

Universidad Complutense - Facultad de Ciencias
Matemáticas - Madrid

SEMINARIO DE ASTRONOMIA Y GEODESIA
(Coordinado con el Consejo Superior de Investigaciones Científicas,
Departamento de Mecánica y Astronomía)

Publicación núm. 101

MAREAS TERRESTRES

por

R. VIEIRA



PUBLICADO EN «VRANIA» NÚM. 289-290

M A D R I D
1 9 7 8

MAREAS TERRESTRES

por R. VIEIRA

INTRODUCCIÓN

La celebración en 1957 del Año Geofísico Internacional es, sin duda, el punto de arranque de un vigoroso periodo de progreso en todas las Ciencias relacionadas con la física de la Tierra. Dicho progreso ha continuado hasta nuestros días a través de diversos programas de investigación que, encadenadamente, han venido organizando las Uniones Internacionales de Geodesia y Geofísica y de Geología; programas que han culminado en el Proyecto Geodinámico Internacional en el que nos encontramos y cuyo fin, y posible puesta en marcha del proyecto sucesor, está previsto para el final de la presente década.

Las mareas, tanto de las partes líquidas como sólidas y gaseosas, no son más que las manifestaciones de los efectos que sobre un cuerpo determinado origina la acción de las fuerzas que derivan de un campo potencial. En el caso que nos ocupa, la Tierra como cuerpo sobre el que actúan las fuerzas derivadas, en una primera aproximación y supuestas despreciables las acciones de los otros cuerpos celestes, del potencial lunisolar.

Consideremos un punto sobre la superficie de la Tierra y veamos cuáles son las fuerzas que actúan sobre él. Como fuerzas principales tenemos la centrífuga de rotación y la de atracción que el resto de la masa ejerce sobre dicho punto. La resultante es un vector cuyo módulo nos mide la intensidad de la aceleración de la gravedad y cuya dirección y sentido nos definen la vertical local. A estas fuerzas prin-

cipales hay que añadir un pequeño término, consecuencia de la variación espacio-temporal del campo generado por la presencia y movimientos de los cuerpos celestes próximos. El efecto diferencial entre las fuerzas que derivan de dicho campo, aplicadas en el centro de masas del planeta y en el punto de su superficie que estamos considerando es el origen de las mareas, cuyas manifestaciones más importantes van desde los grandes desplazamientos de masa, que observamos en las mareas oceánicas, hasta las variaciones tanto en módulo como en dirección y sentido del vector gravedad, a las deformaciones cúbicas y como consecuencia de todo esto, a variaciones del potencial terrestre, modificaciones en la velocidad de rotación de la Tierra y en la posición de su eje principal de inercia, etc.

Las mareas oceánicas, sobre las que volveremos posteriormente, dada su relación, no sólo en las causas sino también en las consecuencias, con las de la Tierra sólida, han ocupado desde siempre, por su espectacularidad e indudable interés humano, un lugar de privilegiada dedicación en las Ciencias de todos los tiempos y de todas las civilizaciones. Aun así, es tan enorme la complejidad del fenómeno y de su análisis, que en un reciente trabajo el conocido oceanógrafo soviético K. T. Bogdanov, del Instituto Oceanográfico P.P. Thirchova de Moscú, comenta: « Se puede, desgraciadamente, comprobar que hasta estos últimos años no existía ningún trabajo puramente teórico cuyos resultados correspondiesen, ni en lo más mínimo, con los resultados reales de la propagación de las ondas de mareas en los océanos. Esto se debe a la gran complejidad del fenómeno de mareas y de la solución del sistema completo de ecuaciones diferenciales del movimiento».

No es nuevo el tema de las mareas terrestres dentro del marco de las Ciencias de la Tierra. Su tratamiento teórico es básico desde hace muchos años en los tratados especializados, tanto en Geodesia como en Geofísica. No obstante, el fuerte impulso del Año Geofísico Internacional es, como en tantas otras materias, el punto de arranque de una etapa que se destaca por un cambio total de mentalidad en el enfoque del problema, pasándose a la situación actual en que nos encontramos, plena de posibilidades en función de los objetivos depurados y enriquecidos como consecuencia de la gran dedicación teórica y experimental de estos últimos veinte años. La creación de la Comisión Permanente de Mareas Terrestres, por la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica y la Asociación Internacional de Geodesia, así como la puesta en marcha del Centro Internacional de Mareas Terrestres, establecido en el Observatorio Real de Bélgica y bajo la dirección del Prof. P. Melchior, actual Secretario General de la U.I.G.G. y gran propulsor de estas investigaciones, son sin duda dos pilares básicos en el espectacular desarrollo de esta disciplina a nivel internacional.

España, totalmente de espalda a estas investigaciones hasta 1973, se incorpora a su estudio cuando el Prof. Torroja, viendo el interés de las mismas y las posibilidades que en ese momento existían en su Departamento de comenzar con una nueva línea de trabajo, decide poner en marcha un grupo de investigación dedicado a mareas terrestres. La oportunidad de esta decisión es incuestionable, ya que teniendo la posibilidad de aprovechar la experiencia adquirida por otros grupos en estos últimos años, ha permitido que nos incorporásemos, en el comienzo de esta nueva etapa, en condiciones muy favorables.

Volviendo a los orígenes de las primeras evidencias de los fenómenos que se manifiestan por causa de las mareas de la Tierra sólida, nos encontramos, sorprendentemente, con que al comienzo de la Era Cristiana, Plinio el Viejo, en su «Historia Naturalis», nos describe cómo en el sur de España, en Cádiz y Sevilla, ha observado pozos y manantiales que varían de nivel o fluyen de forma periódica. Ejemplos de manifestaciones de dilataciones cúbicas similares a las que se presentan en ciertos volcanes de tipo «hawaiano» en los que los depósitos de lava se comprimen por las contracciones de la corteza, subiendo el nivel de los mismos, para a continuación, al dilatarse y disminuir la presión, bajar de nuevo.

Aún con evidencias tan antiguas, la investigación e incluso el conocimiento del fenómeno se ha retrasado durante muchos siglos. Dando un gran salto en el tiempo, nos trasladamos al 1863, en que Lord Kelvin publica su teoría de deformación de la Tierra bajo la acción de las fuerzas derivadas del potencial lunisolar, llegando incluso a proponer un método para realizar una estimación de la rigidez del planeta en su conjunto, a partir de los resultados de la disminución en amplitud de las mareas oceánicas, por variaciones volumétricas en las cuencas como consecuencia de las deformaciones de mareas en las mismas.

Los nombres de Kelvin, Darwin, que unos años más tarde realizó el experimento propuesto por Kelvin, obteniendo un valor del módulo de rigidez muy próximo al del acero, Doodson, Love, etc., estrechamente unidos a estas investigaciones, jalonan las diferentes etapas del progreso en las mismas. Por su importancia, y por su relación con nuestro país, citamos a Von Rebeur Paschwitz, quien en 1890, realiza las primeras medidas de interés científico de desviaciones de la vertical, utilizando péndulos horizontales con suspensión Zollner, en Potsdam, Estrasburgo y Tenerife.

En 1924 y con motivo de la Asamblea General de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica, que se celebra en Madrid, el Prof. Walter D. Lambert presenta el primer informe que sobre mareas terrestres se eleva a dicha Asamblea, y que ha tenido continuidad en todas las Asambleas celebradas hasta nuestros días.

Paralelamente a esta secuencia de nombres y hechos trascendentes en el desarrollo del conocimiento del fenómeno de mareas, se va perfeccionando la instrumentación hasta los límites mínimos necesarios para el comienzo de la etapa observacional. Podemos, sin embargo, afirmar, que es únicamente en los últimos años, con la incorporación al mundo de la medida de una electrónica avanzada, cuando la instrumentación está alcanzando los niveles adecuados de precisión.

LAS MAREAS TERRESTRES Y LA GEODINÁMICA

Entendemos la Geodinámica, como aquella disciplina que se dedica al estudio de la dinámica del planeta en su más amplio sentido. Deberá ocuparse por lo tanto de todo tipo de movimientos de masa, pasados y presentes, de sus orígenes y de sus causas, tanto endógenas como exógenas, y de su evolución en el tiempo. Es por tanto la Geodinámica una ciencia multidisciplinaria, en la que concurren la Geología, la Geofísica, la Geodesia, la Oceanografía y la Astronomía entre otras Ciencias, aportando cada una de ellas un elevado nivel de conocimientos y esperando a su vez de ella, la resolución de problemas que total o parcialmente superan los límites naturales de cada una de estas disciplinas.

Las mareas en todas sus posibles manifestaciones, se encuentran plenamente encuadradas dentro de la Geodinámica, y no sólo por los continuos y periódicos movimientos de masas a que dan lugar, sino por las posibilidades reales, que hoy en día existen, de obtener, a partir de la información que nos suministran las investigaciones de mareas, conocimientos importantes sobre las propiedades físicas del interior de la Tierra. No olvidemos que las mareas, oscilaciones forzadas en periodos que van desde horas a días, no sólo vienen a llenar el vacío existente en la auscultación de la Tierra entre las observaciones sísmicas, con periodos entre las décimas de segundo a las decenas de minutos, y las observaciones astronómicas y geodésicas, cuyos intervalos de variación oscilan desde los meses, para los periodos de movimiento del polo o de rotación de la Tierra, hasta millones de años para los grandes ajustes isostáticos, sino que prácticamente son el único fenómeno geofísico del que repitiéndose continuamente nos es permitido conocer la intensidad de la fuerza perturbadora con más de ocho decimales exactos, según resulta de aplicar las leyes de la Mecánica Celeste.

