

RB-0198.  
CRP-9

C-18

CONTRIBUCIÓN AL ESTUDIO DEL SISMO  
SENTIDO EN MELILLA EL 9 DE JULIO DE 1923.  
CÁLCULO DE LAS COORDENADAS FOCALES  
Y DE LA HORA DE LA SACUDIDA EN EL FOCO  
Y EN EL EPICENTRO

POR

VICENTE INGLADA

Teniente coronel de Estado Mayor e Ingeniero Geógrafo



MADRID

IMPRENTA CLÁSICA ESPAÑOLA

ÁLVAREZ DE CASTRO, 12. TELÉF. 30501

1930



Nº 4012

# Contribución al estudio del sismo sentido en Melilla el 9 de julio de 1923.—Cálculo de las coordenadas focales y de la hora de la sacudida en el foco y en el epicentro

por

**Vicente Inglada**

Teniente coronel de Estado Mayor e Ingeniero Geógrafo

(PRESENTADO POR EL AUTOR EN LA SECCIÓN DE CIENCIAS FÍSICO QUÍMICAS)

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo, dedicado al sismo sentido en Melilla a las 15 horas 31 minutos del 9 de julio de 1923, es la segunda aplicación de un procedimiento que hemos ideado para calcular las coordenadas del epicentro en función de las horas de las ondas normales P registradas en varias Estaciones próximas y que se basa en el hecho experimental de su propagación aparente por la superficie terrestre con la velocidad constante de ocho kilómetros por segundo.

Aplicado dicho procedimiento por primera vez al sismo pirenaico (Canal de Berdún), de 10 de julio de 1923, dió excelentes resultados, porque se disponía entonces de los datos de observación de 17 Estaciones sismológicas. El epicentro obtenido por el cálculo coincidió admirablemente con el hallado por el señor Rey Pastor, director de la Estación de Toledo, como resultado de la información macrosísmica y de un minucioso reconocimiento del terreno efectuado por él, a raíz de ocurrir el sismo.

En el que se estudia en el presente trabajo, las circunstancias no son tan favorables; la información macrosísmica se reduce a la simple noticia de haberse sentido el sismo en Melilla, con el grado de intensidad VI-VII (escala de Mercalli), y los datos de observación, de cinco Estaciones solamente, no son de suma preci-

sión; exceptuando las gráficas registradas en Cartuja y Toledo, en que la hora de P es exacta al segundo, las de las demás Estaciones ofrecen incertidumbre de dos a tres segundos, lo que hace sumamente difícil la determinación precisa del epicentro, como lo prueba el hecho de que, basándose en los datos comunicados en un principio por las Estaciones españolas (horas de P y distancias epicentrales), la determinación hecha por los distinguidos sismólogos Rvdo. P. Manuel María Sánchez-Navarro Neumann, S. J., y don Alfonso Rey Pastor, haya dado un epicentro, que dista 60 y 85 kilómetros, respectivamente, del que se halla en el presente estudio.

En el capítulo I se hace un análisis detenido de los datos facilitados por las Estaciones españolas, se desechan algunas horas de P que resultan inadmisibles, y, basándose en las gráficas registradas en Toledo y Cartuja, se deducen las distancias epicentrales de dichas Estaciones; aprovechando la circunstancia sorprendente de hallarse el epicentro sensiblemente en la prolongación de la recta que une ambas Estaciones y a 180 kilómetros de la segunda, se obtiene una situación aproximada de dicho punto y se deducen las horas de P en cada una de aquéllas, sin disponerse aún de los sismogramas de Alicante, Almería, Málaga y San Fernando, con la brillante confirmación de ofrecer exactamente los mismos intervalos que las horas de otro sismo, sentido también en Melilla el 11 de octubre de 1926 (pocos días antes de efectuar dicho cálculo), y que parece irradiar del mismo foco.

En el capítulo II se hace el estudio de todas las gráficas registradas (a excepción de las de Almería, que no llegaron a nuestro poder), y se obtienen con gran exactitud las coordenadas del epicentro, que corresponden a un foco submarino situado a unos 60 kilómetros al WNW de Melilla.

El capítulo III se dedica al cálculo de la profundidad hipocentral. Dada la imposibilidad de utilizar las horas de  $\bar{P}$ , por estar la Estación más próxima (Málaga) a 150 kilómetros de distancia epicentral, se utilizan los intervalos entre las horas de las distintas fases de los sismogramas y las tablas del profesor A. Mohorovičić, lo que permite obtener unos cuarenta valores de la profundidad del foco, cuyo promedio de 26 kilómetros tiene solamente el error medio de 1.

El estudio de las gráficas de Cartuja, ampliadas fotográficamente unas seis veces, permite identificar por primera vez las ondas directas y reflejadas previstas en la ingeniosa teoría del

profesor A. Mohorovičić, y de este modo se confirma brillantemente la existencia de la superficie de discontinuidad de la corteza propuesta por él para explicar la formación de las ondas normales P e individuales  $\bar{P}$  y las distintas reflexiones en las dos superficies que limitan la capa superior de la corteza.

Obtenidas las coordenadas focales, se calculan con suma facilidad las horas del sismo en el hipocentro y epicentro, con error medio de una décima de segundo.

