, S2, K1 y O1 y su sumatorio para La Palma (generado con TPHA, Dalrymple R., Center for Applied Coastal Researh, University of Delaware)

4.2. Armónicos de marea en el Puerto de Tazacorte

Los armónicos, o constituyentes de marea, obtenidos del análisis del registro del mareógrafo instalado en el Puerto de Tazacorte se representan en la Tabla 4.

Puerto de Tazacorte			Puerto de Tazacorte		
Método del IOS (*1)			Método Almirantazgo Británico (*2)		
Armónico	Amplitud(m)	Fase(º)	Armónico	Amplitud(m)	Fase(º)
M2	0.5555	26.04	M2	0.5653	25.51
S2	0.2920	56.07	S2	0.2245	45.33
N2	0.0956	12.52	K1	0.0597	40.62
MM	0.0499	105.74	O1	0.0475	-64.61
K1	0.0469	50.96	F4	0.0116	83.98
O1	0.0460	297.05	F6	0.0036	-74.2
MSF	0.0429	35.02			
MU2	0.0128	284.00			
Q1	0.0120	243.64			
Z0	0.0091	0.00			
L2	0.0075	20.91			
MS4	0.0065	195.88			
M3	0.0041	158.59			
ETA2	0.0039	166.44			
2SK5	0.0039	99.55			
M4	0.0038	100.35			
NO1	0.0035	311.85			
SK3	0.0028	344.67			
EPS2	0.0027	262.67			
UPS1	0.0026	301.07			
SN4	0.0025	331.14			
2MK5	0.0025	353.32			
ALP1	0.0022	358.02			
S4	0.0022	243.85			
2SM6	0.0022	154.13			
MN4	0.0021	47.52			
M6	0.0021	343.70			
2Q1	0.0017	270.09			
J1	0.0017	4.58			
2MN6	0.0017	323.77			
MK3	0.0015	181.62			
M8	0.0013	342.87			
OO1	0.0011	3.06			

(*1) IOS Tidal Package, 1977, Institute of Ocean Sciences, British Columbia, Canada

(*2) The Admiralty simplified harmonic method of tidal prediction, 1977, UK Hydrographic Office, London, UK

Tabla 4.- Armónicos de marea para el Puerto de Tazacorte

4.3. Armónicos de marea en Puerto Espíndola

Los armónicos, o constituyentes de marea, obtenidos del análisis del registro del mareógrafo instalado en Puerto Espíndola se representan en la Tabla 5.

Puerto Espíndola		
Método del IOS (*1)		
Armónico	Amplitud(m)	Fase(º)
M2	0.6613	30.70
S2	0.3230	64.75
N2	0.1171	14.34
K1	0.0534	60.81
MM	0.0456	105.30
O1	0.0427	287.15
MSF	0.0372	41.04
Z0	0.0185	0.00
Q1	0.0141	229.37
L2	0.0125	56.24
MU2	0.0119	320.14
ETA2	0.0091	127.93
NO1	0.0081	305.29
M4	0.0069	78.00
EPS2	0.0046	30.97
SK3	0.0044	12.59
3MK7	0.0039	284.03
S4	0.0037	65.69
M3	0.0036	153.39
J1	0.0034	276.53
2SK5	0.0034	305.78
ALP1	0.0026	111.22
MS4	0.0026	212.99
M6	0.0026	7.64
M8	0.0024	313.64
2SM6	0.0022	275.87
UPS1	0.0019	324.82
MN4	0.0018	19.92
MO3	0.0016	353.36
2MN6	0.0013	119.38
OO1	0.0011	58.61
SN4	0.0011	232.80
2Q1	0.0009	321.40

Puerto Espíndola		
Método Almirantazgo Británico (*2)		
Armónico	Amplitud(m)	Fase(º)
M2	0.6684	30.69
S2	0.2518	53.02
K1	0.0689	49.37
O1	0.0458	-75.37
F4	0.0086	26.15
F6	0.002	-141.12

(*1) IOS Tidal Package, 1977, Institute of Ocean Sciences, British Columbia, Canada

(*2) The Admiralty simplified harmonic method of tidal prediction, 1977, UK Hydrographic Office, London, UK

Tabla 5.- Armónicos de marea para Puerto Espíndola

4.4. Armónicos de marea en Barlovento

Los armónicos, o constituyentes de marea, obtenidos del análisis del registro del mareógrafo instalado en Barlovento se representan en la Tabla 6.

Barlovento			Barlovento		
Método del IOS (*1)			Método Almirantazgo Británico (*2)		
Armónico	Amplitud(m)	Fase(º)	Armónico	Amplitud(m)	Fase(º)
M2	0.4834	18.71	M2	0.6635	29.975
Z0	0.0529	0.00	S2	0.2557	52.555
K1	0.0287	6.87	K1	0.0636	45.51
M3	0.0071	199.45	O1	0.0455	-72.06
M4	0.0063	176.43	F4	0.0094	34.37
2MK5	0.0043	254.97	F6	0.0024	-124.155
2SK5	0.0022	339.91			
3MK7	0.0039	37.93			
M6	0.0031	39.26			
M8	0.0007	232.77			

(*1) IOS Tidal Package, 1977, Institute of Ocean Sciences, British Columbia, Canada

(*2) The Admiralty simplified harmonic method of tidal prediction, 1977, UK Hydrographic Office, London, UK

Tabla 6.- Armónicos de marea para Barlovento

4.5. Armónicos de marea en El Pozo

Los armónicos, o constituyentes de marea, obtenidos del análisis del registro del mareógrafo instalado en El Pozo se representan en la Tabla 7.

El Pozo			El Pozo		
Método del IOS (*1)			Método Almirantazgo Británico (*2)		
Armónico	Amplitud(m)	Fase(º)	Armónico	Amplitud(m)	Fase(º)
M2	0.4774	18.23	M2	0.6227	33.81
Z0	0.0569	0.00	S2	0.2498	55.5
K1	0.0252	6.84	K1	0.0305	18.54
M3	0.0101	199.44	O1	0.0395	-30.7
M4	0.0043	176.42	F4	0.0714	61.22
2MK5	0.0033	254.97	F6	0.0965	-11.72
2SK5	0.0032	339.91			
3MK7	0.0029	37.93			
M6	0.0021	39.26			
M8	0.0006	232.77			

(*1) IOS Tidal Package, 1977, Institute of Ocean Sciences, British Columbia, Canada

(*2) The Admiralty simplified harmonic method of tidal prediction, 1977, UK Hydrographic Office, London, UK

Tabla 7.- Armónicos de marea para El Pozo

4.6. Armónicos de marea en el Faro de Fuencaliente

Los armónicos, o constituyentes de marea, obtenidos del análisis del registro del mareógrafo instalado en el Faro de Fuencaliente se representan en la Tabla 8.

Faro de Fuencaliente Método del IOS (*1)			Faro de Fuencaliente Método Almirantazgo Británico (*2)		
Armónico	Amplitud(m)	Fase(°)	Armónico	Amplitud(m)	Fase(°)
M2	0.5886	32.06	M2	0.6037	28.71
S2	0.3026	57.04	S2	0.2275	47.96
O1	0.0523	302.27	K1	0.0565	46.35
MSF	0.0478	69.33	O1	0.0538	-63.15
K1	0.0349	47.59	F4	0.0195	72.72
MS4	0.0090	170.41	F6	0.0036	-26.4
Z0	0.0072	0.00			
M3	0.0058	146.67			
M4	0.0049	87.34			
S4	0.0049	233.54			
M6	0.0022	2.03			
M8	0.0019	280.34			
2SM6	0.0017	238.99			
SK3	0.0015	148.16			
2SK5	0.0014	194.20			
2MK5	0.0007	333.65			
2MS6	0.0007	68.68			
3MK7	0.0007	7.03			

(*1) IOS Tidal Package, 1977, Institute of Ocean Sciences, British Columbia, Canada

(*2) The Admiralty simplified harmonic method of tidal prediction, 1977, UK Hydrographic Office, London, UK

Tabla 8.- Armónicos de marea para el Faro de Fuencaliente

4.7. Armónicos de marea en El Remo

Los armónicos, o constituyentes de marea, obtenidos del análisis del registro del mareógrafo instalado en El Remo se representan en la Tabla 9.

El Remo Método del IOS (*1)			El Remo Método Almirantazgo Británico (*2)		
Armónico	Amplitud(m)	Fase(°)	Armónico	Amplitud(m)	Fase(°)
M2	0.5690	30.25	M2	0.5832	26.67
S2	0.3039	53.89	S2	0.2292	44.55
O1	0.0520	303.18	K1	0.0623	52.79
MSF	0.0506	72.53	O1	0.0526	-64.26
K1	0.0368	54.52	F4	0.0121	85.53
M4	0.0054	63.54	F6	0.0122	-26.42
M3	0.0043	134.97			
MS4	0.0043	169.25			
Z0	0.0041	0.00			
2MS6	0.0039	19.72			
S4	0.0035	263.24			
M8	0.0027	16.59			
3MK7	0.0019	147.49			
2SM6	0.0017	200.67			
2MK5	0.0016	140.63			
SK3	0.0014	132.91			
M6	0.0012	353.99			
2SK5	0.0006	196.84			

(*1) IOS Tidal Package, 1977, Institute of Ocean Sciences, British Columbia, Canada

(*2) The Admiralty simplified harmonic method of tidal prediction, 1977, UK Hydrographic Office, London, UK

Tabla 9.- Armónicos de marea para El Remo

4.8. Conclusiones

Las mareas registradas en la isla de La Palma son de tipo semidiurno con rangos de marea mesomareales, tal y como se describe en el Apartado 2.4.

Se han encontrado diferencias en la onda de marea registrada entre las costas este y oeste de La Palma. Sin llegar al tratamiento exhaustivo que se obtendría realizando un análisis multivariante de los componentes armónicos, se pueden distinguir dos grupos bien diferenciados: Barlovento – Puerto Espíndola – S/C de La Palma – El Pozo por un lado y Puerto de Tazacorte – El Remo por el otro, quedando el Faro de Fuencaliente como zona de transición entre ambos.

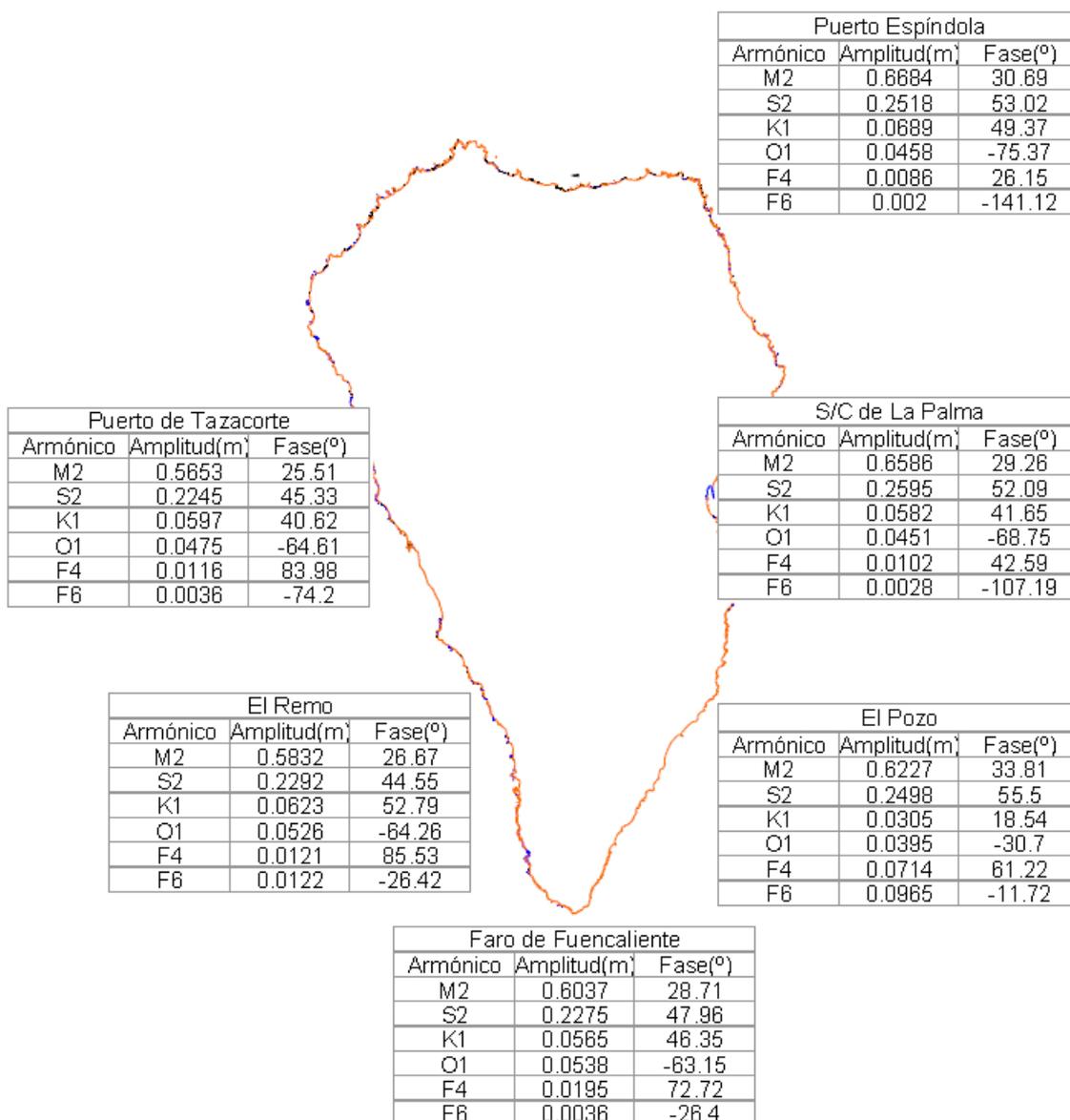


Figura 9.- Armónicos de marea a lo largo del litoral de La Palma

5. CERO HIDROGRÁFICO EN LA PALMA

En el presente apartado se describirá y justificará la elección del nivel de referencia adoptado para los trabajos de batimetría y topografía ejecutados durante el desarrollo del Estudio Ecocartográfico del Litoral de la Isla de La Palma.

5.1. Criterios de nivelación

Existen diversos métodos y criterios para establecer datums o niveles de referencia, tal y como se mencionó en el Apartado 2.

De forma genérica, se puede decir que:

- El nivel de referencia de la marea o cero del mareógrafo es el nivel del mar definido por alguna fase de la marea, a la cual se refieren las profundidades y las alturas de la misma.
- El cero hidrográfico o cero de la carta náutica es el nivel, plano o superficie establecida como permanente a la cual se reducen tanto las sondas en un levantamiento hidrográfico, como las alturas de marea.