ESTADO ACTUAL Y OBJETIVOS DE LAS INVESTIGACIONES EN MAREAS TERRESTRES

Cuando la Luna o el Sol cruzan el meridiano de un determinado lugar, una serie de efectos son perceptibles. La aceleración de la gravedad disminuye, se desvía la vertical local y la Tierra se deforma. Supongamos que nuestro planeta fuese un cuerpo rígido; en este caso se mantendrían los dos primeros efectos, mientras que no se produciría deformación. Aplicando las leyes de la Mecánica Celeste a un cuerpo tal, nos encontramos con que los valores máximos para la variación de la aceleración de la gravedad son del orden de 250 microgales, y que las desviaciones máximas de la vertical local, por este efecto, llegan a los 50 milisegundos. Sobre la Tierra real y por tanto deformable, estos valores no se conservan. De la observación, y del cálculo sobre modelos de Tierra cercanos a la realidad, deducimos que las variaciones de la aceleración de la gravedad son mayores aproximadamente en un 15 o 16 % sobre los anteriormente calculados, que las desviaciones de la vertical local no llegan al 70 % de las teóricas y que dos puntos situados sobre la superficie terrestre y separados por 20 metros, se acercan o se alejan del orden de una micra. Estas tres manifestaciones, todas ellas, a pesar de su pequeñez, medibles, constituyen, básicamente, el campo observacional de las mareas terrestres. Los muy diferentes problemas, tanto técnicos como científicos, que llevan consigo la medida de estas tres magnitudes, aceleración de la gravedad, inclinaciones y distancias, han dado lugar a un mayor desarrollo, hoy en día, de las mareas gravimétricas sobre las de inclinación y extensométricas, ocupando estas últimas, pese a su enorme importancia futura, un lugar todavía dentro de la etapa que podríamos llamar de primeras experiencias.

Una estación completa de mareas terrestres debería contar en principio con la siguiente instrumentación:

1. Gravímetro con salida para registro analógico de variaciones de la gravedad. Su precisión en régimen de estación debe ser del orden de décimas de microgal.
2. Clinómetros para las medidas de las desviaciones de la vertical. Deben instalarse un mínimo de dos para registrar las desviaciones según dos direcciones preferentes, normalmente y siempre que las condiciones del local no lo impidan, la norte-sur y la este-oeste. Las precisiones máximas de los clinómetros en uso, ya sean péndulos horizontales o verticales, no sobrepasa la décima de milisegundo.
3. Extensómetros según las tres direcciones de un triedro de referencia local. Como advertíamos anteriormente, las dificultades téc-

nicas en los extensómetros son mayores que en los otros instrumentos básicos, por lo que hoy en día no disponemos de este tipo de instrumento más que en algunas estaciones experimentales.

Como complemento de esta instrumentación fundamental, las estaciones de mareas deberán disponer de los sistemas complementarios de tiempo, alimentación, calibración, registro, control de parámetros climáticos..., etc.

El registro de mareas (fig. 1) similar en cuanto a su forma para todos sus componentes, presenta la apariencia de una gráfica correspondiente a la representación de una función senoidal cuyo periodo es próximo, en nuestras latitudes y debido al fuerte carácter semidiurno en las mismas, a las doce horas, y cuya amplitud varía con el tiempo.

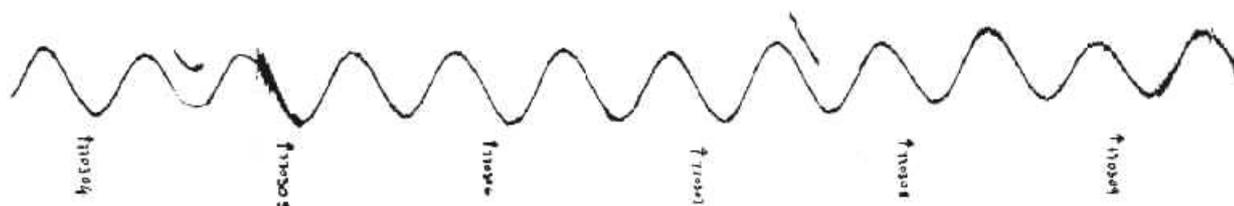


FIG. 1.

La separación, mediante el desarrollo de Laplace, del potencial en familias de armónicos esféricos, nos permite una visión muy clara del fenómeno de mareas. Dicho desarrollo limitado al segundo orden, nos permite expresar el potencial perturbador por la siguiente expresión:

$$W_2 = \frac{3}{4} G M \frac{r^2}{d^3} \left\{ \cos^2 \varphi \cos^2 \delta \cos 2H + \sin 2\varphi \sin 2\delta \cos H + \right. \\ \left. + 3 \left(\sin^2 \varphi - \frac{1}{3} \right) \left(\sin^2 \delta - \frac{1}{3} \right) \right\};$$

en donde φ es la latitud del punto A en el que el potencial W está ejerciendo su influencia, δ y H la declinación y el ángulo horario del astro perturbador y G, M, r y d, la constante gravitacional, la masa del astro perturbador, el radio vector del punto A y la distancia geocéntrica del astro, respectivamente.

En este desarrollo de segundo orden, se expresa el potencial por la suma de tres familias de armónicos esféricos. La primera, cuya parte variable está dada por $\cos^2 \varphi \cos^2 \delta \cos 2H$, es la llamada función sectorial y va a dar lugar a las marcas de primer orden. Sus líneas nodales, son los meridianos situados a 45° a ambos lados del astro perturbador, por lo que dividen a la superficie en cuatro regiones en las que la función alternativamente toma valores positivos y negativos, dando lugar a mareas altas o bajas. El periodo, al variar con $\cos 2H$,

es semidiurno. La amplitud será máxima en el Ecuador, cuando la declinación del astro sea nula, mientras que en los polos siempre será cero. Las fuerzas que derivan de este primer sumando dan lugar a movimientos de masas con simetría respecto al eje de rotación de la Tierra, por lo que no originan variaciones en la posición del polo de inercia ni afectan a la velocidad de rotación. Sin embargo, la fuerte disipación energética que tiene lugar en el sistema, a causa de estas mareas, sí da lugar a variaciones seculares en la velocidad rotacional.

El segundo sumando tiene como parte variable, $\text{sen } 2\varphi \text{ sen } 2\delta \text{ cos } H$; sus líneas nodales son el ecuador y el meridiano que en cada momento se encuentra a 90° del que ocupa el astro. Es la llamada función tesimal y divide a la Tierra en cuatro cuadrantes en los que la marea cambia de signo al pasar la Luna o el Sol de declinación norte a sur y viceversa. El período del tipo de mareas a que da lugar este potencial es diurno, alcanzando la amplitud un valor máximo para una latitud de $\pm 45^\circ$ cuando la declinación del astro sea máxima, y anulándose en los polos y en el ecuador. Los desplazamientos de masa a que da lugar este tipo de mareas produce oscilaciones del eje principal de inercia, no afectando al momento principal.

Por último, el término en $3(\text{sen}^2 \varphi - \frac{1}{3}) \cdot (\text{sen}^2 \delta - \frac{1}{3})$, es la función zonal, ya que sus líneas nodales, los paralelos de $\pm 35^\circ 16'$, dividen a la tierra en tres zonas. Estas mareas llamadas por Laplace de tercer orden, son las correspondientes a los largos periodos, aproximadamente 14 días para la Luna y seis meses para el Sol, y dan lugar a variaciones en el momento principal de inercia y, por tanto en la velocidad de rotación de la Tierra.

El desarrollo del potencial de Laplace, es como hemos visto, del mayor interés para comprender fácilmente el fenómeno de mareas y su relación con la Astronomía Fundamental; sin embargo desde el punto de vista del análisis es necesario partir de un desarrollo puramente armónico en el que podamos separar cada una de las ondas que intervienen. El desarrollo de Doodson, basado en las teorías de Brown y de Newcomb para la Luna y el Sol respectivamente, es el que sirve de soporte para los desarrollos que hoy en día utilizamos. Su interés principal está en que todos los argumentos se expresan en función de seis variables independientes, elegidas de forma que todas ellas crezcan linealmente con el tiempo.

No vamos a entrar aquí en una descripción pormenorizada de todos y cada uno de los diferentes grupos de ondas que por unos métodos u otros de análisis, mínimos cuadrados, Fourier, etc., pueden separarse en el conjunto de toda la información condensada en una serie más o menos larga de registros de mareas. Es importante saber que el fin del análisis es precisamente la separación de esos grupos en sus di-

versas frecuencias y que lógicamente el resultado matemático final no es más que la consecuencia de la calidad y cantidad de los datos iniciales. Toda la información útil que nos proporcionan los registros de mareas es función de la precisión con que podamos determinar los valores de la amplitud y la fase de cada una de las ondas o grupos de ondas que podamos separar en el análisis, si bien es cierto que el residual que obtengamos, una vez extraída de los registros la información en las frecuencias que nos interesa, es fuente de información y trabajo para investigación de otros efectos, que fuera del espectro de mareas, están siendo simultáneamente registrados, como pueden ser, entre otros, los efectos climáticos estacionales o los movimientos recientes registrados y analizables a partir de las derivas.

Hecha esta síntesis teórica del estudio de las mareas, pasemos a ver cuáles son los objetivos que, en la actualidad, son la razón de ser de estas investigaciones.

El objetivo, yo diría histórico, que sirvió de base en el comienzo de estas investigaciones, es la determinación experimental de los llamados números de Love. En 1911, Love, teniendo en cuenta que el potencial de mareas podía ser representado con suficiente precisión por una función esférica armónica de segundo orden, llegó a la conclusión de que todas las deformaciones que las fuerzas derivadas de dicho potencial podían producir deberían poder representarse, con suficiente aproximación, por la misma función armónica afectada de un coeficiente apropiado dependiente del fenómeno en consideración. De esta forma definió tres coeficientes, $H(r)$, $F(r)$ y $K(r)$ a los que hizo depender de la distancia del punto considerado al centro, y que en la superficie y para $r = a$, radio medio de la Tierra, se denominan h , f y k . A estos tres números, Shida añadió un cuarto, $L(r)$, l en la superficie, quedando completas todas las posibilidades de expresión de deformaciones en función del propio potencial perturbador. Las expresiones de las deformaciones según un sistema de referencia local, las dilataciones cúbicas y el potencial adicional generado por la propia deformación, son:

$$S_r = H(r) \cdot \frac{W}{g}$$

$$S_\varphi = \frac{L(r)}{g} \cdot \frac{\partial W}{\partial \lambda}$$

$$S_\lambda = \frac{L(r)}{g \cdot \sin \varphi} \cdot \frac{\partial W}{\partial \lambda}$$

$$\Delta = F(r) \cdot \frac{W}{g \cdot r}$$

$$V(r) = K(r) \cdot W$$

Por otro lado es fácil demostrar la relación existente entre los números de Love en la superficie y los parámetros que podemos obtener en el análisis de mareas. Como decíamos anteriormente, a partir de dicho análisis obteníamos las amplitudes y las fases de los diversos grupos de ondas. En la práctica el resultado se suele dar normalizado con respecto a las amplitudes y fases obtenidas, teóricamente, sobre un modelo de Tierra rígida. De forma que definimos, para cada onda o grupo, un llamado factor de amplitud, relación entre la amplitud observada y la calculada, y un desfase, que es la diferencia entre las fases respectivas. Denominamos δ al factor de amplitud de las mareas gravimétricas, γ al de inclinación y Δ al de mareas volumétricas.

Las relaciones entre los números de Love y los factores de amplitud vienen dadas por las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}\delta &= 1 + h - \frac{3}{2}k \\ \gamma &= 1 + k - h \\ \Delta &= 1 + k - 1\end{aligned}$$

Es pues inmediata la obtención de los números h , k y l , una vez obtenidos experimentalmente δ , γ y Δ . En la práctica, la determinación de los factores de amplitud está condicionada, en cuanto a su precisión, por diversos efectos que, por unas causas u otras, vienen integrados dentro de los registros de mareas e incluso en las mismas frecuencias de los principales componentes. La necesidad de investigar estos efectos, en principio perturbadores, ha abierto a las investigaciones de mareas nuevos objetivos y es una de las causas del desarrollo de estos trabajos en los últimos años. Es en esos residuales en donde se encuentra la mejor información tanto geofísica como geodinámica en general y también, y muy particularmente oceanográfica. Veamos, en resumen, cuáles son esos objetivos.

a) *En física del interior de la Tierra:*

— Determinación experimental de los números de Love, h , k , y l , que a la vez que están relacionados con los parámetros de mareas, como vimos anteriormente, dependen de aquéllos otros que definen las propiedades físicas del interior de la Tierra.

— Confirmación de modelos terrestres basados en otras experiencias, principalmente sísmica, o de modelos teóricos.

— Estudio de las oscilaciones libres de largo período que se registran después de los grandes sismos, y que pueden aportar una información de gran interés para el conocimiento global del interior del planeta. Los gravímetros constituyen un sistema ideal, convenientemente preparados, para poder registrar estas oscilaciones como un dato complementario a la información básica de mareas.

— Investigación sobre movimientos recientes a partir de la deriva, una vez eliminada la de carácter instrumental si la hubiese, que presentan los registros tanto gravimétricos como clinométricos y extensométricos. Estas investigaciones tienen un especial interés humano, ya que de la vigilancia de zonas de riesgo, como son aquéllas de actividad sísmica o volcánica, se podrá obtener información que permita disminuir los daños humanos y materiales que ocasionan los grandes cataclismos. De hecho, hoy en día, se están empleando estos sistemas con carácter experimental en todos aquellos lugares en donde se ha emprendido una investigación sobre premonición de catástrofes naturales, como es en Italia la red de alarma vulcanológica o en Estados Unidos las estaciones de estudio de la Falla de San Andrés.

b) *En Gravimetría:*

— Para realizar la corrección de mareas a las medidas gravimétricas no era necesaria hasta ahora mayor precisión que la que un adecuado modelo teórico podía suministrarnos. El desarrollo tecnológico ha permitido disponer de una instrumentación cuyo nivel de señal está muy por debajo de las correcciones teóricas de los modelos. Los perfiles microgravimétricos, que con diversas aplicaciones tanto geodésicas como de búsqueda de recursos se han comenzado a realizar, necesitan de unas correcciones de mareas que tengan una precisión del microgal, cosa imposible de obtener si no es de la medida directa del fenómeno. En las investigaciones que venimos desarrollando en España y a las que dedicaremos la última parte de este trabajo, hemos detectado variaciones del orden de decenas de microgales entre los modelos teóricos aceptados y los resultados experimentales.

c) *En Dinámica Espacial:*

— Las modernas técnicas de medidas de distancias entre las estaciones terrestres y los satélites artificiales o la Luna, por «doppler» o «laser», permiten precisiones del orden del centímetro, y en la exactitud de estas medidas se basan, entre otras múltiples investigaciones, los resultados de la Geodesia Espacial. Por efecto de las mareas, dos tipos de correcciones deberán realizarse. Por un lado una corrección de deformación radial de la Tierra, cuya amplitud es del orden de 30 a 40 cm, y por otro una corrección de posición del satélite con respecto al centro de masa de la Tierra, debida a la variación en altitud que experimenta el mismo por las variaciones del potencial terrestre como consecuencia de la propia marea; esta última corrección puede llegar a valores del orden de las decenas de metros sobre la posición del satélite. Modelos teóricos no nos dan suficiente aproximación para ninguna de las dos correcciones.

d) *En Astronomía:*

— La relación entre las mareas y las Astronomía es evidente, no sólo por el hecho de que las mismas estén producidas por la presencia del Sol y la Luna, sino porque están íntimamente relacionadas con todos los tradicionales problemas de la Astronomía fundamental. Al hacer antes un análisis del efecto de mareas a partir del desarrollo del potencial de Laplace, veíamos como los tres tipos diferentes de mareas a que daban lugar las tres funciones armónicas influían, cada una de una forma diferente, sobre los diversos fenómenos cuyo estudio constituye la base fundamental de la Astronomía clásica. Las variaciones rotacionales, los movimiento del polo, las modificaciones del eje de inercia, etc., tienen al menos parte de sus causas en las mareas tanto de las partes líquidas como de las sólidas y gaseosas del planeta. Se impone pues, y de hecho así está siendo aceptado, una revisión de las técnicas tradicionales que deben ser completadas con estas otras nuevas que, mirando hacia el interior de la Tierra, no se limitan a la evaluación de unas ciertas magnitudes, sino que pretenden conocer las causas de dichas variaciones y a ser posible su predicción.

Como problema de particular interés y que representa una inicial aportación de las investigaciones de mareas a la Astronomía, hay la comprobación experimental de un posible término de nutación de período muy próximo al día sidéreo, y que, según la teoría de Molodensky de una Tierra con núcleo líquido con grano sólido, debía de ponerse de manifiesto por un fenómeno de resonancia sobre las ondas de mareas de frecuencia próxima a la de dicho término. Estudios realizados sobre series de registros de gran calidad y larga duración, necesarios para separar los grupos de onda a investigar que son de muy pequeña amplitud, parecen indicar que efectivamente se pone de manifiesto dicha resonancia.

— Particularmente es de interés el conocimiento de los parámetros de mareas en las proximidades de los Observatorios Astronómicos dedicados a Astronomía Fundamental. Los errores en la determinación de coordenadas con los modernos astrolabios impersonales, tubos cenitales fotográficos, etc., son del orden de las correspondientes mareas de inclinación en aparatos que, ligados a la corteza, están sufriendo dichas desviaciones. El Observatorio Fundamental de Mizusawa, en Japón, así lo ha entendido y como consecuencia de ello se han instalado los correspondientes equipos de registro de mareas. Algo similar se ha comenzado a hacer en el Instituto y Observatorio de Marina en San Fernando, en colaboración con nuestro Departameto; lo que con independencia de esta aplicación, no deja de tener una visión de futuro clara, teniendo en cuenta la adaptación que estos observatorios

deberán realizar, para no quedarse desfasados, de las nuevas técnicas que ya aplican los modernos observatorios de Astronomía Fundamental y Geodinámica.

e) *En Oceanografía:*

— Hasta hace unos años se ha considerado como indeseable el efecto que, sobre las mareas terrestres, tenían las mareas oceánicas. Esto era lógico, si tenemos en cuenta que este efecto venía a perturbar de una forma difícilmente controlable, dada la imperfección con que se conoce la marea oceánica, los análisis de los registros de las mareas terrestres. Lo que en principio ha sido un problema y que para ciertas aplicaciones sigue siéndolo se ha convertido en un atractivo tema de investigación al que hoy en día estamos dedicados un buen número de geofísicos y oceanógrafos, habiéndose dado a esta interacción entre ambos tipos de mareas el nombre de «efecto indirecto».