Estas definiciones genéricas extraídas del Dictionnaire Hydrographique International (DHI), editado por el Bureau Hydrographique International (BHI/IHO), no determinan con claridad cuál es el nivel de referencia que debe ser utilizado.

A efectos prácticos, se puede considerar que no existe un único nivel de referencia, o datum, válido e indiscutible. Según el proyecto técnico, cartografía temática, Oficina Hidrográfica, Autoridad Portuaria o Administración Pública pueden encontrarse distintos niveles de referencia.

En cualquier caso, es fundamental que todos los planos de comparación se encuentren correctamente argumentados y definidos e inequívocamente enlazados entre sí.

5.2. Definiciones

Para que las argumentaciones expuestas en el presente documento no lleven a confusión, se establecen las siguientes definiciones básicas:

Nivel Medio del Mar: Consideraremos que el nivel medio del mar (NMM, MSL en inglés) se define como el promedio de los registros de marea (marea astronómica + marea meteorológica) para un periodo determinado en la zona de estudio.

Bajamar Máxima Viva Equinoccial: Consideraremos que la bajamar máxima viva equinoccial (BMVE) o bajamar escorada se define como la mayor bajamar histórica registrada (marea astronómica + marea meteorológica) en la zona de estudio. En ocasiones el cero hidrográfico se define como la BMVE.

Bajamar Astronómica Más Baja: Consideraremos que la bajamar astronómica más baja (en inglés: Lowest Astronomical Tide, LAT) es el nivel más bajo de marea predecible bajo condiciones meteorológicas promedio y bajo cualquier combinación de condicionantes astronómicos.

5.3. Mareógrafos en el puerto de S/C de La Palma

Para registrar la marea en La Palma durante el desarrollo del presente estudio, se utilizó un mareógrafo de precisión autocompensado Valeport 740 instalado en el interior de la dársena del puerto de Santa Cruz de La Palma (Figura 10).

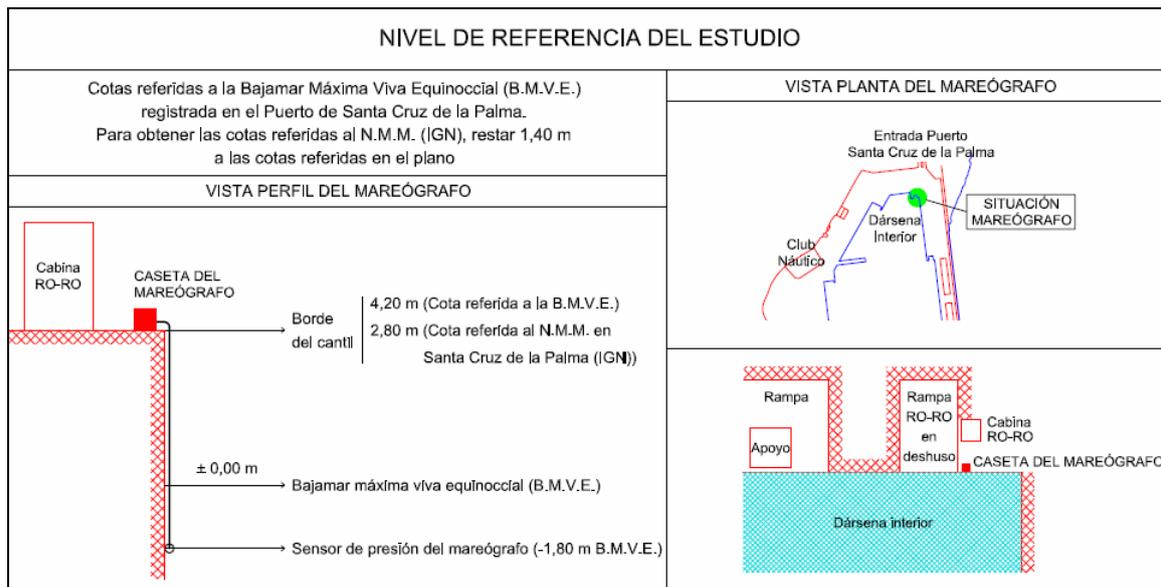


Figura 10.- Localización y referencias del mareógrafo Valeport740

Los valores mínimos y máximos registrados fueron, respectivamente, -1.19 m y 1.44 m, ambos referidos al nivel medio del mar en Santa Cruz de La Palma.

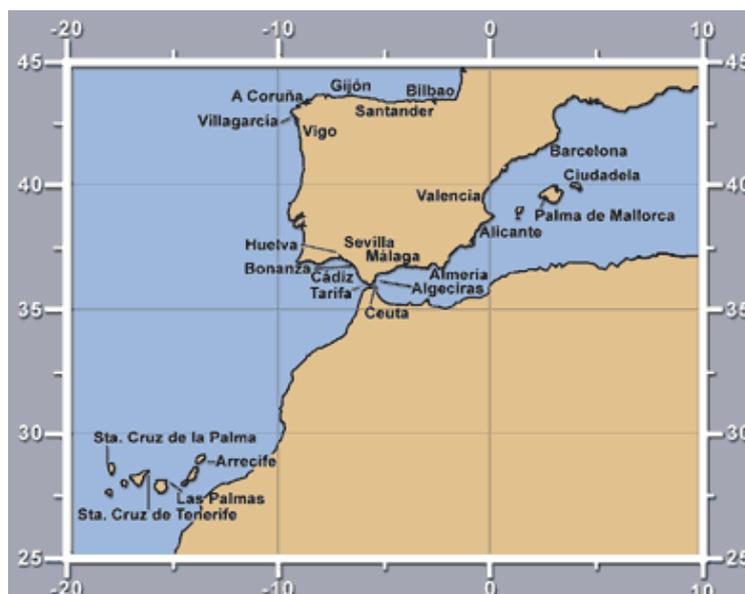


Figura 11.- Red Integrada de mareógrafos

Adicionalmente, en el puerto de Santa Cruz de la Palma se encuentra instalado un mareógrafo gestionado por el Instituto Español de Oceanografía (IEO), incluido dentro de la Red Integrada de Mareógrafos (RIMA, Figura 11). Dicho mareógrafo lleva registrando la marea desde 1997 y ha sido nivelado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN bases NGU437 y SS1M, ver ANEJO 5.) respecto al nivel medio del mar en Santa Cruz de la Palma en el año 1997.

El mareógrafo gestionado por el IEO es mecánico de flotador, con codificador óptico, salida digital y transmisión vía modem telefónico. En un futuro inmediato se instalará un nuevo mareógrafo que será nuevamente enlazado con la red geodésica del IGN.

En cualquier caso, cabe destacar que el IEO dispuso de mareógrafo en Santa Cruz de la Palma desde 1949 a 1989, pero, en su momento, no fue posible enlazar la nivelación entre éste (mareógrafo 1949) con las nuevas instalaciones (mareógrafo 1997), por lo que los datos anteriores a 1997 deberían volver a ser procesados para poder ser tenidos en cuenta en el cálculo de la bajamar máxima viva equinoccial.

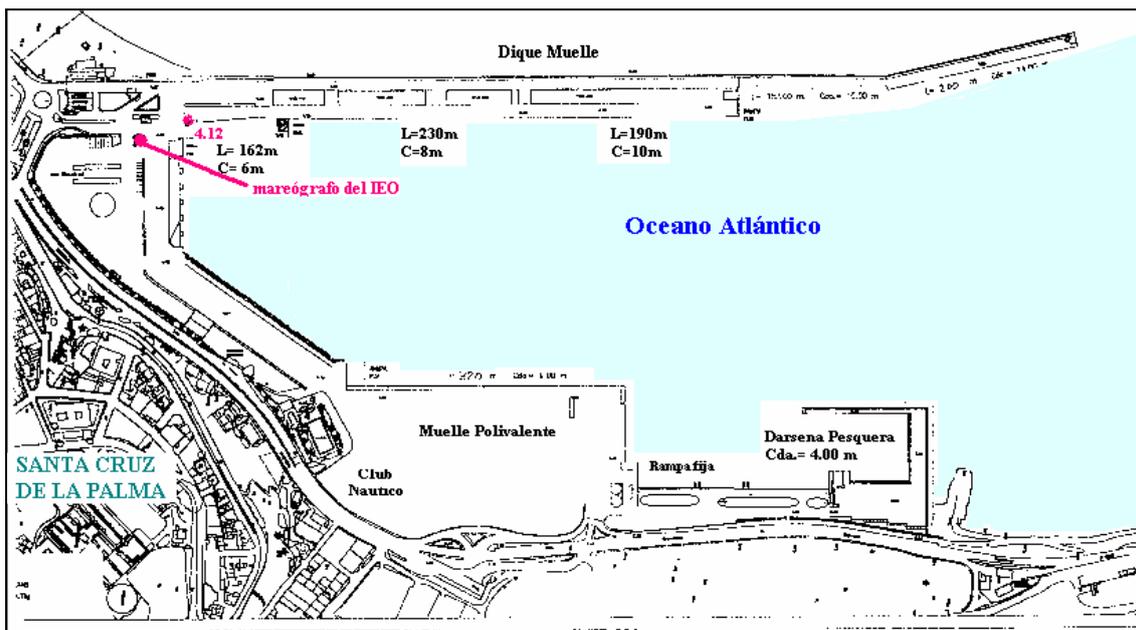


Figura 12.- Localización del mareógrafo del IEO en el puerto de S/C de La Palma (desde 1997)
(Fuente: Instituto Español de Oceanografía)

5.4. Niveles de referencia en La Palma

Según los criterios expuestos anteriormente existen diversas opciones para definir el nivel de referencia, o datum, para los trabajos topobatimétricos. Son los siguientes:

5.4.1. Nivel Medio del Mar Local

El nivel medio del mar en Santa Cruz de La Palma fue definido por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) como la media aritmética de los datos registrados en el año 1997 por el mareógrafo del IEO en Santa Cruz de La Palma.

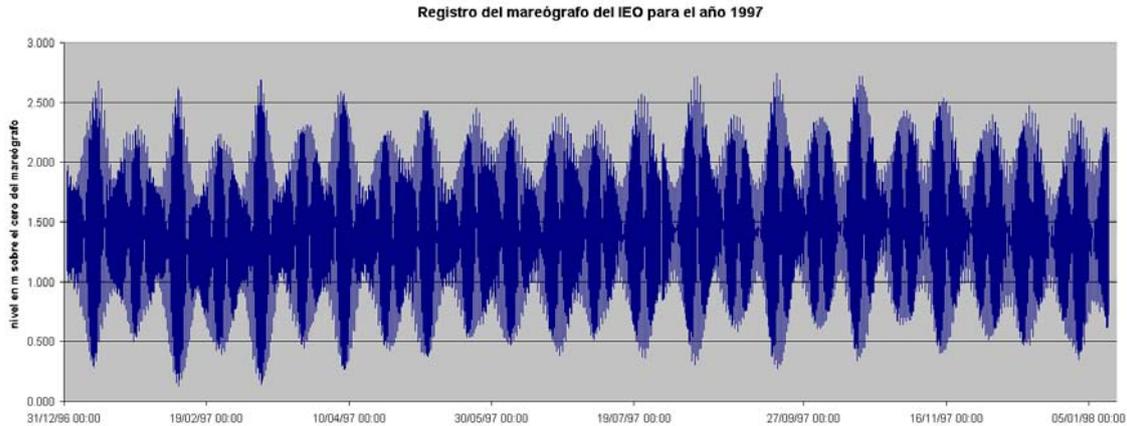


Figura 13.- Registro del mareógrafo del IEO para el año 1997 en S/C de La Palma
(Fuente: Instituto Español de Oceanografía)

El IGN tiene implantada una red de nivelación en La Palma referida al nivel medio del mar local. Todas las cotas de los mapas topográficos del IGN están referidas a este datum.

5.4.2. Bajamar Máxima Viva Equinoccial

La BMVE registrada por el mareógrafo Valeport 740 durante el periodo de mediciones incluidas en este estudio, se produjo el 25/11/2003 a las 08:08 UTC y llegó hasta los -1,19 m por debajo del nivel medio del mar local (Figura 14).



Figura 14.- Nivelación y bajamar máxima del mareógrafo Valeport 740

La BMVE registrada por el mareógrafo del IEO durante el periodo 1997 – 2004 se produjo el 09/02/1997 a las 08:30 UTC y llegó hasta los -1,28 m por debajo del nivel medio del mar local.

5.4.3. Bajamar Astronómica Más Baja

El BHI/IHO recomienda^(a) la utilización de la bajamar astronómica más baja (LAT) para establecer el datum. Ver definición de LAT en el Apartado 5.2.

Se recomienda el cálculo de la LAT para un horizonte de predicción de un mínimo de 19 años, utilizando las constantes armónicas derivadas de un periodo mínimo de observaciones de un año o por otros métodos de validez probada. A ser posible, los valores de marea calculados deberían reflejar los errores estimados en la determinación de los niveles.

Habiéndose realizado una predicción de marea astronómica para el periodo 2005 a 2024, la LAT calculada se producirá el 28/09/2015 a las 19:29 UTC y llegará hasta los -1,17 m por debajo del nivel medio del mar local.

5.4.4. Cero del mareógrafo

El cero del mareógrafo es la marca inferior del mareógrafo; a la cual quedan referidas las alturas del nivel del mar registradas por el mareógrafo.

El cero del mareógrafo se sitúa en base al comportamiento local de la marea, de modo que dicha marca permanezca siempre bajo el agua, aun con las mareas más bajas, con el objeto de registrar las bajamares mayores con escala positiva.

Para el mareógrafo de Santa Cruz de La Palma, están establecidas las siguientes relaciones:



Figura 15.- Nivelación del mareógrafo IEO para la base SS1M

^(a) Resolución Técnica A2.5 (Resolutions of the IHO, Miscellaneous Publications M-3, junio 2005, Oficina Hidrográfica Internacional (BHI/IHO), Mónaco)

Por lo tanto, el cero del mareógrafo del IEO sito en S/C de La Palma se localiza a -1,41 m por debajo del nivel medio del mar local.

5.4.5. Cero del Puerto

La Autoridad Portuaria de Santa Cruz de Tenerife tiene implantada una poligonal nivelada en el puerto de Santa Cruz de la Palma. Dicha poligonal del puerto consta de 13 bases enlazadas a tres vértices geodésicos del IGN.

Al comparar el vértice AP-6 de la poligonal de la Autoridad Portuaria, nivelada al cero del puerto y calculada su altura con respecto al NMM, con la base SS1M del IGN, nivelada al NMM y el cero del mareógrafo, se puede concluir que el cero del puerto es equivalente al cero del mareógrafo.