Tres causas diferentes están integradas en la influencia de la marea oceánica sobre la terrestre; son:

1.º El efecto de atracción de masas. Por efecto de la marea oceánica se trasladan periódicamente grandes masas, que con dicho movimiento dan lugar a variaciones de las fuerzas de tipo «newtoniano» que existen entre los elementos de masas en movimiento y los puntos sólidos considerados. Como consecuencia se producirán cambios en la aceleración de la gravedad y también desviaciones de la vertical.

2.º Deformación de la Tierra por el propio peso de la marea oceánica. Es el efecto más importante, sobre todo a cierta distancia de la costa en donde el primer efecto, que es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a la perturbación, pierde importancia. El peso, por tanto, de la masa de agua en movimiento, da lugar a una deformación de la corteza, no sólo en la vertical del efecto, o sea en la propia cuenca, sino que, dependiendo de las características geológicas y de las propiedades elásticas de las distintas zonas de la Tierra, este efecto de peso se transmite a grandes distancia y profundidades. Experiencias realizadas en estaciones alejadas de las costas, como Alma Ata en Siberia o Alice Springs en Australia, han puesto de manifiesto la existencia de estos efectos, cuyas consecuencias se manifiestan, como en el efecto de atracción de masa, por variaciones de la aceleración de la gravedad y por desviaciones de la vertical local.

3.º Como consecuencia de los efectos anteriores y como una reacción a los mismos, se produce un tercer efecto, de magnitud mucho menor que los anteriores y que en cierto modo es de signo contrario a ambos. Esta tercera perturbación de origen oceánico, consiste en una redistribución o ajuste de masas que, como es lógico, también será función de las propiedades viscoelásticas del sistema.

En conjunto, la suma de estas tres perturbaciones dará lugar a variaciones de los parámetros, factor de amplitud y fase, de los grupos de ondas separados en el análisis de los registros de mareas terrestres, en sus diversas componentes.

De no existir o haber filtrado el conjunto de otras perturbaciones, el planteamiento básico del problema del estudio del efecto oceánico podríamos sintetizarlo en la resolución de la siguiente expresión:

$$A_o \cos (\omega_t + \varphi_o) = \left\{ \begin{matrix} \gamma \\ \delta \end{matrix} \right\} A_t \cos (\omega_t) + A_i \cos (\omega_t + \varphi_i)$$

en donde, A_o , A_t y A_i , son las amplitudes correspondientes a la observación, a la marea teórica sobre una Tierra rígida y a la propia perturbación oceánica. ω es la frecuencia de la onda en consideración. φ_o y φ_i , las fases observadas y la del efecto oceánico, siendo nula la fase sobre la Tierra teórica. δ y γ son los factores gravimétricos y de inclinación, que afectarán a A_t según consideremos las mareas de la componente vertical o de inclinación.

En la anterior expresión, el problema es la determinación de la amplitud y fase del efecto oceánico, A_i y φ_i ; las restantes magnitudes se pueden obtener a partir de la observación y de las leyes de la Mecánica Celeste.

Se nos presenta, pues, un doble planteamiento, o bien determinamos los valores de los efectos oceánicos a través del cálculo sobre las diversas cartas oceánicas que hoy en día existen y que todas tienen graves imprecisiones, corrigiendo con los resultados obtenidos los observacionales, o el planteamiento inverso, en el que a partir de la observación y del conocimiento geológico y geofísico del lugar de observación, podamos separar, como diferencia vectorial entre lo que resulta y lo que debiera resultar, el valor del efecto oceánico.

En el primer planteamiento, buscamos el obtener las correcciones oceánicas, que sustraídas de los resultados observacionales, nos permitan tener unos parámetros de mareas libres de cualquier perturbación y útiles para extraer de ellos toda la información geofísica que contienen y que, como sabemos, está íntimamente relacionada con las propiedades físicas del interior de la Tierra.

Dos graves problemas nos encontramos en este primer planteamiento; la inexactitud de las cartas de mareas oceánicas existentes y las dificultades matemáticas de resolución y de las condiciones fronterizas de las ecuaciones resultantes. En ambos problemas se ha realizado grandes progresos en los últimos años. Los datos oceánicos han mejorado con la incorporación de resultados de mareógrafos de profundidad, instalados en lugares en donde hasta hace poco tiempo resultaba imposible una evaluación de las mareas, así como con las determinaciones realizadas desde satélites. El problema matemático también ha entrado en vías de una mejor solución sobre todo a partir de

los trabajos de Farrell que resuelven los problemas de la solución de la función de peso de Green, para determinados modelos de Tierra, así como su convolución con los resultados oceánicos.

El planteamiento inverso, es decir, en el supuesto de que podamos conocer cuál debiera de ser, en ausencia de efecto oceánico, el resultado observacional, nos lleva a aplicaciones puramente oceanográficas. El objetivo final, será el determinar a través de sus consecuencias, influencia sobre la marea terrestre, la magnitud y distribución de las mareas oceánicas. Partiendo de esta base, el Prof. Kuo de la Universidad de Columbia, ha realizado una serie de perfiles gravimétricos a ambos lados del Océano Atlántico, que una vez interpretados han dado lugar a las primeras cartas de mareas oceánicas basadas en datos observados sobre los continentes. Creemos que esta primera experiencia ha abierto la puerta a un amplio programa de investigación, del que hemos podido ver sus primeros resultados en el Symposium Internacional sobre Mareas Terrestres, celebrado en Bonn en septiembre del pasado año, y que indudablemente servirá para aunar los esfuerzos de los oceanógrafos y los geofísicos en la interpretación correcta del fenómeno de mareas.

INVESTIGACIONES DE MAREAS TERRESTRES EN ESPAÑA

Las investigaciones que nuestro grupo de trabajo viene realizando en España, comienzan de forma efectiva en 1973 con la instalación de los primeros instrumentos, dos péndulos horizontales tipo VM, en un sótano de la Basílica de la Santa Cruz del Valle de los Caídos. Desde entonces, el programa de investigación ha venido desarrollándose de forma ininterrumpida, tanto en sus fases teóricas como instrumentales y observacionales. Todo el programa responde a un proyecto definido, desde un principio, en sus objetivos y que en las diversas etapas de su desarrollo se ha ido mejorando en función de los logros obtenidos y de las reales posibilidades científicas y económicas con que hemos contado. Todos sus objetivos están implícitos en los que con carácter general hemos visto en el anterior apartado, enfocados con las peculiaridades propias de nuestras necesidades prioritarias y las del laboratorio de que disponemos, la Península e Islas Canarias y Baleares.

La Península Ibérica, creemos, e incluso nos atrevemos a afirmar tras las experiencias realizadas en estos cinco últimos años, constituye de por sí un lugar de extraordinario interés para las investigaciones de mareas. Su situación, en el límite de separación de las placas Eurasiática y Africana, su complicada y aún no muy conocida geomorfología, el grave riesgo sísmico de algunas de sus regiones, la variación del régi-

men de mareas oceánicas a lo largo de sus costas, etc., son factores de gran interés a tener en cuenta.

Para una mejor visión de los logros y de los fines a alcanzar en nuestras investigaciones, creemos oportuno el distinguir tres líneas de trabajos, perfectamente diferenciables, en las que venimos trabajando:

1. Red Nacional de Estaciones de la Componente Vertical.
2. Investigaciones en mareas de inclinación.
3. Investigación instrumental.

1. *Red Nacional de Estaciones de la Componente Vertical.*

Como hemos visto a lo largo de este trabajo, el desarrollo adquirido en las investigaciones de las mareas gravimétricas, es, hoy por hoy, superior al de las clinométricas y extensométricas. Esto se debe a que:

1.º Disponemos de una instrumentación más adecuada y en mejora permanente. Las modernas generaciones de gravímetros, entre los que se encuentra el gravímetro superconductor, en período experimental, desarrollado en EE.UU., permiten un control de las variaciones de la aceleración de la gravedad por debajo de las décimas de microgal.

2.º Son mínimos, sobre todo en comparación con los clinómetros y extensómetros, los condicionamientos, en cuanto a lugar de instalación y mantenimiento, de este tipo de estaciones.

3.º Los efectos tanto geológicos como climáticos de tipo local, son muy pequeños en los gravímetros, en los que las posibles perturbaciones son más de origen global.

4.º Nos facilita información que cubre una gran parte de los objetivos que hemos señalado, si bien es verdad que una vez superados los inconvenientes que hoy existen, es presumible que con los clinómetros y extensómetros podamos obtener resultados de un gran interés, dado que la señal a investigar podrá llegar a superar la relación señal-ruido que es posible conseguir con los gravímetros.

El proyecto de Red Nacional, como puede verse en la fig. 2, comprende un total de 20 estaciones, convenientemente distribuidas en la Península, Islas Baleares y Canarias y en Melilla. Todas ellas son estaciones temporales, de unos seis meses de registro, y cuya finalidad es el estudio de las principales ondas en las frecuencias diurnas, semidiurnas y terciodiurnas. Para la realización de estas estaciones

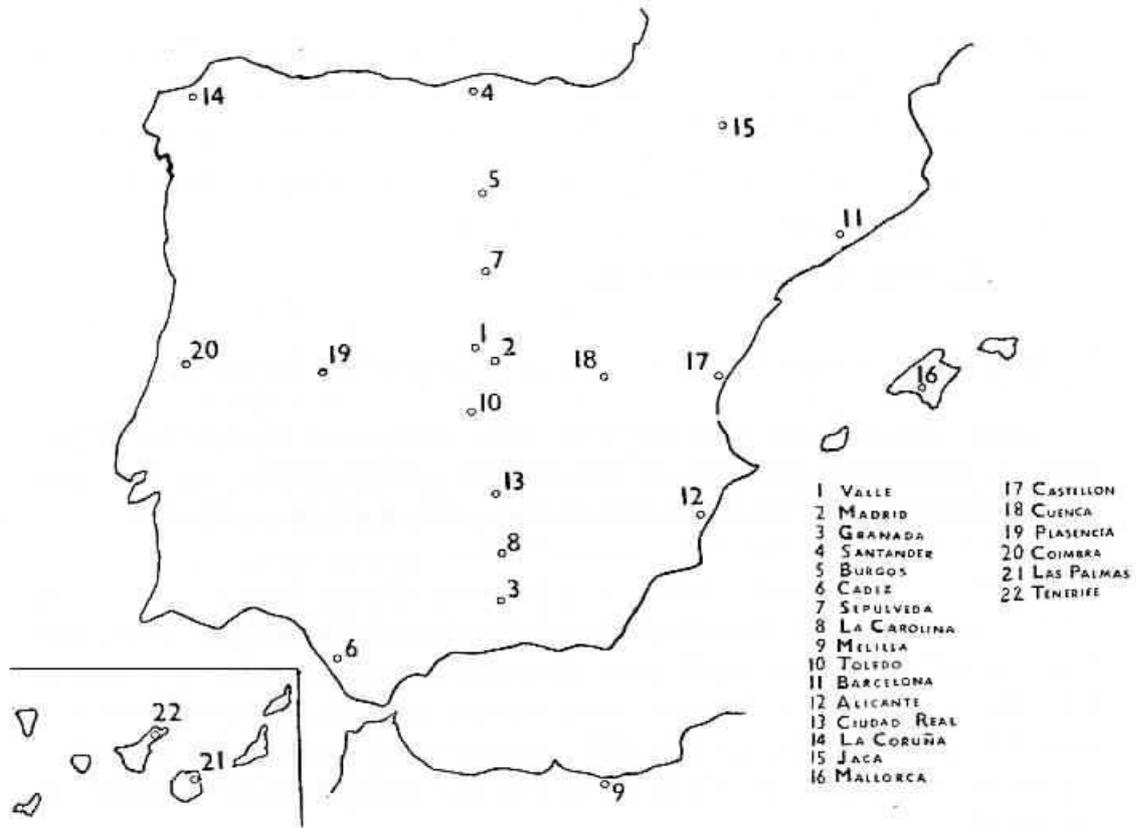


FIG. 2.

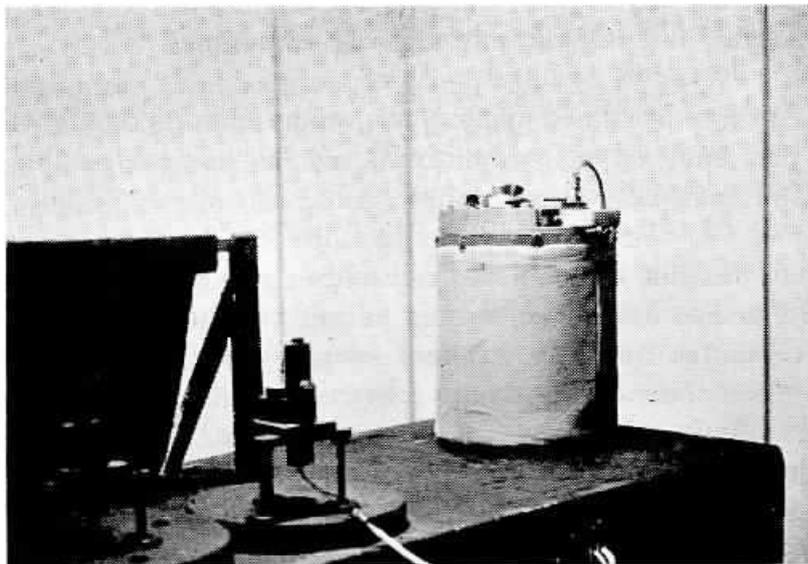


FIG. 3.

disponemos, por el momento, de un total de dos equipos volantes, cuya base son un gravímetro Askania GS 15, fig. 3, modificado en nuestros laboratorios de instrumentación, y un Lacoste and Romberg modelo G. Para una marcha normal del proyecto, será necesario incorporar a la red un nuevo equipo, para lo que estamos realizando las oportunas gestiones llenas, como es lógico, de dificultades dado el alto coste de dicho equipo completo y las penurias económicas que nos ahogan para no ser una excepción dentro de la investigación española.

En el cuadro de la fig. 4 puede verse un resumen del plan previsto de toma de datos, así como lo que se lleva realizado hasta el momento. Como puede observarse, en él figuran varias estancias de los instrumentos en la Estación Fundamental Europea de Bruselas; la finalidad de estas estaciones es la calibración de todos los instrumentos con respecto a los valores medios obtenidos en Bruselas tras la comparación de más de cincuenta gravímetros de todas las marcas y procedentes de muchos centros de investigación. Esperamos en un futuro próximo, quizás el año que viene, poder convertir nuestra estación base, la del Valle, en estación fundamental y para ello y como complemento a nuestras estaciones que se instalarán en el Valle a la vuelta de Bruselas, en donde se encuentran en la actualidad, estamos haciendo gestiones, tanto con el Centro Internacional de Mareas como con el Instituto de Ciencias Oceanográficas de Bidston (U.K.), para traer a nuestra estación gravímetros de alta calidad y también contrastados en la base, que completen un total de cuatro que creemos necesarios y suficientes para obtener en el Valle unas constantes óptimas. También puede llamar la atención en dicho cuadro, la estación realizada en Bu-Craa, Sahara, en los siete meses anteriores a la descolonización del Sahara Español; esta estación cabe enmarcarla dentro de la colaboración internacional que mantenemos y ante la sugerencia del Prof. Melchior del interés que tendrían datos de un continente en donde no se habían iniciado experiencias de este tipo. Hoy, contemplamos estos resultados de la estación sahariana a la luz de la posibilidad de llegar a enlazar con España los resultados que en su día obtengamos en las Islas Canarias, complementados con los de Melilla.

La elección de los emplazamientos de las diversas estaciones, responde, como es lógico, al fin que nos proponemos, con las variaciones que en cada momento puedan ser necesarias por problemas de mantenimiento o porque el curso de las investigaciones aconseje un estudio más en detalle de alguna zona determinada. Así, por ejemplo, estamos viendo la posibilidad de incorporar al proyecto original alguna otra estación en las proximidades de Sepúlveda ante el hecho de ciertas discontinuidades encontrada en los resultados de dicha estación al comparar sus resultados con los de la del Valle y de Madrid; esto podría indicar una respuesta diferente al efecto de ma-

PLAN PREVISTO DE TOMA DE DATOS 1974-1980

1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980
Madrid A.	Bu-Craa A.	Granada A.	Santander L.R. I	Bruselas A. y L.R. I	La Carolina A.	Barcelona A.
Bruselas A.	Madrid A.	Valle C. A.	Burgos A.	Toledo L.R. II	Ciudad R. L.R. I	Jaca L.R. I
		Burgos A.	Sepúlveda A.	Valle C. A. y L.R. I	Cuenca L.R. II	Mallorca L.R. II
		Santander L.R. I	S. Fernando L.R. I	La Coruña L.R. II	Plasencia A.	Melilla A.
					Alicante L.R. I	Sta. Cruz L.R. I
					Castellón L.R. II	Las Palmas L.R. II

A.: Gravimetro Askania GS 15 n.º 212

L.R. I: Gravimetro LaCoste Romberg mod. G, n.º 434

L.R. II: Gravimetro LaCoste Romberg

Fig. 4.

reas entre estaciones situadas al norte y al sur del Sistema Central, lo que a su vez podría ser síntoma desde el punto de vista estructural de importantes discontinuidades.