	Base SS1M	Vértice AP-6 (8006)
z sobre NMM	3.19 m	2,82 m
z sobre CM	4,60 m	
z sobre CP		4,23 m

NMM: nivel medio del mar en 1997, CM: cero del mareógrafo, CP: cero del puerto

5.4.6. Cero Hidrográfico

En España, es el Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM) el encargado de establecer el cero hidrográfico de las cartas náuticas y portuarios siendo el nivel al cual están referidas todas las sondas.

Para la carta náutica de La Palma se establece que el cero hidrográfico es la mayor bajamar (sin indicaciones adicionales).

En la actualidad el Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM) está en proceso de recálculo del cero hidrográfico para Santa Cruz de la Palma. Hasta la fecha no hay datos oficiales.

5.5. Nivel de referencia del estudio

Tras haber analizado todos los datos disponibles, y en consenso con la Dirección de la Asistencia Técnica, se optó por tomar el cero del mareógrafo de Santa Cruz de La Palma como nivel de referencia; teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se trata de un nivel bien definido y enlazado.
- Existe una importante serie temporal de registros referida a ese origen que se continuará en el futuro.
- No ha sido superado por ninguna bajamar máxima viva equinoccial durante los últimos ocho años.
- No se prevé que sea superado durante los próximos 20 años.

- Es el nivel de referencia (cero del mareógrafo) del único mareógrafo oficial instalado en La Palma.
- Es el nivel de referencia (cero del puerto) del puerto patrón (Santa Cruz de La Palma) de la isla.

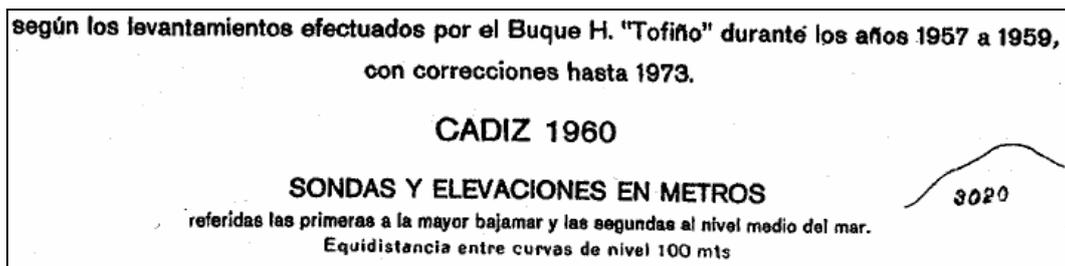
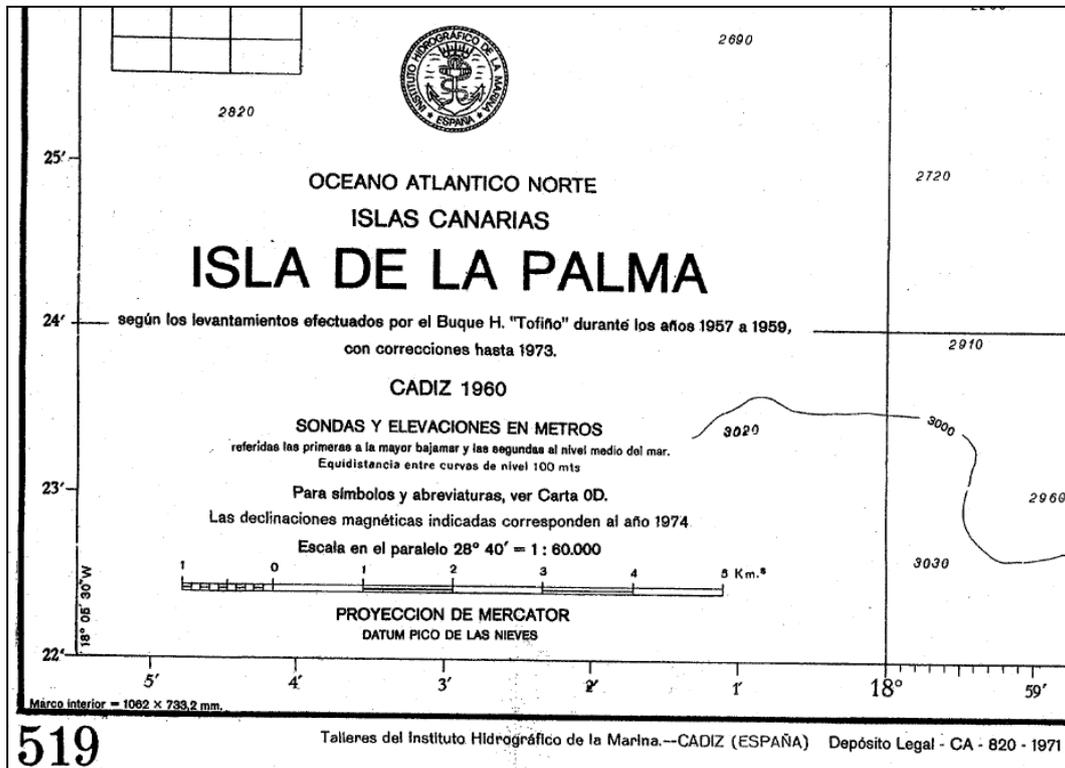


Figura 16.- Detalle de la Carta Nautica de la Isla de La Palma
(Fuente: Instituto Hidrográfica de la Marina)

6. ESTUDIO COMPARATIVO DE LA ONDA DE MAREA EN LA PALMA

En este apartado se desarrollará un estudio comparativo de la onda de marea entre el mareógrafo de referencia situado en el puerto patrón de Santa Cruz de La Palma y cada uno de los otros seis aparatos localizados a lo largo del litoral de La Palma.

Teniendo en cuenta el avance de la onda de marea en la isla de La Palma (Figura 5) y la caracterización armónica obtenida en el Apartado 4, no se espera observar un decalaje significativo en el paso de la onda de marea, pero sí es esperable la existencia de diferencias en los rangos de marea y desplazamientos debidos a la acción del viento y el oleaje.

6.1. Santa Cruz de La Palma vs. Puerto de Tazacorte

Seguramente se trate de los dos registros más fiables por su ubicación y más significativos por la importancia de su localización.

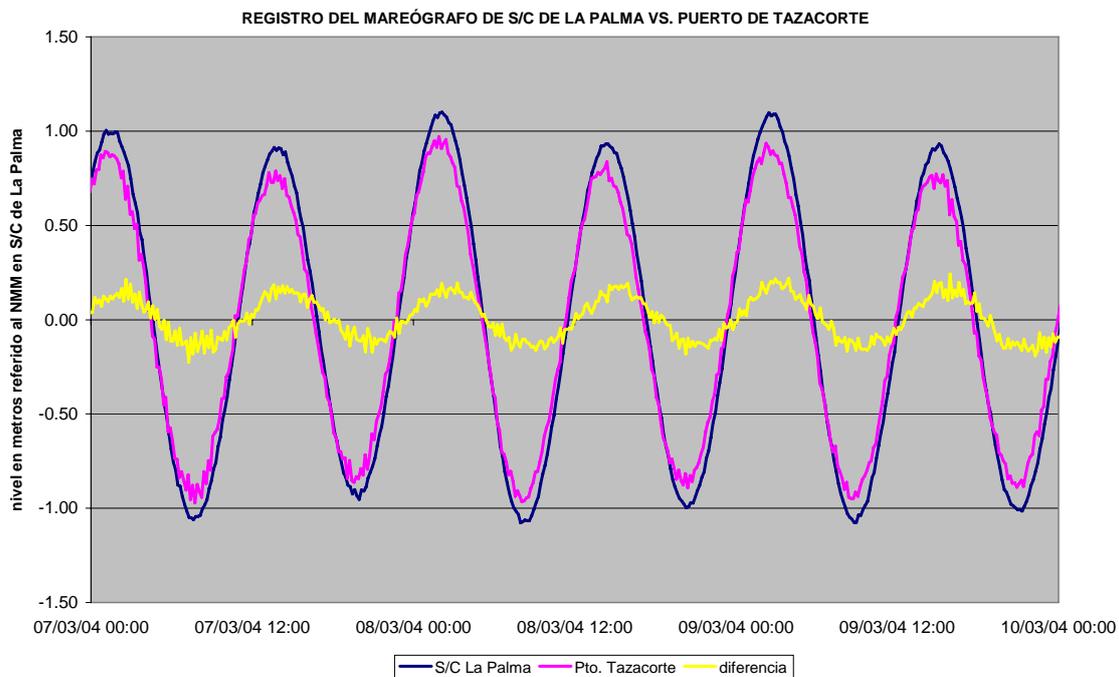


Figura 17.- S/C de La Palma vs. Puerto de Tazacorte en mareas vivas

Durante un periodo de mareas vivas, se observa una diferencia en la amplitud de la onda de marea que se repite con una pauta sinusoidal bien definida, lo que hace pensar que no se trata de un desplazamiento meteorológico.

Se observa con bastante claridad que la marea en el Puerto de Tazacorte tiene una amplitud menor que en el puerto patrón de S/C de La Palma.

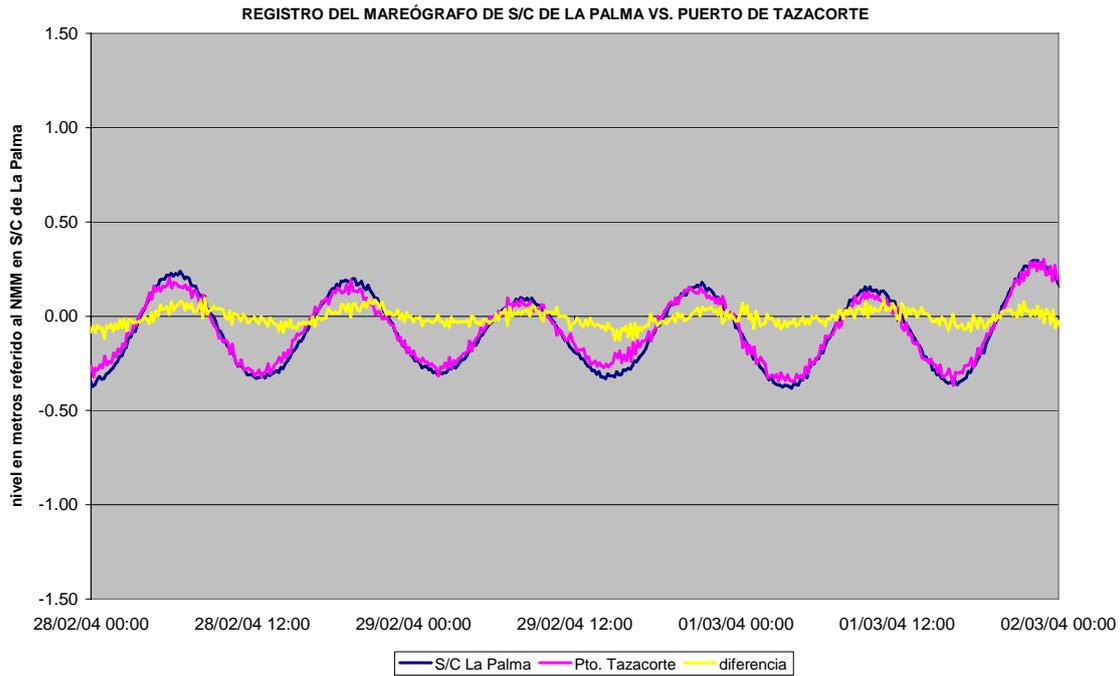


Figura 18.- S/C de La Palma vs. Puerto de Tazacorte en mareas muertas

Si bien de forma muy atenuada, durante mareas muertas se observan diferencias entre ambas ondas de marea.

6.2. Santa Cruz de La Palma vs. Puerto Espíndola

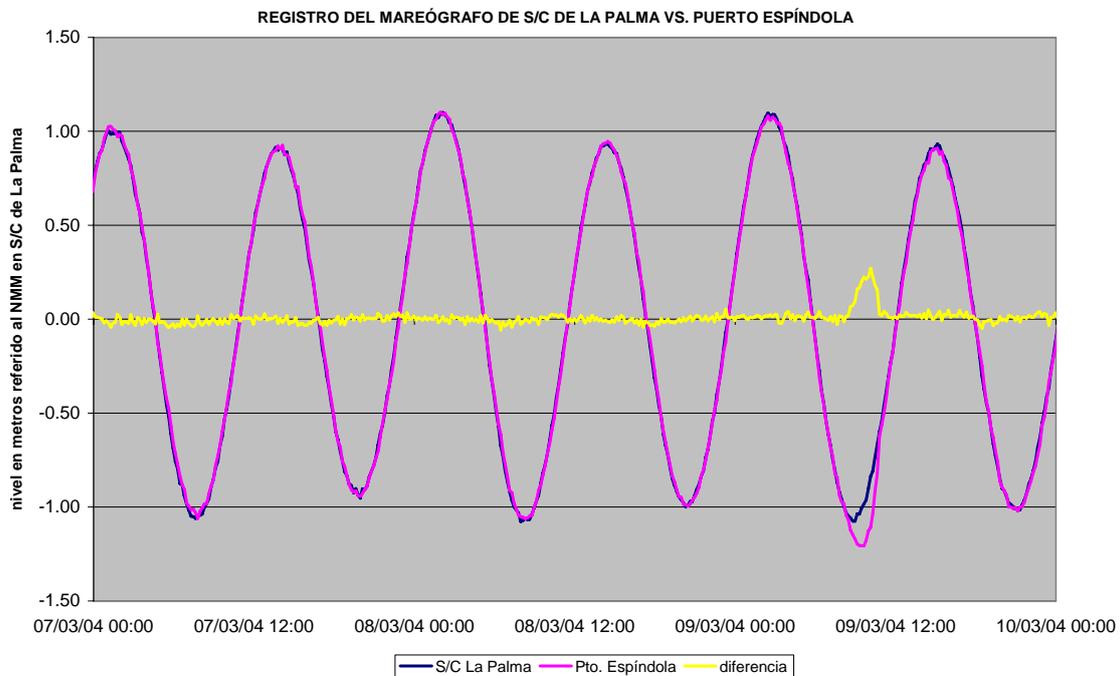


Figura 19.- S/C de La Palma vs. Puerto Espíndola en mareas vivas

El acople entre ambos registros de marea es muy bueno tanto durante las mareas vivas como durante las muertas, salvo cuando, debido al viento y al oleaje (el mareógrafo se encuentra en una zona expuesta de forma directa a los vientos Alisios), hay un desplazamiento frente a la marea astronómica (residuos de marea).