Existen en el proyecto dos direcciones preponderantes, la norte-sur, siguiendo aproximadamente el meridiano de Madrid, y la este-oeste, sobre el paralelo 40° N. La primera de dichas direcciones se ha elegido con objeto de hacer un estudio de los efectos de mareas oceánicas entre el Cantábrico y el Mar de Alborán y comprende las estaciones de Santander, Burgos, Sepúlveda, Valle, Madrid, Ciudad Real, La Carolina, Granada y Melilla, de las que las cinco primeras y Granada se encuentran ya realizadas. Es de gran interés este perfil, pues la fuerte influencia del Golfo de Vizcaya, con mareas principalmente semidiurnas de gran amplitud, es ostensible en las estaciones de Europa Central, dando en España valores, como hemos podido confirmar en nuestro trabajo, muy por encima de los encontrados en los diversos perfiles europeos y en el perfil mundial que está desarrollando el Centro Internacional por Asia y Australia. Por otro lado esta dirección coincide a grandes rasgos con la línea de calibración de gravímetros del Instituto Geográfico Nacional; es importante tener la posibilidad de realizar la corrección de mareas en dicha línea con datos reales procedentes de la observación, sobre todo si tenemos en cuenta que los modelos teóricos habitualmente utilizados para realizar dicha corrección difieren bastante de los valores encontrados en las estaciones del perfil ya analizadas.

La otra dirección preferente, que comprende las estaciones de Coimbra, Plasencia, Madrid, Cuenca, Castellón y Mallorca, todas ellas muy próximas al paralelo 40° N, tiene como interés especial, con independencia de su ideal situación, al igual que la norte-sur, para darnos unos resultados representativos del comportamiento global de la Península a este tipo de solicitaciones, el encontrarse todas las estaciones sobre el mismo paralelo en que a lo ancho de varios continentes o se han realizado o se tienen proyectos de realizar diversas estaciones. Consideramos de suma importancia el poder tener alrededor del mundo un conjunto de estaciones de la misma latitud, pues pensamos se pueden sacar importantes conclusiones sobre los objetivos de carácter astronómico que indicamos en el apartado correspondiente.

Completan el proyecto estaciones situadas en lugares que puedan complementar toda la información sobre la Península en su conjunto. Particularmente S. Fernando, por haber estado situada en el Observatorio de Marina y ser de especial valor sus resultados con vistas a posibles correcciones sobre las determinaciones de coordenadas, y la de Jaca, por poder servir de estación de comparación de resultados con estaciones francesas situadas al norte de los Pirineos, tienen un mayor interés.

En la tabla de la fig. 5, damos los resultados de las estaciones ya realizadas para las ondas, diurna O_1 y semidiurna M_2 , que son las dos

	O_1		M_2	
	δ	α	δ	α
SANTANDER	1.1833	-1.18	1.2234	11.18
BURGOS	1.1587	-0.66	1.1903	6.38
SEPULVEDA	1.1773	-0.40	1.1805	3.48
VALLE C.	1.1586	-0.60	1.1630	4.69
MADRID	1.1554	-0.36	1.1580	4.20
GRANADA	1.1691	-1.89	1.1708	3.47
S. FERNANDO	1.1628	-1.35	1.1302	6.25

FIG. 5.

de mayor interés por ser las que con más precisión pueden separarse en análisis de datos correspondientes a cortos períodos de observación. Estos resultados son todavía provisionales, ya que estamos en la actualidad calibrando los gravímetros en Bruselas. Sin poder entrar, por tanto, en una etapa de conclusiones, sí podemos adelantar algunas cuestiones que resultan evidentes y que están implícitas en los resultados, al margen de las posibles modificaciones que en ellos tengamos que hacer una vez conozcamos las constantes de calibración. Estas son:

1.ª Son muy fuertes las influencias oceánicas a lo largo del perfil norte-sur, que está concluido, en las cinco estaciones que unen Madrid a Santander.

2.ª La influencia oceánica disminuye, como estaba previsto, al alejarnos de la costa, pero aún en el centro de la Península llega a valores muy altos.

3.ª Existe una discontinuidad, principalmente en la fase de M_2 , entre Sepúlveda y las estaciones del Valle y Madrid. Este resultado, una vez eliminada la posibilidad de cualquier tipo de anomalía instrumental, es digno de un posterior estudio ya que, como decíamos anteriormente, puede ser indicativo de una respuesta más elástica de la zona sur de la Sierra del Guadarrama que de la zona norte, a pesar de la mayor proximidad de ésta al foco perturbador. Posiblemente estemos ante unos resultados indicativos de una variación estructural.

4.ª Las correcciones de mareas a las medidas gravimétricas son, sólo por el efecto oceánico, del orden de varios microgales, 12 en Santander y más de 4 en Madrid, lo que obliga a abandonar cualquier modelo teórico si queremos una precisión del microgal.

Una vez que dispongamos de los valores definitivos se podrá hacer una mejor cuantificación de los resultados.

2. *Investigaciones en mareas de inclinación.*

Pese a que estamos convencidos del amplio margen de posibilidades que el futuro reserva a las investigaciones en mareas de inclinación y extensométricas, la situación actual de las mismas está supeditada a una serie de cuestiones, que han surgido a la luz de los resultados obtenidos, que en cierto modo condicionan la utilidad de los mismos con vistas a su interpretación científica.

Estos inconvenientes para las mareas de inclinación podemos resumirlos en los siguientes puntos:

1.º Una instrumentación que debe ser mejorada, principalmente en aquellos aspectos que inciden en graves dificultades para la instalación y mantenimiento. Somos varios los grupos que venimos trabajando para conseguir unos clinómetros lo más precisos posible y con la moderna tecnología incorporada a los mismos; esperamos que muy pronto podamos tener concluidas estas investigaciones.

2.º Los efectos que podríamos llamar locales, como estructura geológica local, topografía de la zona, climatología, etc., tienen una clara influencia sobre las mareas de inclinación, cuyos resultados son un reflejo no sólo de las mareas en sí, sino de todas estas circunstancias, a veces difícilmente controlables.

3.º Es de suma importancia en las mareas de inclinación la elección del lugar de instalación de los clinómetros. Deben ser sitios en donde exista una estabilidad térmica natural a corto y a largo plazo. Variaciones de temperatura diurnas o estacionales llevan consigo derivas que se sobrepone al efecto de mareas precisamente en las frecuencias de mayor interés. Como consecuencia de esto se han buscado, para emplazar estos instrumentos, lugares como cuevas naturales, minas abandonadas, túneles en desuso, etc. Las consecuencias han sido positivas en cuanto al control térmico, pero han surgido nuevos problemas como son la existencia normal de ríos subterráneos en las cuevas naturales o la falta de estabilidad y microfracturación de las rocas en las minas que normalmente han sido perforadas con explosivos.

4.º Otro efecto importante, aún en el supuesto de que no existieran los anteriores, es el acoplamiento entre las mareas de inclinación y las extensométricas. Una cavidad en la que tengamos nuestra estación no sólo se inclina por el efecto de mareas, sino que al deformarse presenta inclinaciones residuales, en las mismas frecuencias, que se suman a las anteriores. Por otro lado, esta deformación es en gran parte dependiente de la forma de la cavidad. Estamos, pues, ante una perturbación, muy recientemente puesta en evidencia, y de muy difícil control y cuya mejor solución parece derivar del cálculo teórico en función de la forma y características geológicas de cada cavidad.

Con todo lo anterior hemos querido poner de manifiesto que en mareas clinométricas, estamos en una etapa investigadora previa a la explotación sistemática de la información, lo que no se contradice con el aprovechamiento de los resultados en aquellos objetivos para los que el nivel de ruido que introducen las perturbaciones anteriores es mínimo. Por otro lado está claro que todos estos efectos han podido manifestarse a través de una investigación profunda sobre los resultados experimentales.

La eliminación de la gran mayoría de las perturbaciones se podrá conseguir con la instalación de clinómetros electrónicos en sondeos profundos, siendo ésta la línea de investigación instrumental y experimental que a nivel mundial se ha comenzado.

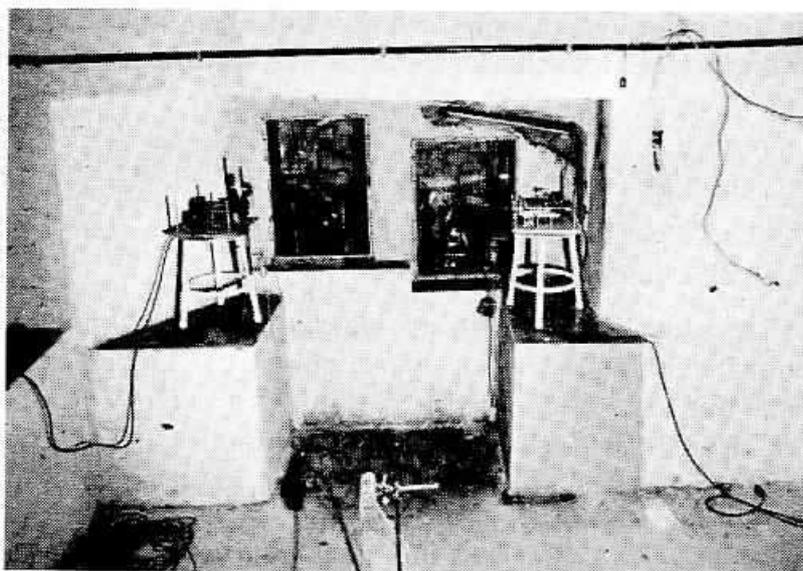


FIG. 6.

En la estación del Valle de los Caídos, instalamos, en 1973, dos péndulos horizontales tipo VM (fig. 6), que desde entonces permanecen registrando mareas de inclinación en las dos direcciones fundamentales, la norte-sur y la este-oeste. La determinación de la meridiana y la del azimut de los brazos de ambos péndulos se hizo mediante teodolito giroscópico. Con los péndulos quedaron también instalados los equipos de registro, de tiempo y de calibración mediante tejo dilatante.