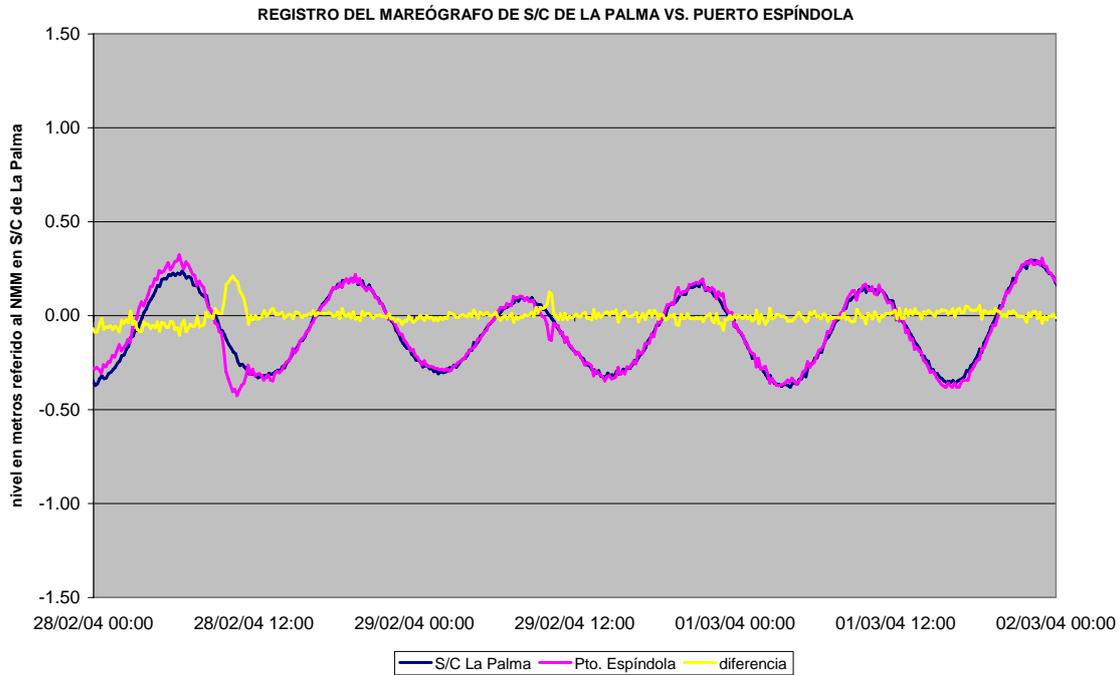


Figura 20.- S/C de La Palma vs. Puerto Espíndola en mareas muertas

6.3. Santa Cruz de La Palma vs. El Pozo

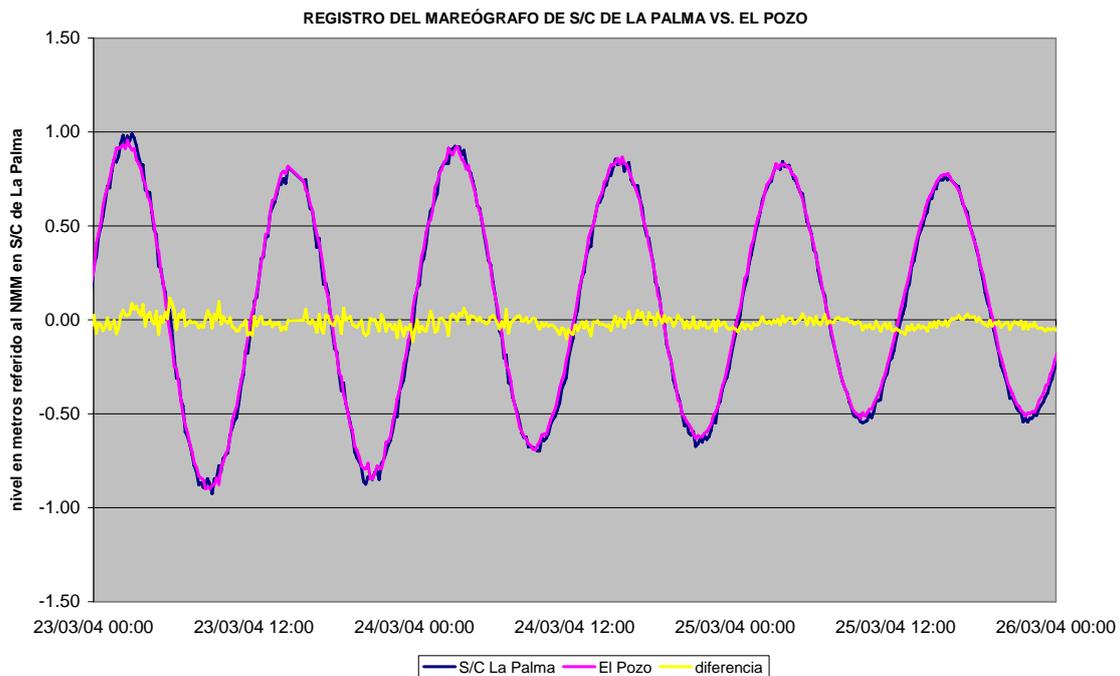


Figura 21.- S/C de La Palma vs. El Pozo en mareas vivas

Al igual que en Puerto Espíndola, el acople entre ambos registros de marea es muy bueno tanto durante las mareas vivas como durante las muertas. Si bien el registro presenta bastante ruido, no se observan desplazamientos significativos entre un emplazamiento y el otro.

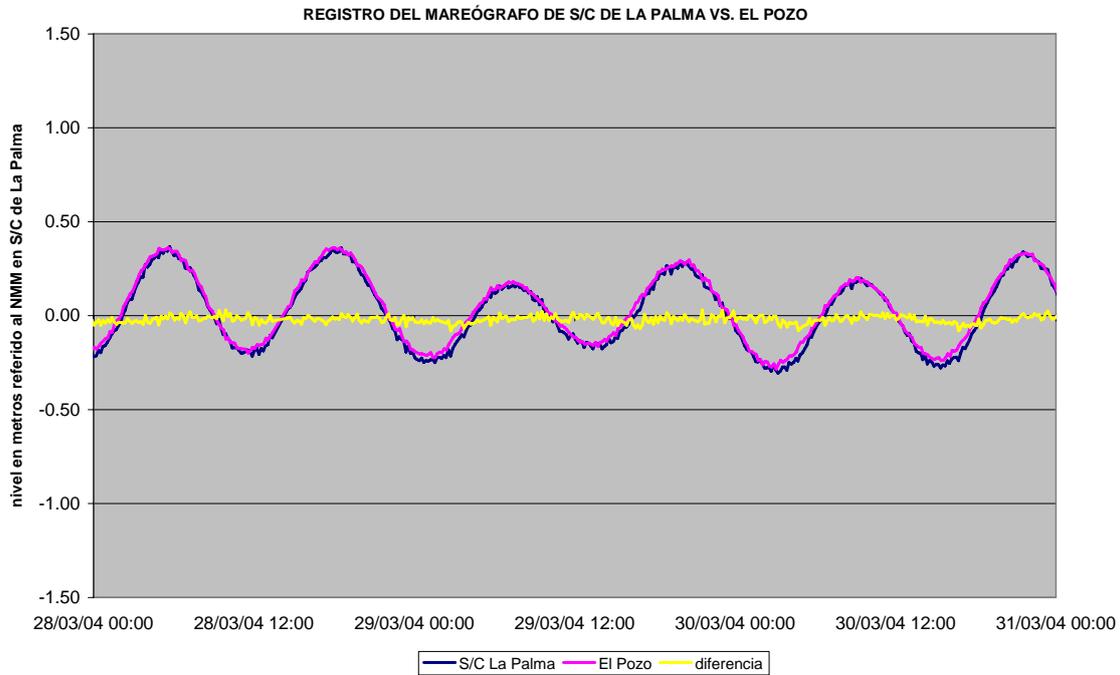


Figura 22.- S/C de La Palma vs. El Pozo en mareas muertas

6.4. Santa Cruz de La Palma vs. Faro de Fuencaliente

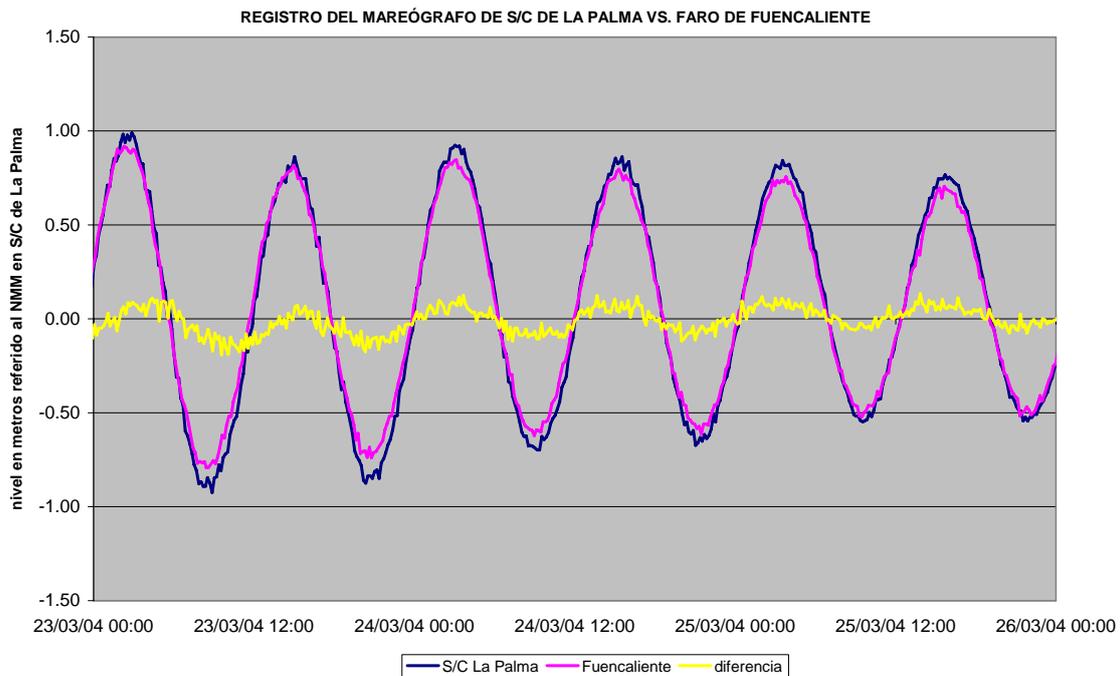


Figura 23.- S/C de La Palma vs. Faro de Fuencaliente en mareas vivas

Al comparar los registros de S/C de La Palma y el Faro de Fuencaliente, se empiezan a hacer evidentes las diferencias en la amplitud de marea. Dicha diferencia se observa de forma significativa durante las mareas vivas, siendo prácticamente imperceptible durante las muertas.

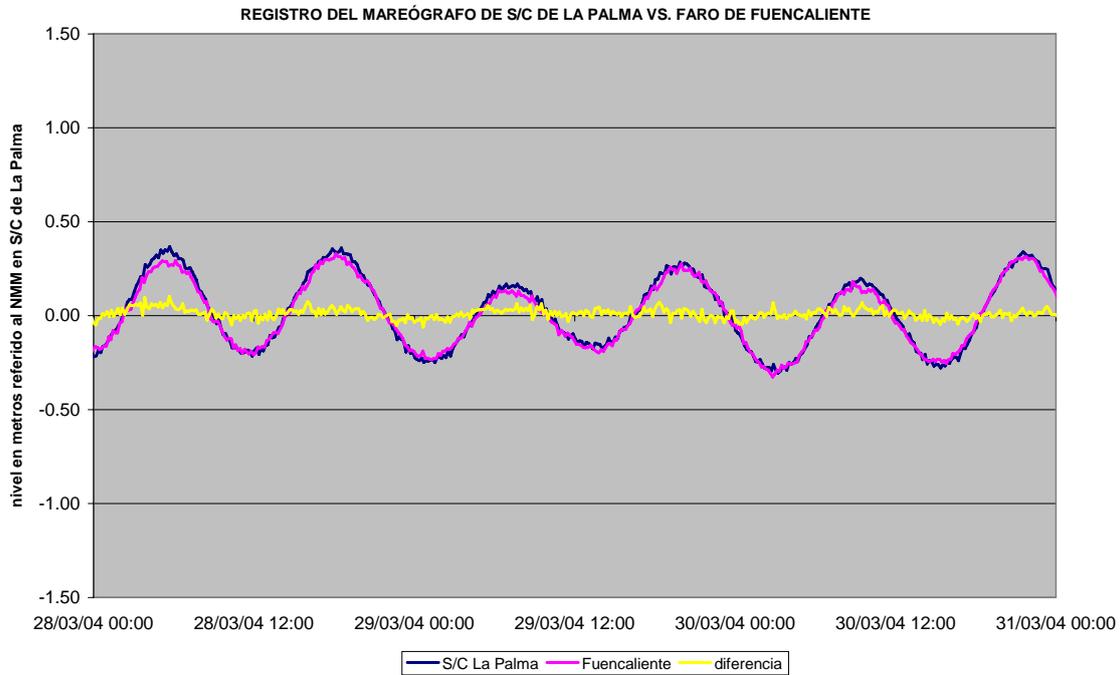


Figura 24.- S/C de La Palma vs. Faro de Fuencaliente en mareas muertas

6.5. Santa Cruz de La Palma vs. El Remo

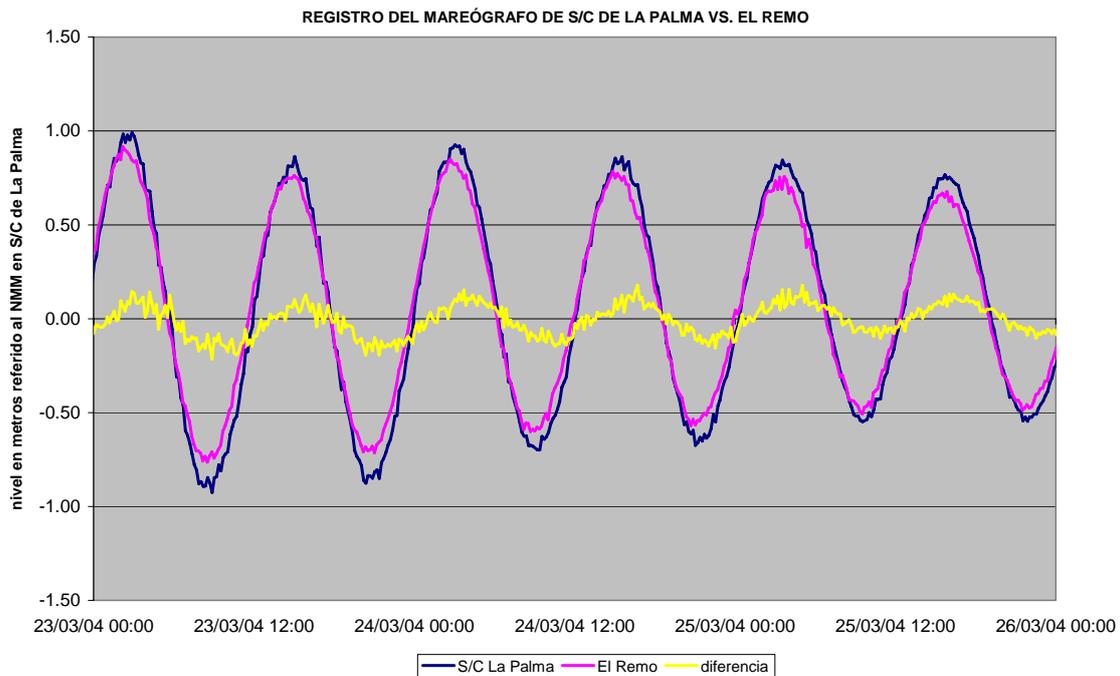


Figura 25.- S/C de La Palma vs. El Remo en mareas vivas

Al igual que ocurre en la comparativa S/C de La Palma vs. Puerto de Tazacorte, se observa una diferencia en la amplitud de la onda de marea que se repite con una pauta rítmica.