Los resultados obtenidos tras el análisis de más de cuatro años de registros, con series ininterrumpidas hasta de dieciseis meses, están sirviendo de base para una investigación de los diferentes efectos que anteriormente hemos comentado. Se observa una influencia, sobre las ondas diurnas de frecuencia próxima al día solar, de las variacio-

nes térmicas correspondientes. Igualmente se han analizado variaciones estacionales del mismo origen. Los factores de amplitud y los desfases correspondientes a los grupos de ondas semidiurnos, libres de estas influencias térmicas, ponen de manifiesto perturbaciones de origen oceánico, que estamos tratando de evaluar a partir de las cartas oceánicas y de los resultados del perfil gravimétrico.

Estamos pues en una etapa en la que aún no es posible una interpretación geofísica de los resultados, quedando ésta pendiente de una mayor profundización en los efectos perturbadores y en la evaluación de los mismos.

Como objetivos inmediatos para los próximos años figuran:

a) Cálculo de la influencia oceánica.

b) Investigación del efecto de cavidad. La estación del Valle, por su geometría, es de gran interés para esta investigación. Tenemos proyectado, una vez estén concluidos los nuevos clinómetros electrónicos que estamos construyendo y de los que hablamos más adelante, una investigación en profundidad del efecto de cavidad, esperando resultados del mayor interés.

c) A partir del análisis de los registros ya obtenidos, estamos procediendo a un estudio de las derivas diurnas y estacionales de origen climático, así como de las no periódicas. Entre estas últimas se encuentran las de origen local, procedentes de pequeños ajustes, y las más significativas e importantes, consecuencia de grandes o próximos sismos o de movimientos lentos de zonas de mayor amplitud.

3. *Investigación Instrumental.*

Como hemos visto en varias ocasiones a lo largo del presente trabajo, uno de los problemas más acuciantes y en el que en algunos casos no se ha llegado a la mejor solución, es el derivado de la instrumentación. La pequeña magnitud de las variaciones en la aceleración de la gravedad, inclinaciones y deformaciones de la corteza, a que dan lugar las mareas, exige una continua adaptación a la tecnología más reciente. Estamos en el límite del aprovechamiento de la señal, es imprescindible el eliminar toda causa que de forma sistemática afecte a la misma por imperativos ajenos a los fenómenos naturales que deseamos detectar y evaluar. Ha constituido para los diversos grupos que venimos trabajando en estas investigaciones una necesidad el preocuparse no sólo del aspecto teórico de las mismas, sino con tanta o más intensidad de proponer e incluso realizar las innovaciones técnicas que permitan superar aquellos inconvenientes. Desde el comienzo de estas investigaciones, se formó en nuestro Departamento un grupo de investigación instrumental, que no sólo se ha ocupado de los trabajos rutinarios de mantenimiento de estaciones, sino que lleva adelante un

programa de investigación en aquellos puntos que hemos encontrado de mayor interés como consecuencia de nuestros trabajos. Aunque una descripción de todos y cada uno de los logros instrumentales conseguidos cae fuera de la intención y de la capacidad de este resumen, creemos de interés significar al menos en qué líneas se está trabajando, que podemos resumir en los siguientes puntos:

a) En mareas clinométricas. Tras varios años de investigación se ha terminado el diseño y está en período de fabricación, en nuestros laboratorios, un prototipo de clinómetro electrónico, totalmente automatizado y en el que se ha empleado la más moderna tecnología e ideas totalmente distintas y originales. En tan sólo unos meses estos prototipos, quedarán instalados en la estación del Valle de los Caídos, con objeto de poder realizar estudios comparativos con los allí instalados.

b) Estaciones gravimétricas. Con independencia de lo ya realizado y que ha sido objeto de varias comunicaciones y publicaciones, en la actualidad se está trabajando en:

1. Diseño y construcción de un nuevo módulo de control, calibración, registro y alimentación adaptable a los dos tipos de gravímetros de que disponemos. Este módulo va comandado por microprocesador y recogerá toda la información con la periodicidad que se desee sobre soporte analógico y digital.

2. Como consecuencia de otra investigación instrumental que se realiza independientemente de la de mareas, la construcción de una cámara cenital para la realización de perfiles del geoide, se está desarrollando un nivel electrónico de registro analógico y digital cuyas posibilidades de adaptación a la instrumentación de mareas, principalmente a los gravímetros, estamos estudiando y que con toda seguridad nos facilitará una información de gran interés.

3. El gravímetro Askania va a ser objeto de una importante modificación para convertirlo en un gravímetro de cero. Igualmente pensamos modificar el sistema de termostatación, sustituyendo el actual por uno diferencial de mayor rapidez y más precisión.

Todas las investigaciones se están desarrollando en la Cátedra de Astronomía y Geodesia de la Facultad de Ciencias Matemáticas de la Universidad Complutense, y en el Departamento de Mecánica y Astronomía del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, siendo subvencionadas con los fondos de ambos Centros, así como con las subvenciones concedidas por la Comisión Asesora de Investigación Científica y Técnica de Presidencia de Gobierno.

*Departamento de Mecánica
y Astronomía C.S.I.C.*

PUBLICACIONES DEL SEMINARIO DE ASTRONOMIA Y GEODESIA DE LA UNIVERSIDAD COMPLUTENSE - MADRID

- 1.—Efemérides de 63 Asteroides para la oposición de 1950 (1949).
- 2.—E. PAJARES: Sobre el cálculo gráfico de valores medios (1949).
- 3.—J. PENSADO: Órbita del sistema visual σ^2 U Maj (1950).
- 4.—Efemérides de 79 Asteroides para la oposición de 1951 (1950).
- 5.—J. M. TORROJA: Corrección de la órbita del Asteroide 1395 «Aribeda» (1950).
- 6.—R. CARRASCO y J. M. TORROJA: Rectificación de la órbita del Asteroide 1371 «Resia» (1971).
- 7.—J. M. TORROJA y R. CARRASCO: Rectificación de la órbita del Asteroide 1560 (1942 XB) y efemérides para la oposición de 1951 (1951).
- 8.—M. L. SIEGRIST: Órbita provisional del sistema visual Σ 728-32 Orionis (1951).
- 9.—Efemérides de 79 Asteroides para la oposición de 1952 (1951).
- 10.—J. PENSADO: Órbita provisional de Σ 1883 (1951).
- 11.—M. L. SIEGRIST: Órbita provisional del sistema visual Σ 2052 (1952).
- 12.—Efemérides de 88 Asteroides para la oposición de 1953 (1952).
- 13.—J. PENSADO: Órbita de ADS 9380 = Σ 1879 (1952).
- 14.—F. ALCÁZAR: Aplicaciones del Radar a la Geodesia (1952).
- 15.—J. PENSADO: Órbita de ADS 11897 = Σ 2438 (1952).
- 16.—B. RODRÍGUEZ-SALINAS: Sobre varias formas de proceder en la determinación de períodos de las marcas y predicción de las mismas en un cierto lugar (1952).
- 17.—R. CARRASCO y M. PASCUAL: Rectificación de la órbita del Asteroide 1528 «Conrada» (1953).
- 18.—J. M. GONZÁLEZ-ABOIN: Órbita de ADS 1709 = Σ 228 (1953).
- 19.—J. BALTÁ: Recientes progresos en Radioastronomía. Radiación solar hiperfrecuente (1953).
- 20.—J. M. TORROJA y A. VÉLEZ: Corrección de la órbita del Asteroide 1452 (1938 DZ₁) (1953).
- 21.—J. M. TORROJA: Cálculo con Cracovianos (1953).
- 22.—S. AREND: Los polinomios ortogonales y su aplicación en la representación matemática de fenómenos experimentales (1953).
- 23.—J. M. TORROJA y V. BONGERA: Determinación de los instantes de los contactos en el eclipse total de Sol de 25 de febrero de 1952 en Cogo (Guinea Española) (1954).
- 24.—J. PENSADO: Órbita de la estrella doble Σ 2 (1954).
- 25.—J. M. TORROJA: Nueva órbita del Asteroide 1420 «Radcliffe» (1954).
- 26.—J. M. TORROJA: Nueva órbita del Asteroide 1557 (1942 AD) (1954).
- 27.—R. CARRASCO y M. L. SIEGRIST: Rectificación de la órbita del Asteroide 1290 «Albertine» (1954).
- 28.—J. PENSADO: Distribución de los períodos y excentricidades y relación periodo-excentricidad en las binarias visuales (1955).
- 29.—J. M. GONZÁLEZ-ABOIN: Nueva órbita del Asteroide 1372 «Haremari» (1955).
- 30.—M. DE PASCUAL: Rectificación de la órbita del Asteroide 1547 (1929 CZ) (1955).
- 31.—J. M. TORROJA: Órbita del Asteroide 1554 «Yugoslavia» (1955).
- 32.—J. PENSADO: Nueva órbita del Asteroide 1401 «Lavonne» (1956).
- 33.—J. M. TORROJA: Nuevos métodos astronómicos en el estudio de la figura de la Tierra (1956).
- 34.—D. CALVO: Rectificación de la órbita del Asteroide 1466 «Mündleria» (1956).
- 35.—M. L. SIEGRIST: Rectificación de la órbita del Asteroide 1238 «Predappia» (1956).
- 36.—J. PENSADO: Distribución de las inclinaciones y de los polos de las órbitas de las estrellas dobles visuales (1956).
- 37.—J. M. TORROJA y V. BONGERA: Resultados de la observación del eclipse total de Sol de 30 de junio de 1954 en Sydkoster (Suecia) (1957).
- 38.—ST. WIERZBINSKI: Solution des équations normales par l'algorithme des cracoviens (1958).
- 39.—J. M. GONZÁLEZ-ABOIN: Rectificación de la órbita del Asteroide 1192 «Prisma» (1958).
- 40.—M. LÓPEZ ARROYO: Sobre la distribución en longitud heliográfica de las manchas solares (1958).
- 41.—F. MÚGICA: Sobre la ecuación de Laplace (1958).