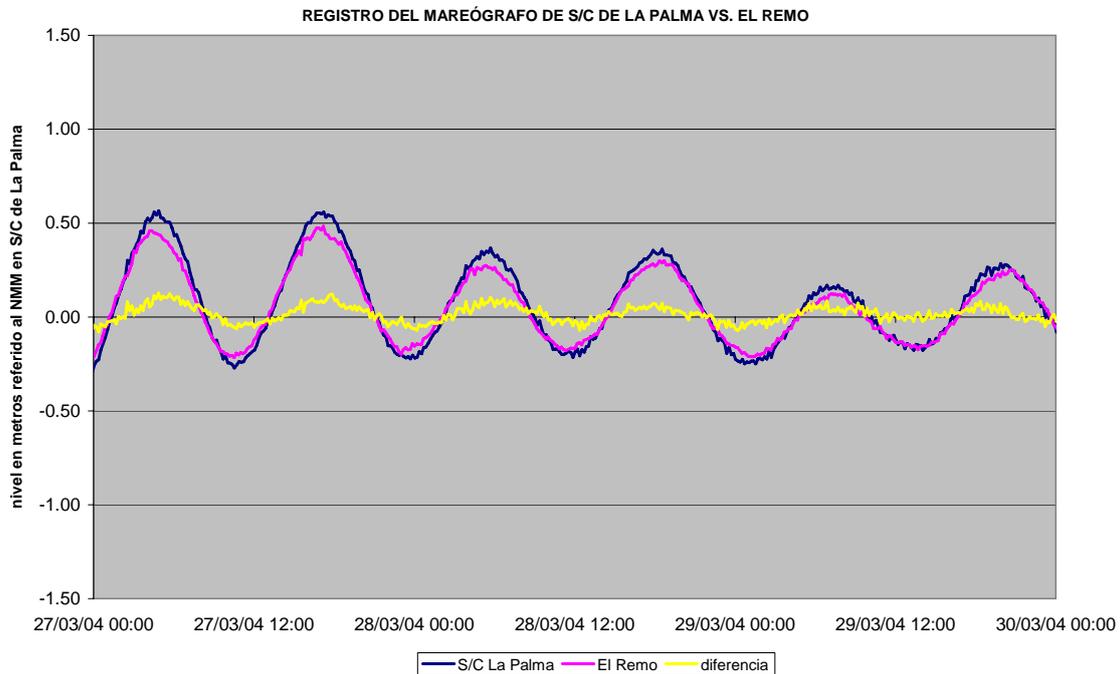


Figura 26.- S/C de La Palma vs. El Remo en mareas muertas

6.6. Puerto de Tazacorte vs. El Remo

Para comprobar el buen acople esperado entre el Puerto de Tazacorte y El Remo, se ha realizado la misma comparativa que en los apartados anteriores.

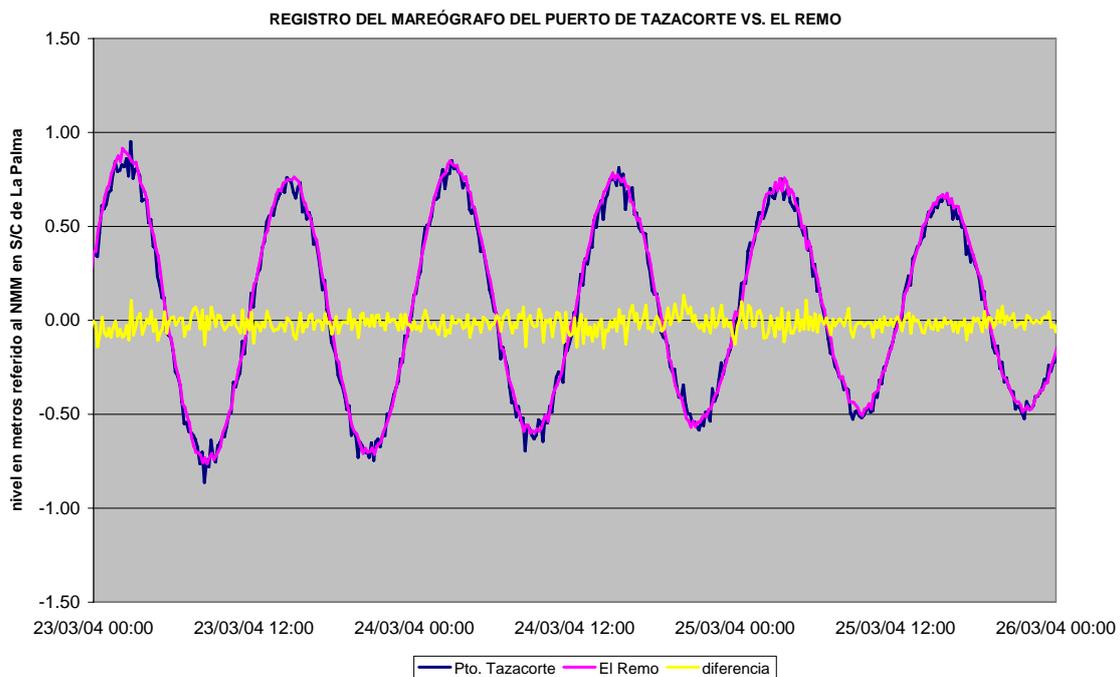


Figura 27.- Puerto de Tazacorte vs. El Remo en mareas vivas

El registro de marea del Puerto de Tazacorte y El Remo es significativamente análogo, tanto durante las mareas vivas como durante las muertas.

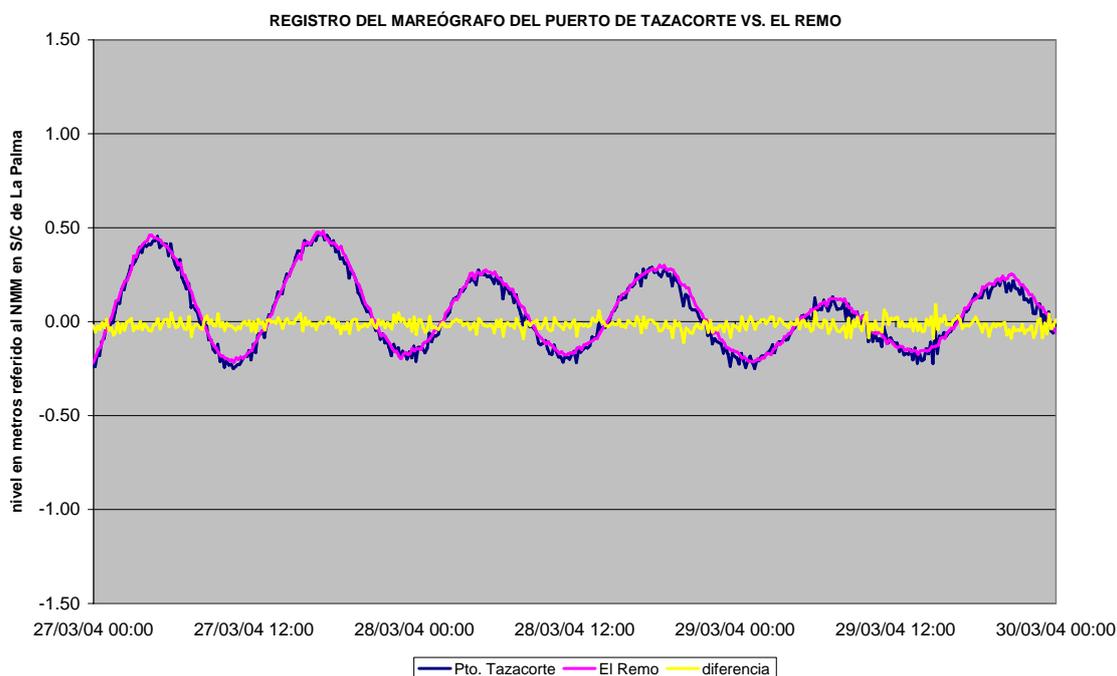


Figura 28.- Puerto de Tazacorte vs. El Remo en mareas muertas

6.7. Gráficas comparativas

En las páginas 44 a 51 se representan gráficamente, a modo de ejemplo, los registros de los mareógrafos para un periodo de nueve días.

Se aprecia la existencia de ligeras diferencias en amplitud entre la costa este y la costa oeste de La Palma, tal y como se explica en el Apartado 4.8.

Los registros de Puerto Espíndola y Barlovento presentan mucho ruido, debido a la acción del viento y el oleaje, ya que se encuentran en una zona directamente expuesta a los Alisios. Así, debido a la baja calidad del registro de Barlovento y su cercanía geográfica con Puerto Espíndola, no se ha incluido esta estación en la comparativa.

6.8. Repuntes armónicos de Santa Cruz de La Palma vs. Puerto de Tazacorte

Utilizando los armónicos extraídos de los registros de Santa Cruz de La Palma y el Puerto de Tazacorte (Tabla 3 y Tabla 4), se reprodujeron los repuntes de marea astronómica para el periodo de recogida de datos del presente estudio (septiembre 2003 a septiembre 2004).

Los resultados obtenidos tras la comparación del registro obtenido con el mareógrafo Valeport 740 y los cálculos hechos a partir de los armónicos se muestran en la Tabla 10.

	Fecha UTC	nivel en m (ref. NMM)
BMVE registro S/C La Palma	25/11/2003 08:08	-1.19m
BMVE armónica S/C La Palma		
BMVE armónica Pto. Tazacorte		

Tabla 10.- Comparativa de BMVE registrada y calculada en S/C La Palma

De lo cual se puede deducir que el día en que se registro la BMVE del periodo septiembre 2003 a septiembre 2004 los fenómenos meteorológicos (muy posiblemente el viento) produjeron un desplazamiento del nivel de la lámina de agua con respecto a la marea astronómica, tal y como se puede apreciar en la Figura 29.

Marea registrada vs. marea armónica en S/C de La Palma

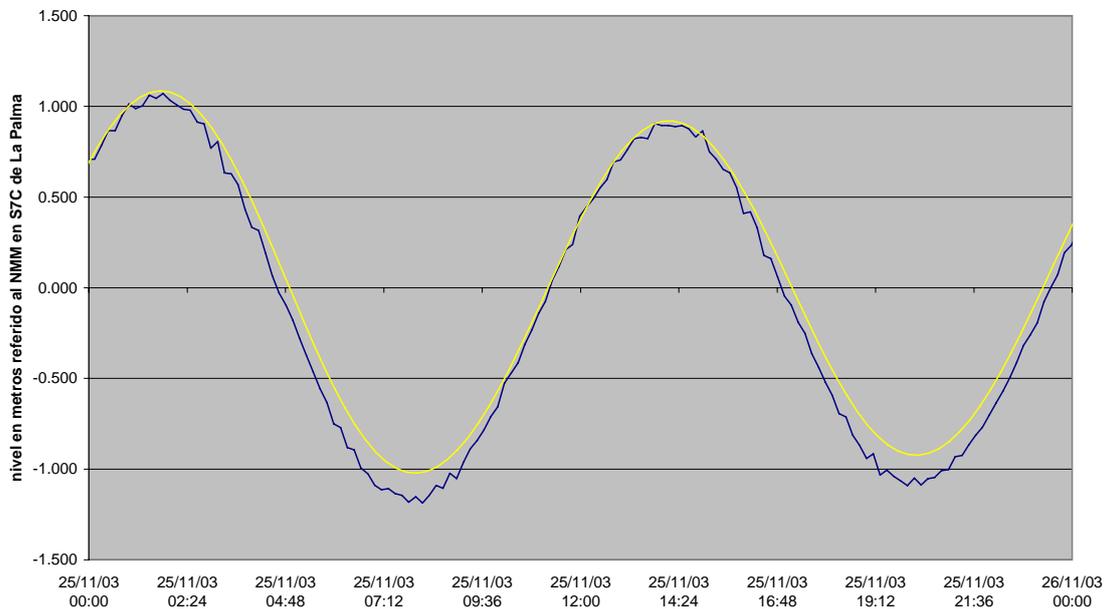


Figura 29.- Marea registrada (az.) vs. marea astronómica (am.) el día 25/11/2003

Al comparar la tablas de marea, generadas a partir de los armónicos, para S/C de La Palma y el Puerto de Tazacorte, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Las pleamares y bajamares en el Puerto de Tazacorte tienen un retardo de 9 minutos ± 7 minutos con respecto a los repuntes de marea equivalentes en S/C de La Palma.
- Las pleamares y bajamares en el Puerto de Tazacorte son 4 cm ± 3 cm más bajas y más altas respectivamente que los repuntes de marea equivalentes en S/C de La Palma.

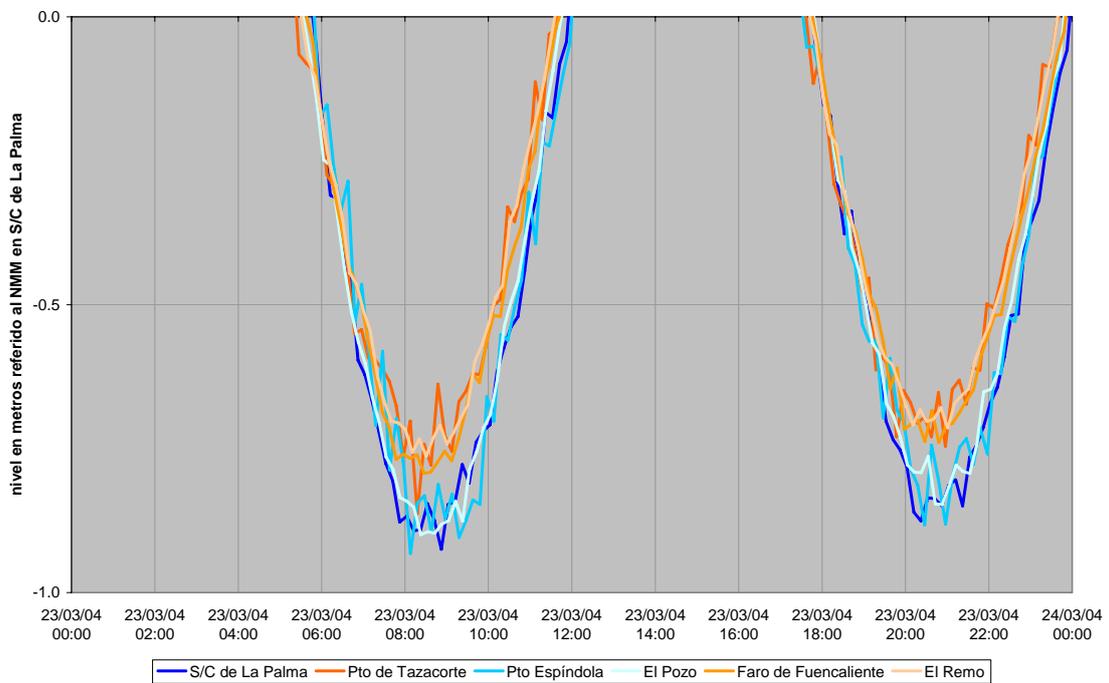
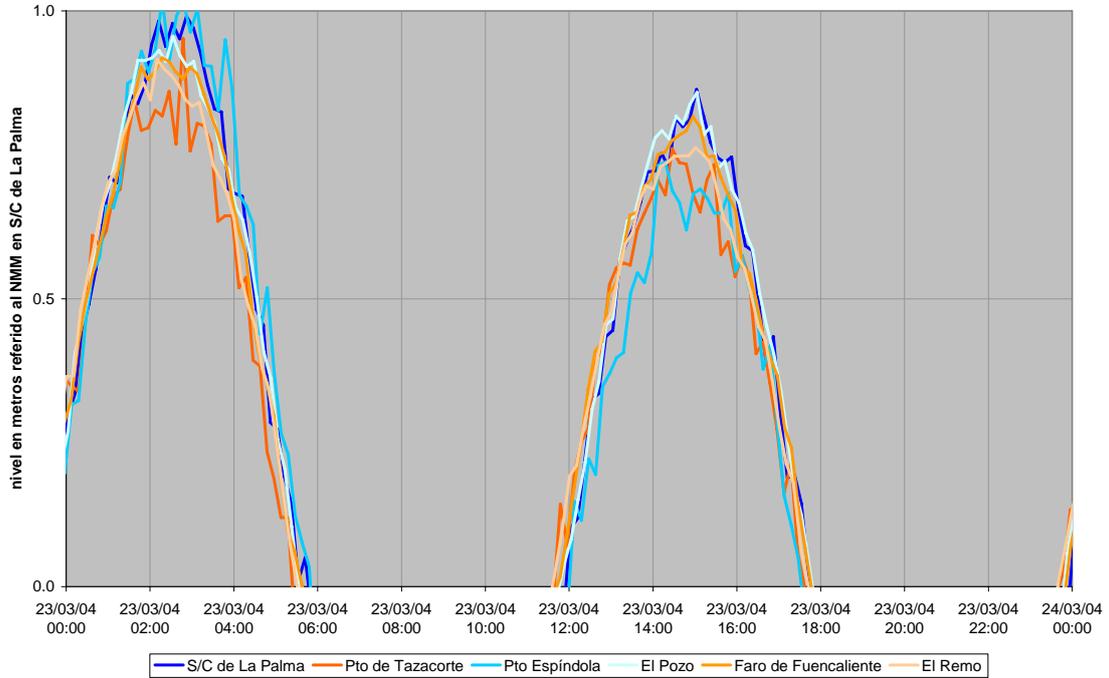
Se obtuvieron las siguientes estadísticas

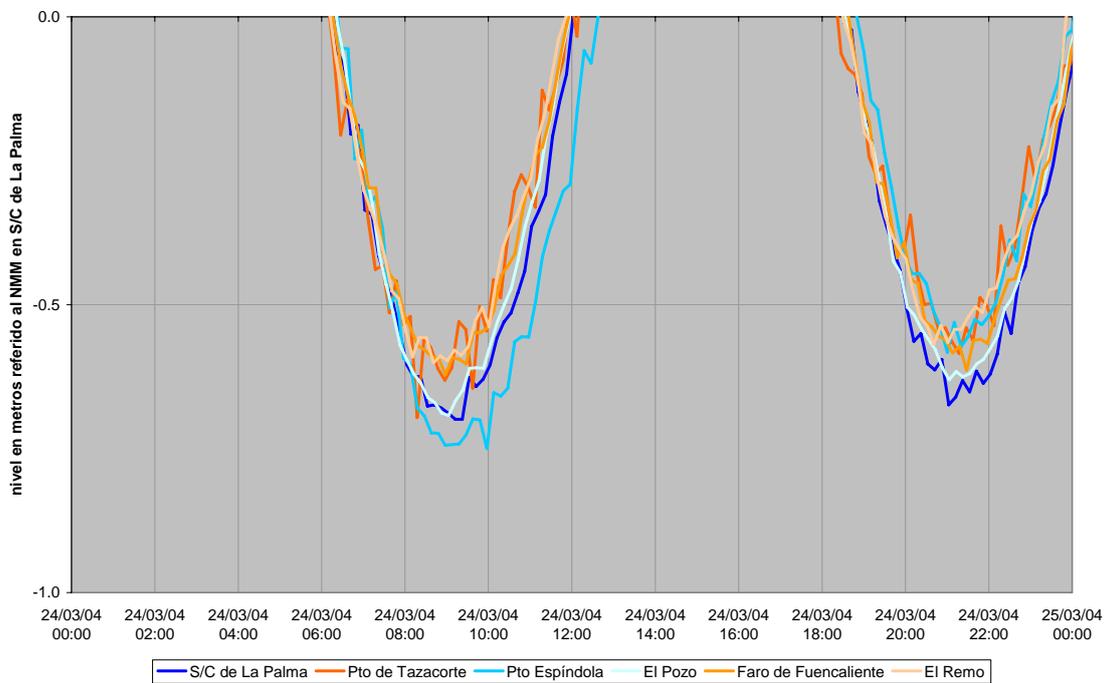
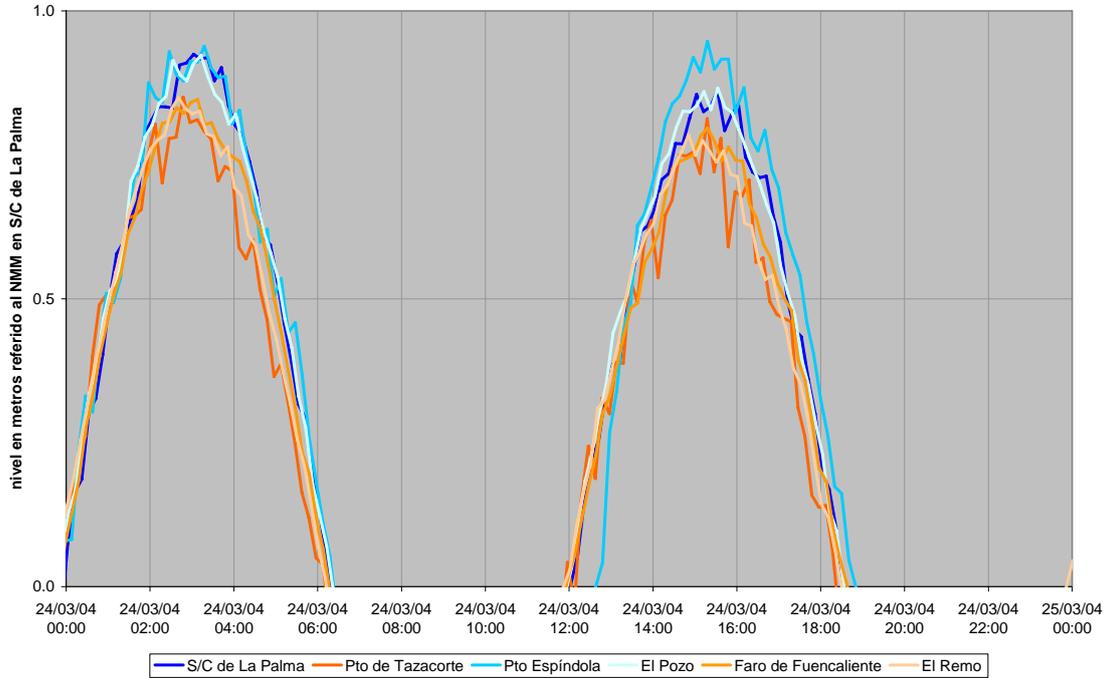
Diferencia en minutos entre el repunte de S/C de La Palma y Pto. de Tzacorte						
t<1min	t<2min	t<3min	t<4min	t<5min	t<10min	t<15min
2,19%	7,63%	11,51%	17,16%	24,44%	52,54%	75,71%

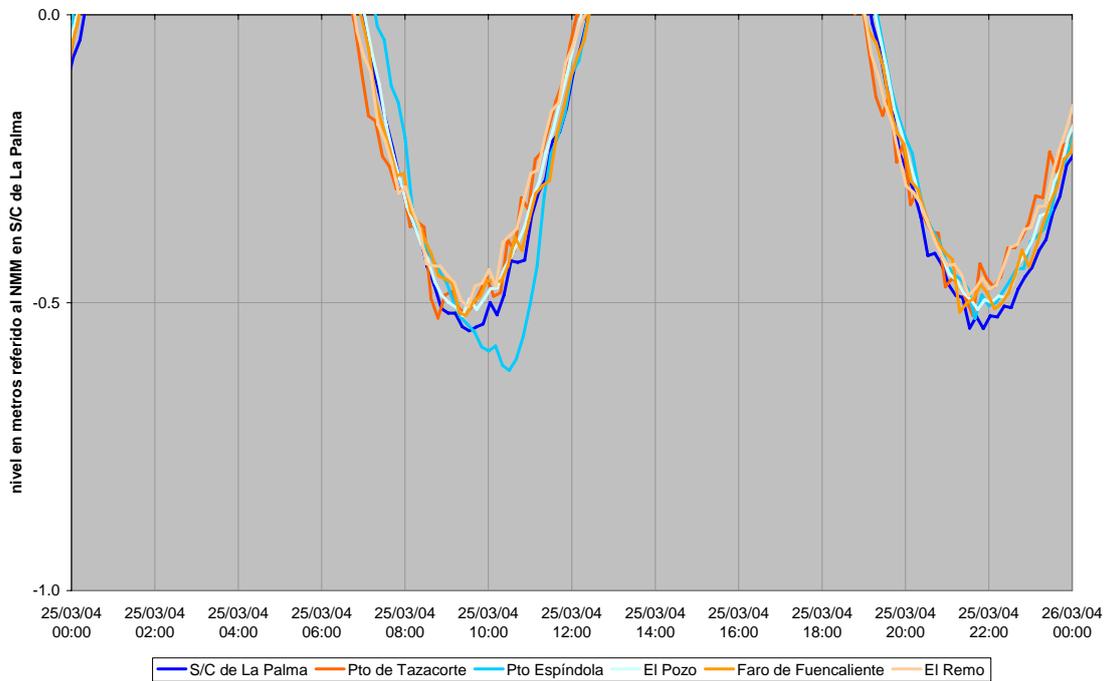
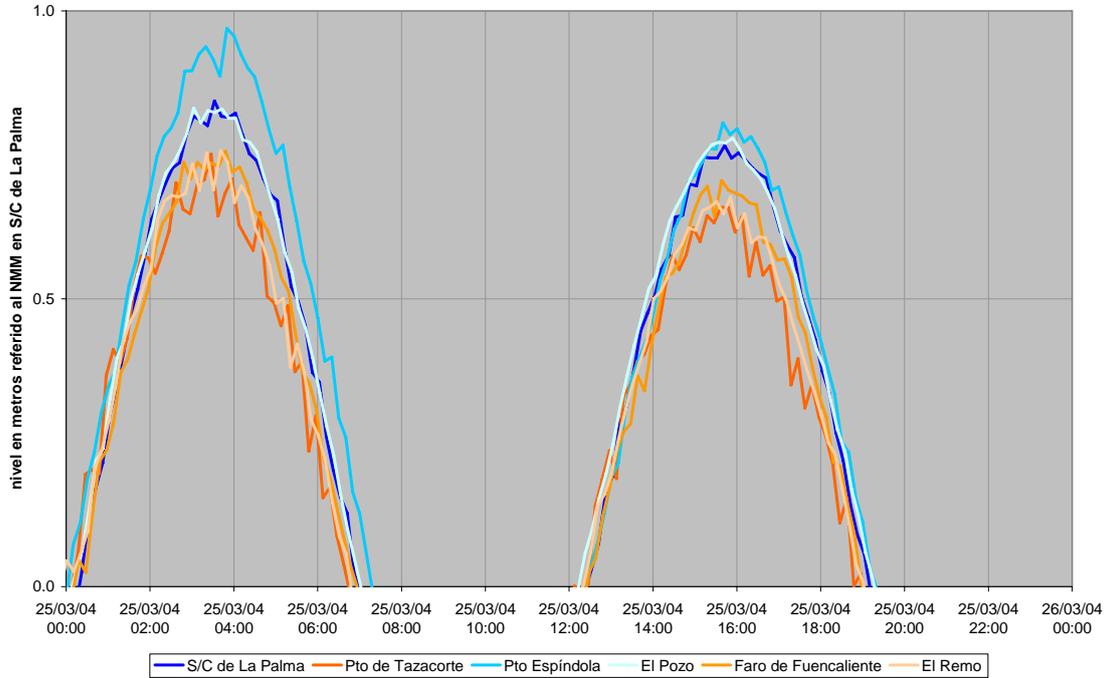
6.9. Conclusiones