(Continúa en la tercera de cubierta)

- 42.—F. MARTÍN ASÍN: Un estudio estadístico sobre las coordenadas de los vértices de la triangulación de primer orden española (1958).
- 43.—ST. WIERZBINSKI: Orbite améliorée de δ 4530 = γ Cen = Cpd —48°, 4965 (1958).
- 44.—D. CALVO BARRENA: Rectificación de la órbita del Asteroide 1164 «Kobolda» (1958).
- 45.—M. LÓPEZ ARROYO: El ciclo largo de la actividad solar (1959).
- 46.—F. MÚGICA: Un nuevo método para la determinación de la latitud (1959).
- 47.—J. M. TORROJA: La observación del eclipse de 2 de octubre de 1959 desde El Aaiun (Sahara) (1960).
- 48.—J. M. TORROJA, P. JIMÉNEZ-LANDI y M. SOLÍS: Estudio de la polarización de la luz de la corona solar durante el eclipse total de Sol del día 2 de octubre de 1959 (1960).
- 49.—E. PAJARES: Sobre el mecanismo diferencial de un celóstato (1960).
- 50.—J. M. GONZÁLEZ-ABOIN: Sobre la diferencia entre los radios vectores del elipsoide internacional y el esferoide de nivel (1960).
- 51.—J. M. TORROJA: Resultado de las observaciones del paso de Mercurio por delante del disco solar del 7 de noviembre de 1960 efectuadas en los observatorios españoles (1961).
- 52.—F. MÚGICA: Determinación de la latitud por el método de los verticales simétricos (1961).
- 53.—M. LÓPEZ ARROYO: La evolución del área de las manchas solares (1962).
- 54.—F. MÚGICA: Determinación simultánea e independiente de la latitud y longitud mediante verticales simétricos (1962).
- 55.—P. DíEZ-PICAZO: Elementos de la órbita de la variable eclipsante V 499 Scorpionis (1964).
- 56.—J. M. TORROJA: Los Observatorios Astronómicos en la era espacial (1965).
- 57.—F. MARTÍN ASÍN: Nueva aportación al estudio de la red geodésica de primer orden española y su comparación con la red compensada del sistema europeo (1966).
- 58.—F. SÁNCHEZ MARTÍNEZ: La Luz Zodiacal. Luz del espacio interplanetario (1966).
- 59.—J. M. GONZÁLEZ-ABOIN: Variaciones de las coordenadas geodésicas de los vértices de una red, por cambio de elipsoide de referencia (1966).
- 60.—F. SÁNCHEZ MARTÍNEZ y R. DUMONT: Fotometría absoluta de la raya verde y del continuo atmosférico en el Observatorio Astronómico del Teide (Tenerife), de enero de 1964 a julio de 1965 (1967).
- 61.—M. REGO: Estudio del espectro de la estrella 31 Aql. en la región $\lambda\lambda$ 4000 6600 Å (1969).
- 62.—C. MACHÍN: Mareas terrestres (1969).
- 63.—J. M. TORROJA: La estación para la observación de satélites geodésicos de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Madrid (1969).
- 64.—M. J. SEVILLA: Reducción automática de posiciones de estrellas (1970).
- 65.—J. M. TORROJA: Memoria de las actividades del Seminario de Astronomía y Geodesia de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Madrid en 1969 (1970).
- 66.—M. J. SEVILLA: Los cálculos de estación en triangulación espacial (1970).
- 67.—MANGEL E. REGO: Determinación de las abundancias de los elementos en la atmósfera de la estrella de alta velocidad 31 Aql. (1970).
- 68.—M. J. FERNÁNDEZ-FIGUEROA: Análisis cualitativo del espectro de la estrella peculiar HD 18474 (1971).
- 69.—J. M. TORROJA: Memoria de las actividades del Seminario de Astronomía y Geodesia de la Universidad Complutense de Madrid en 1970 (1971).
- 70.—R. VIEIRA y R. ORTIZ: Descripción de un aparato para medida de coordenadas (1971).
- 71.—J. M. TORROJA: Memoria de las actividades del Seminario de Astronomía y Geodesia de la Universidad Complutense de Madrid en 1971 (1972).
- 72.—M. J. FERNÁNDEZ-FIGUEROA: Observación y estudio teórico del espectro de la estrella peculiar HD 18474 (1972).
- 73.—M. J. SEVILLA: Cálculo de las constantes de distorsión y parámetros del disco obturador para cámaras balísticas (1973).
- 74.—R. PARRA y M. J. SEVILLA: Cálculo de efemérides y previsiones de pasos de satélites geodésicos (1973).
- 75.—M. REGO y M. J. FERNÁNDEZ-FIGUEROA: Resultado de las observaciones de α Peg efectuadas desde el satélite europeo TD1 (1973).
- 76.—E. SIMONNEAU: Problemas en la determinación de abundancias de elementos en las estrellas en condiciones de equilibrio termodinámico local y alejadas del equilibrio termodinámico local (1974).
- 77.—J. ARANDA: Construcción de modelos de estructura interna para estrellas en la secuencia principal inicial (1974).

- 78.—R. ORTIZ, M. SEVILLA y R. VIEIRA: Estudio de la calibración, técnica de medida y automatización de datos en un comparador para medidas de placas estelares (1974).
- 79.—M. J. SEVILLA: Método autocorrector para el cálculo de direcciones de satélites geodésicos y análisis de los errores en la restitución de un arco de órbita (1974).
- 80.—M. A. ACOSTA, R. ORTIZ y R. VIEIRA: Diseño y construcción de un fotómetro fotoeléctrico para la observación de ocultaciones de estrellas por la Luna (1974).
- 81.—T. J. VIVES, C. MORALES, J. GARCÍA-PELAYO y J. BARBERO: Fotometría fotográfica UBV del cúmulo galáctico King 19 (1974).
- 82.—R. ORTIZ y R. VIEIRA: Control automático en posición y tiempo de los sistemas de obturación de las cámaras de observación de satélites geodésicos (1974).
- 83.—J. M. TORROJA: Memoria de las actividades del Seminario de Astronomía y Geodesia de la Universidad Complutense de Madrid en 1972 y 1973 (1974).
- 84.—M. J. FERNÁNDEZ-FIGUEROA y M. REGO: α CrB en el ultravioleta lejano (1975).
- 85.—J. M. TORROJA, R. VIEIRA, R. ORTIZ y M. J. SEVILLA: Estudio de mareas terrestres en España (1975).
- 86.—M. J. SEVILLA y R. PARRA: Levantamiento gravimétrico de Lanzarote (1975).
- 87.—P. KUNDANMAL SUKHWANI: Modelos teóricos de curvas de luz. Su aplicación al sistema β Lyrae (1975).
- 88.—M. J. SEVILLA: Coordenadas astronómicas y geodésicas. Desviación relativa de la vertical (1975).
- 89.—C. TEJEDOR: Fotometría fotoeléctrica R. G. U. del cúmulo galáctico IC 2581 (1976).
- 90.—M. J. SEVILLA: Nuevos coeficientes para la reducción automática de posiciones de estrellas (1976).
- 91.—M. REGO: Técnicas observacionales en espectroscopía astrofísica (1976).
- 92.—M. J. SEVILLA: Determinación de la latitud por distancias cenitales de la polar, método de Littrow (1976).
- 93.—T. J. VIVES: Determinación fotométrica del tipo espectral de la componente desconocida de una estrella binaria eclipsante (1976).
- 94.—M. REGO y M. J. FERNÁNDEZ FIGUEROA: Contraste y determinación por métodos astrofísicos de fuerzas de oscilador (1977).
- 95.—M. J. SEVILLA y R. CHUECA: Determinación de acimutes por observación de la Polar. Método micrométrico (1977).
- 96.—JOSÉ M. GARCÍA-PELAYO: Fotometría R G U en un campo del anticentro galáctico, cerca del NGC 581 (1977).
- 97.—JOSÉ M. GARCÍA-PELAYO: Datos fotométricos de 2.445 estrellas estudiadas en la región de Casiopea, entre los cúmulos abiertos Trumpler 1 y NGC 581 (1977).
- 98.—PREM K. SUKHWANI y RICARDO VIEIRA: Spectral Analysis of Earth Tides (1977).
- 99.—JOSÉ M. TORROJA y RICARDO VIEIRA: Earth Tides in Spain. Preliminary results (1977).
- 100.—PREM K. SUKHWANI y RICARDO VIEIRA: Three different methods for taking in account the gaps in spectral analysis of Earth Tides records (1978).