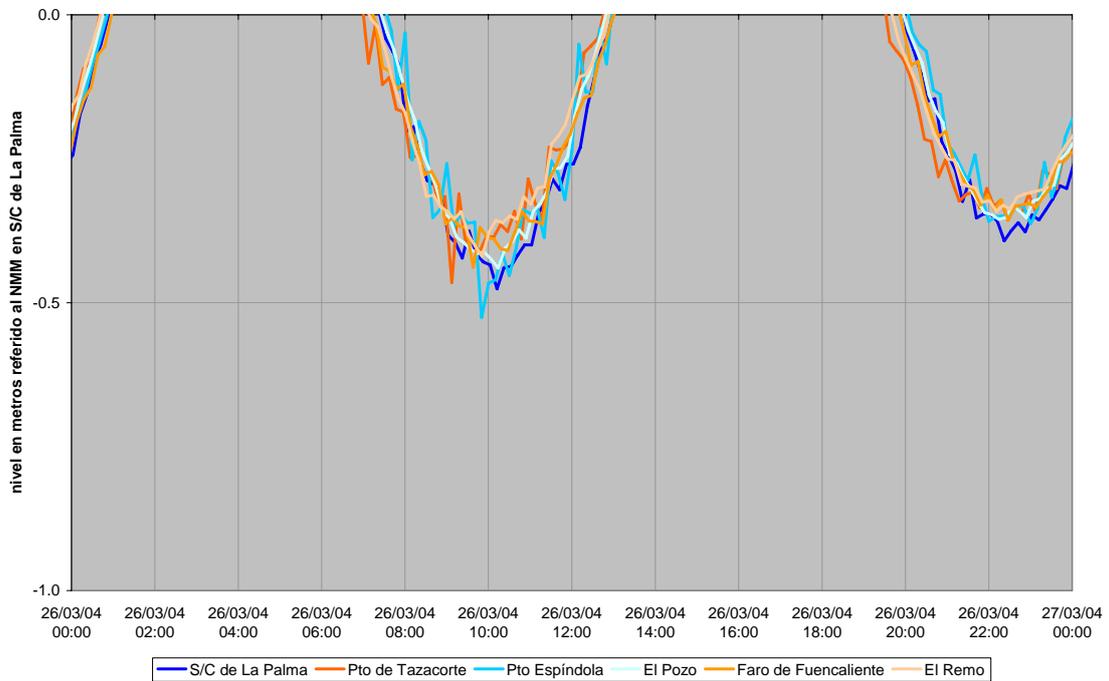
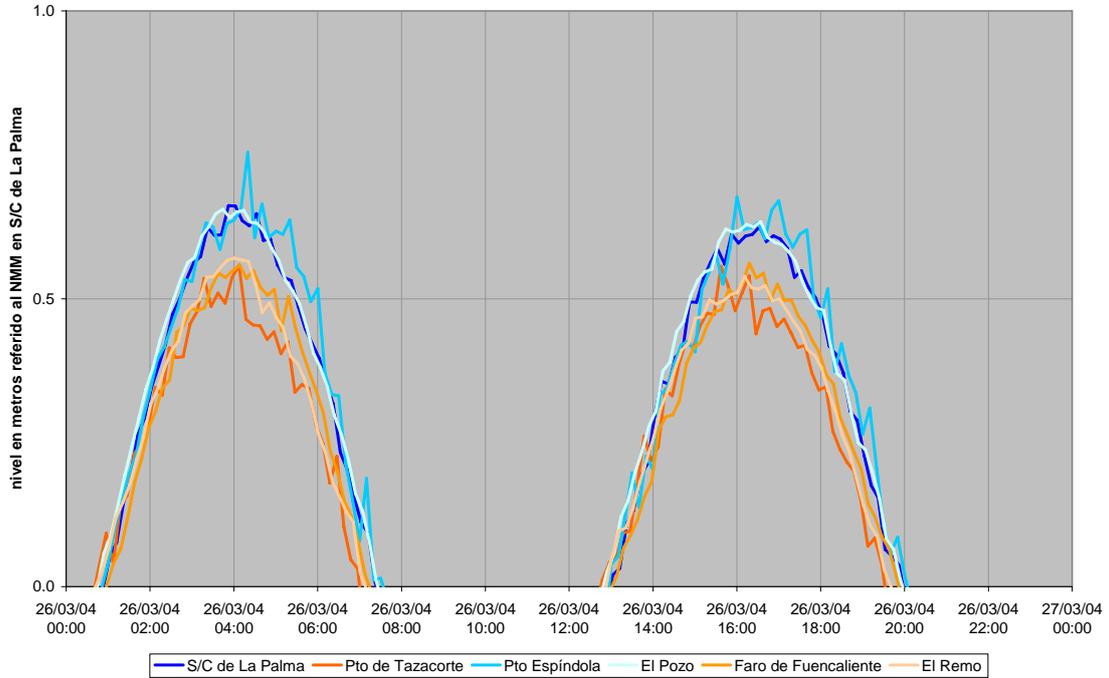
Existen diferencias en las características de la onda de marea entre el lado este y el lado oeste de La Palma, como ya había sido apuntado en el Apartado 4.

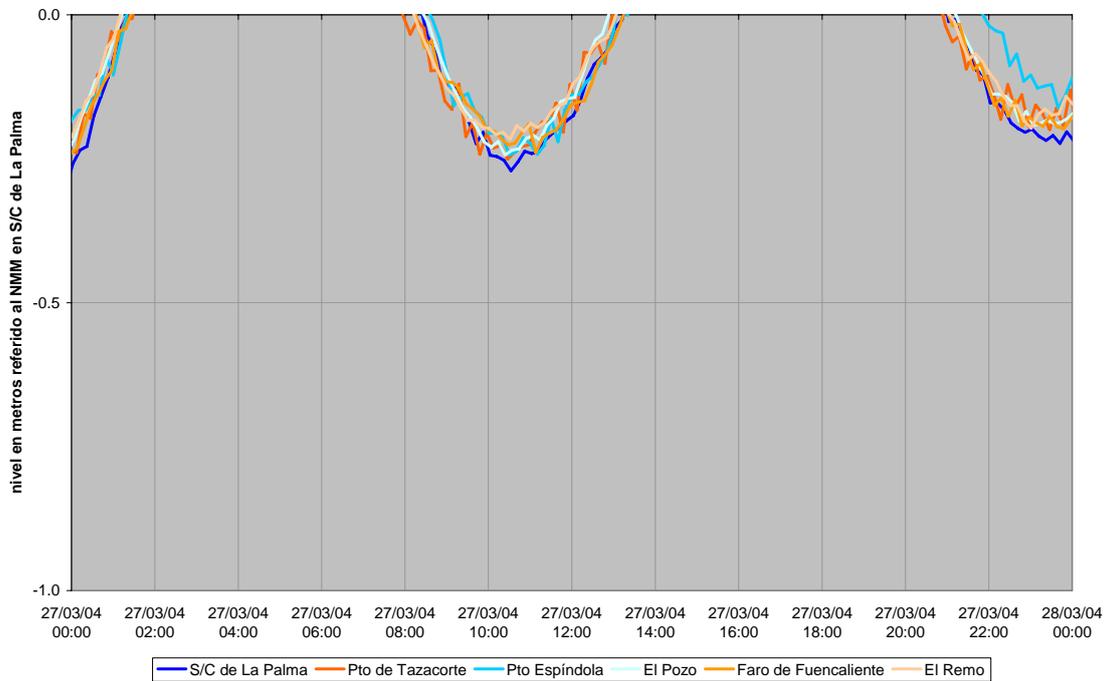
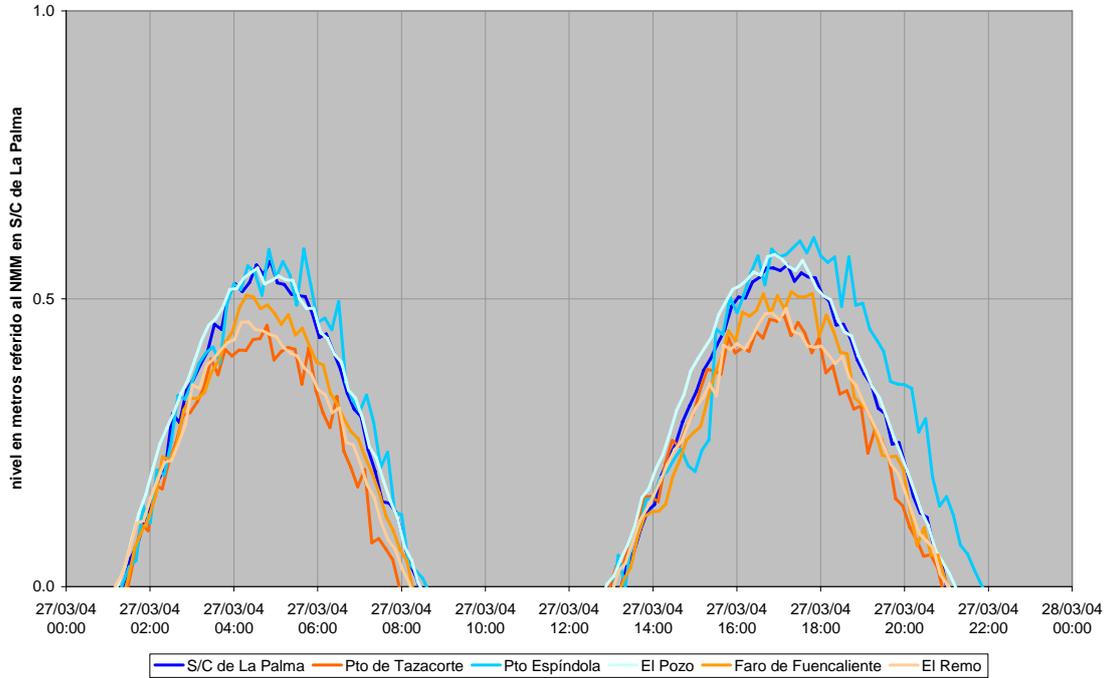
Si bien la marea presenta en todos los registros una fase muy similar, la amplitud o rango mareal registrados en los mareógrafos de poniente (Tzacorte y El Remo) es ligeramente inferior (entre 10cm y 40cm) que las registradas en los mareógrafos de levante (S/C de La Palma y El Pozo).

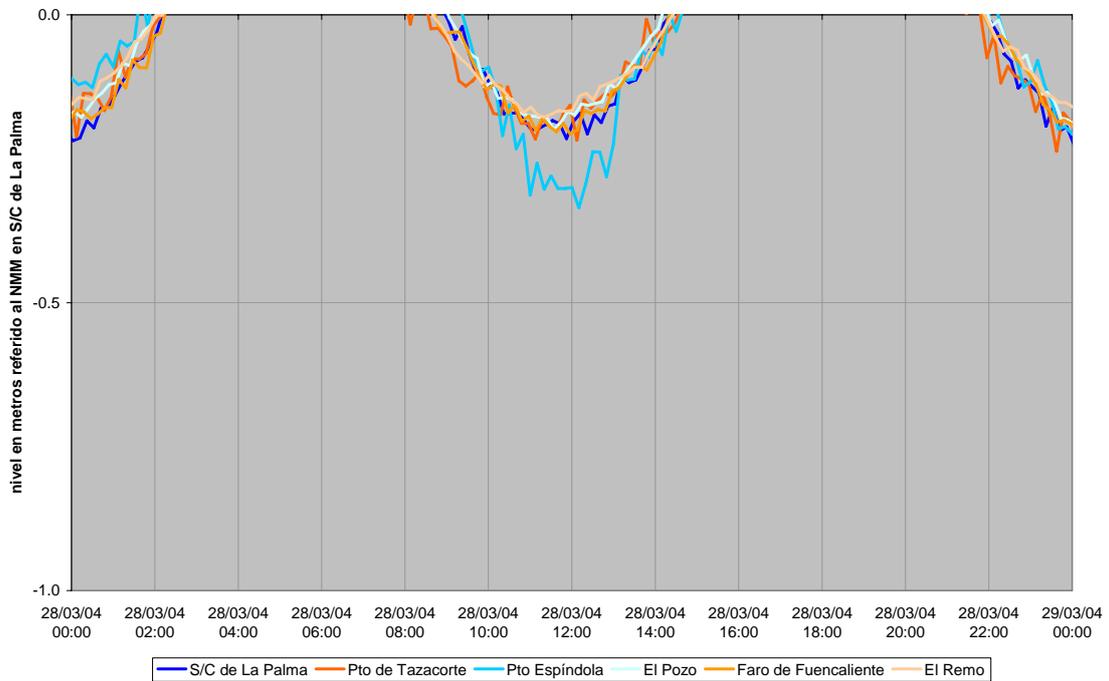
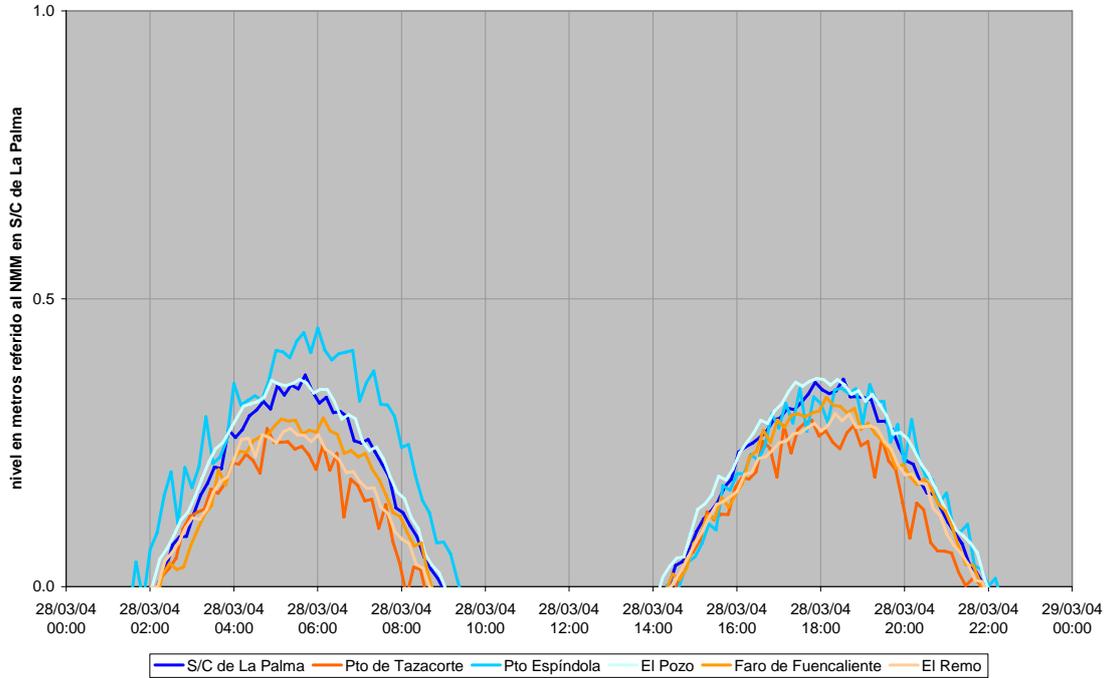


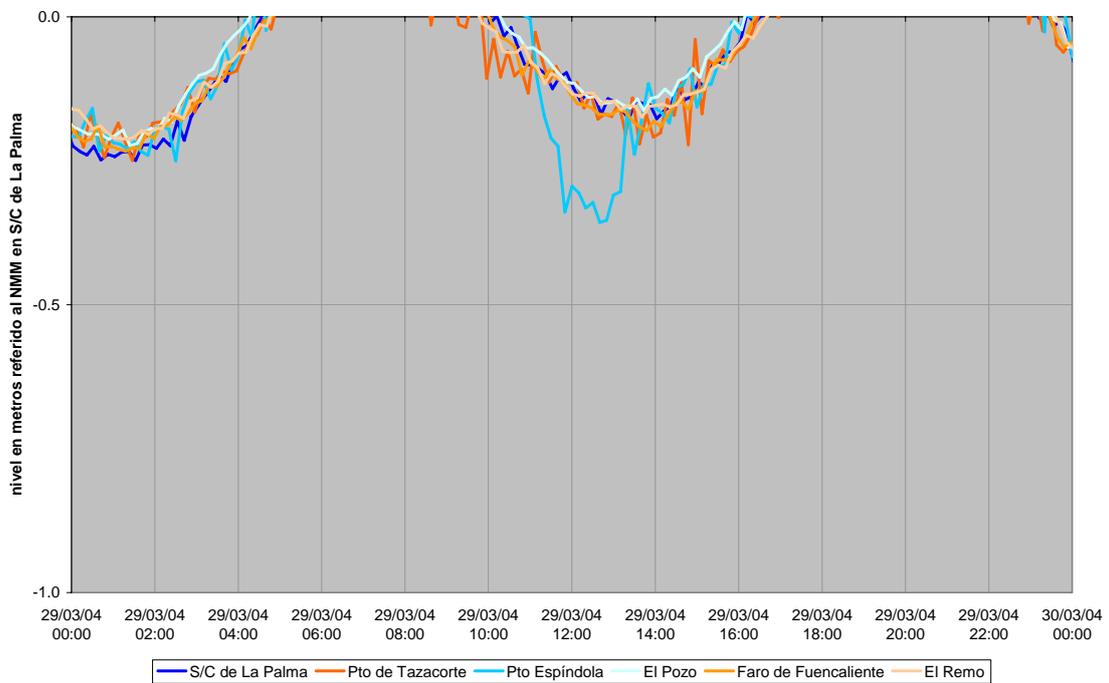
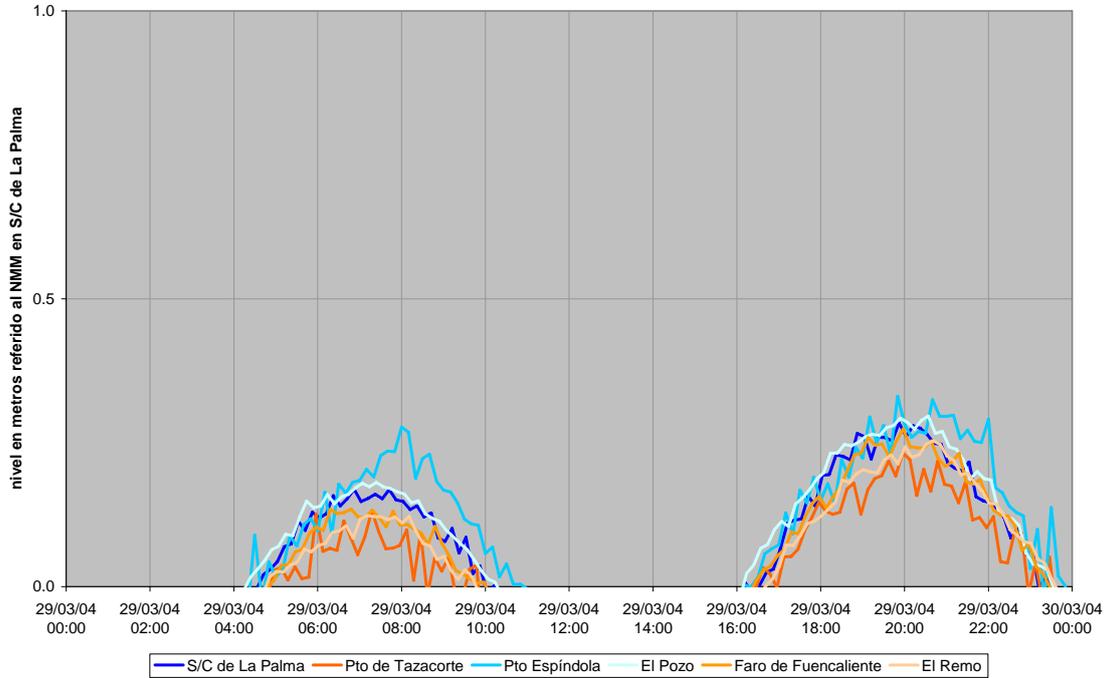


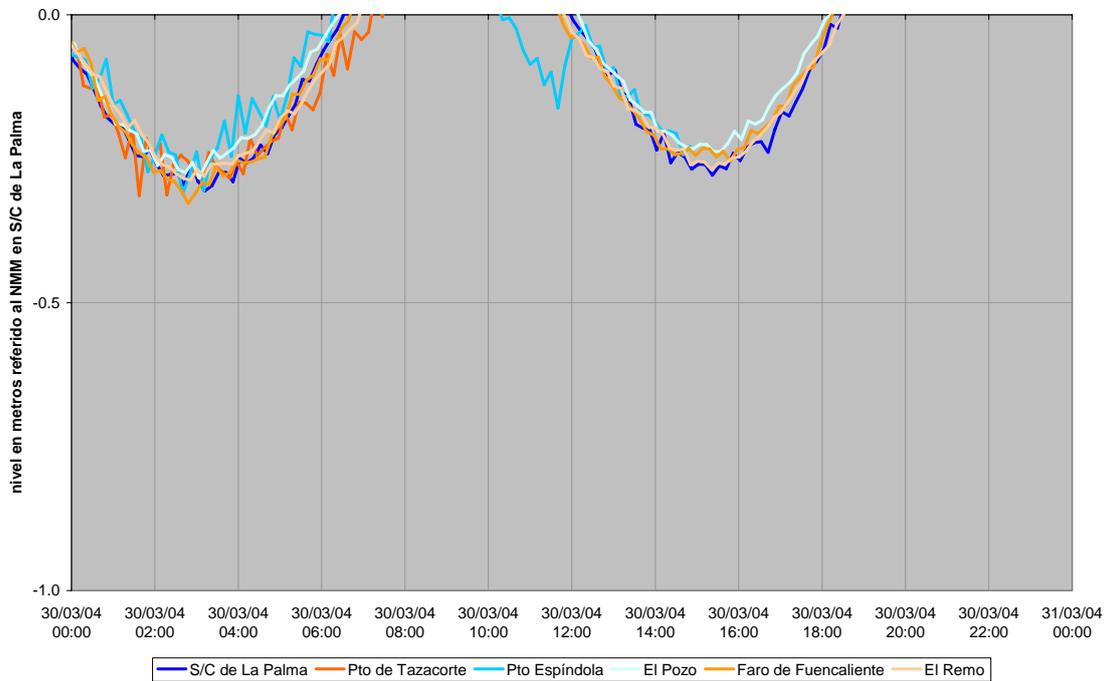
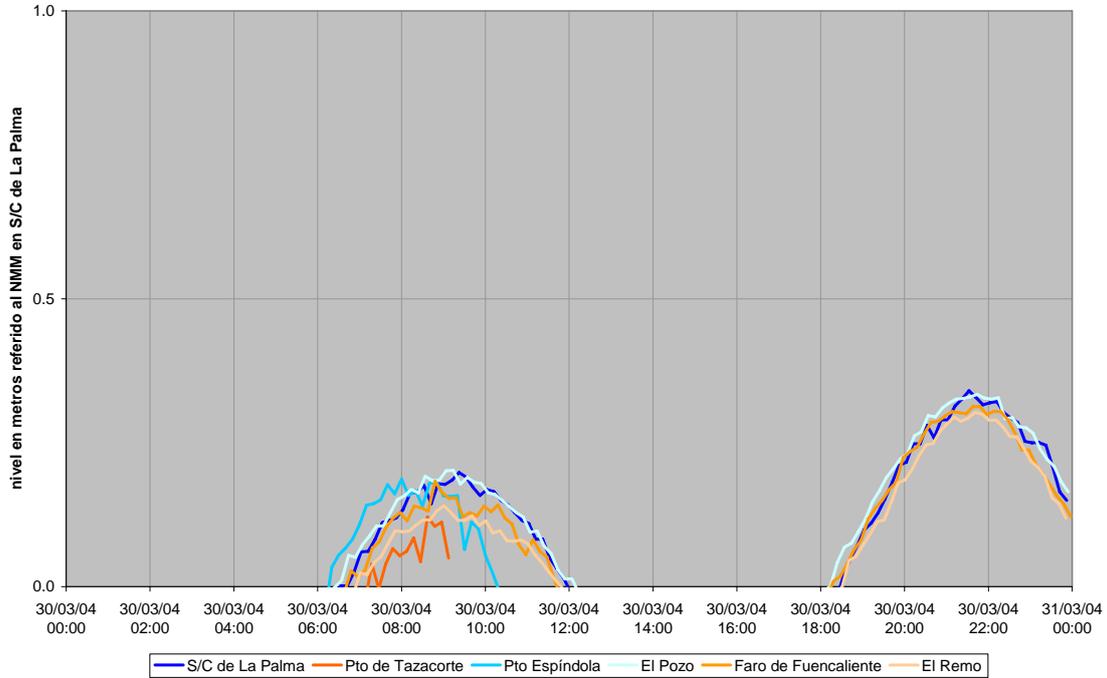












7. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO

En este apartado se resumen brevemente las principales conclusiones y resultados obtenidos en presente estudio de mareas y cero hidrográfico.

7.1. Conclusiones sobre el nivel de referencia

Dado que durante el periodo de registro del mareógrafo de Santa Cruz de La Palma (01/09/03 - 06/09/04) la máxima bajamar (-1,19 m bajo el NMM en S/C de La Palma) no superó el cero del mareógrafo (-1,41 m bajo el NMM en S/C de La Palma) y no se dispone de BMVE oficial establecida por el IHM, se optó, en consenso con la Dirección de la Asistencia Técnica del presente estudio, por tomar el cero del mareógrafo de Santa Cruz de la Palma como origen válido de los trabajos cartográficos.

Así pues, el nivel de referencia para los trabajos de batimetría y topografía se encuentra a -1,41 m bajo el nivel medio del mar registrado en el año 1997 en S/C de La Palma, tomándose así el cero del mareógrafo como origen de todas las cotas topobatimétricas del Estudio Ecocartográfico del Litoral de la Isla de La Palma.

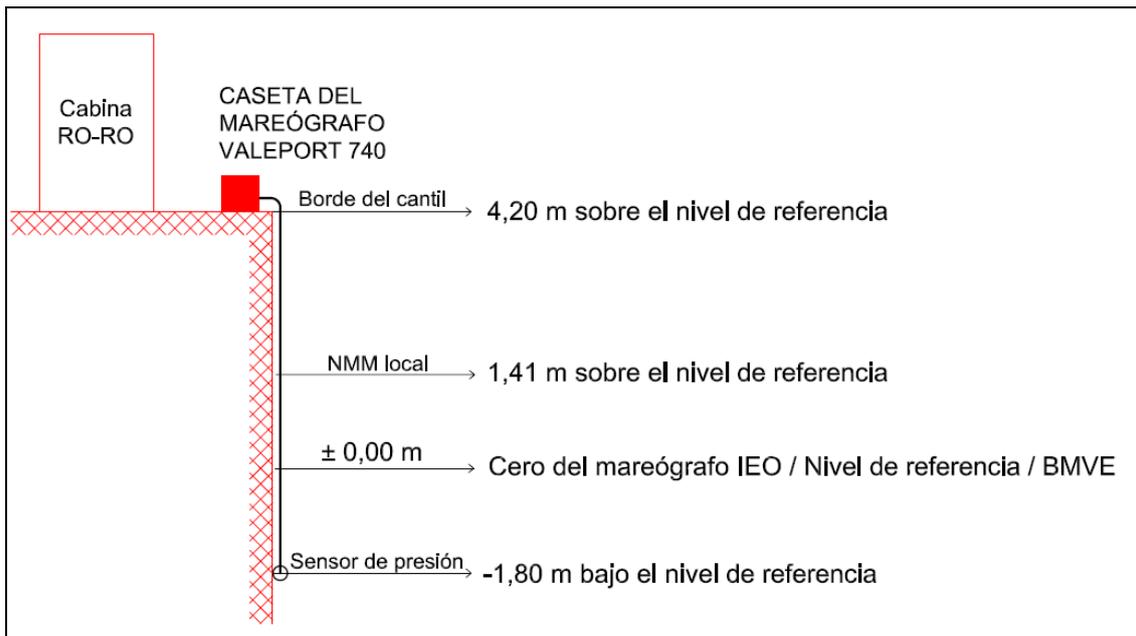


Figura 30.- Esquema de cotas para el Valeport 740 reducido al nivel de referencia del estudio

7.2. Conclusiones sobre la onda de marea

La onda de marea registrada por el mareógrafo es típicamente semidiurna, con dos pleamares y dos bajamares diarias, y de carácter mesomareal, con unas amplitudes de marea que oscilan entre los 50 cm aprox. durante las mareas muertas y los 200 cm aprox. durante las mareas vivas (ver Apartado 2.4).

No se han observado desfases temporales de la onda de marea a su paso por La Palma. La marea se produce de forma simultánea en todo el litoral estudiado, con una precisión de ± 5 minutos (debido a la frecuencia de observación) en la escala temporal y ± 5 centímetros en la vertical (debido al ruido producido por el oleaje).

Sí se han observado diferencias en el rango, o amplitud, de marea entre la costa este y oeste; registrándose mareas más amplias en Santa Cruz de La Palma que en el Puerto de Tazacorte.

S/C de La Palma			Puerto de Tazacorte		
Armónico	Amplitud(m)	Fase(°)	Armónico	Amplitud(m)	Fase(°)
M2	0.6586	29.26	M2	0.5653	25.51
S2	0.2595	52.09	S2	0.2245	45.33
K1	0.0582	41.65	K1	0.0597	40.62
O1	0.0451	-68.75	O1	0.0475	-64.61
F4	0.0102	42.59	F4	0.0116	83.98
F6	0.0028	-107.19	F6	0.0036	-74.2

Las Rozas, a 01 de agosto de 2005

EL AUTOR DEL ESTUDIO
Fdo.: Alejandro Palmeiro Beck
Licenciado en CC. del Mar