No obstante el escaso material de observación de que se disponía en este caso y la carencia de información macrosísmica, las coordenadas del foco submarino se han obtenido con suma precisión, lo que prueba el brillante porvenir que espera a la Sismometría en el problema fundamental de la determinación del hipocentro y de la hora inicial del fenómeno telúrico, y esto nos ha animado a publicar el presente trabajo, por si los procedimientos que en él se siguen pudieran ser de utilidad a los sismólogos españoles y movieran a los amantes de la ciencia sísmica a prestar su valiosa colaboración a esta empresa nacional de fijar los focos de los sismos ibéricos, que es la base indispensable del estudio de la sismicidad y de la delimitación de las zonas sísmicas de nuestro suelo.

## CAPÍTULO I

### **Antecedentes y datos de observación relativos al mismo**

El día 9 de julio de 1923, pocas horas antes de ocurrir el importante sismo pirenaico (Canal de Berdún), a cuyo estudio hemos dedicado otro trabajo (1) (\*), se sintió en Melilla, a las 15 horas 31 minutos, un temblor de tierra, de grado VI-VII (escala Mercalli), que registraron los péndulos de las Estaciones sismológicas españolas.

Los datos de información macrosísmica son tan escasos, que se reducen al hecho de que el sismo se sintiera en Melilla con dicho grado de intensidad. Como esto no basta para localizar el foco, que, como veremos en el transcurso de este trabajo, es submarino, el estudio del sismo ha de hacerse basándose solamente en los datos del registro instrumental. En el boletín de la Esta-

---

(\*) Una llamada en esta forma indica el número de la Memoria o artículo de la lista bibliográfica que se inserta al final del presente trabajo.

ción sismológica de Cartuja (Granada), correspondiente al mes de julio de 1923, se dice de este sismo en la casilla de observaciones: "Sentido en Melilla (VI-VII). Epicentro: 35°,5 N; -4°, 2 W.

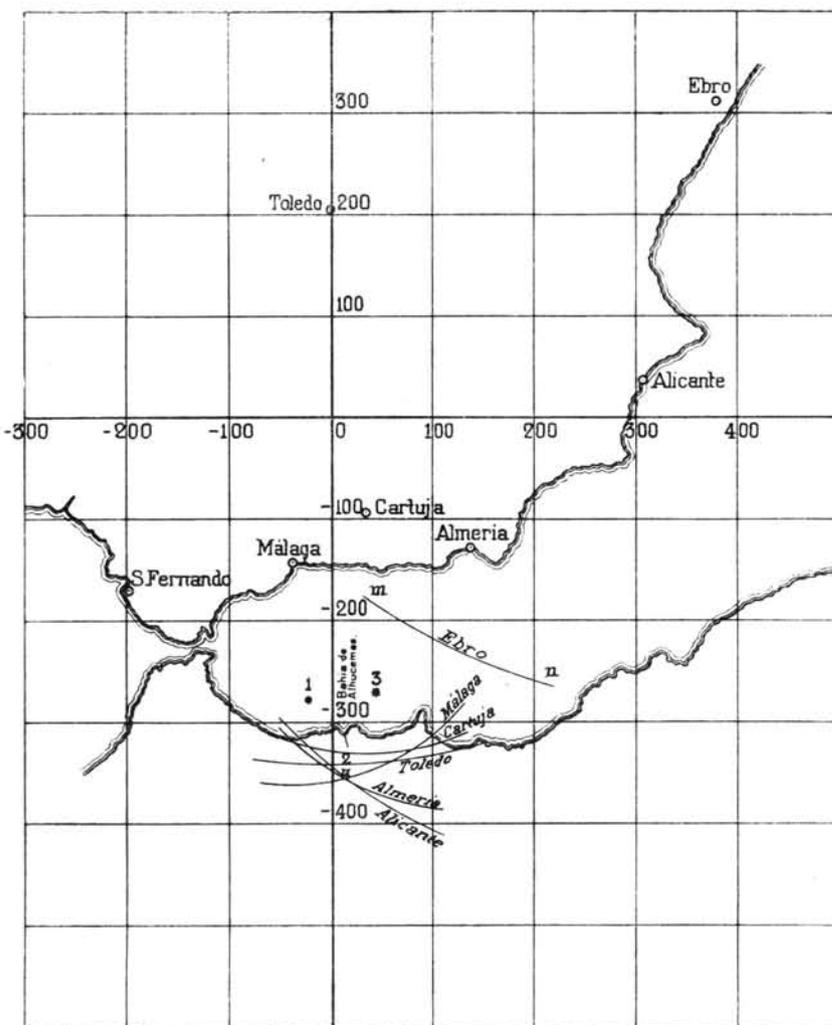


Fig. 1.ª - Posición del epicentro obtenida por varios sismólogos: 1, por el P. Sánchez Navarro; 2, por D. A. Rey Pastor; 3, por D. V. Inglada.

Gr." (en la figura 1 se ha representado la posición que corresponde a estas coordenadas).

La revista "Ibérica", en los "Datos sísmicos de España: tercer trimestre de 1923" (núm. 499, de 27 de octubre de 1923), da

los correspondientes a este sismo, facilitados por las Estaciones españolas:

“Día 9 de julio.—Tiene lugar en Melilla un temblor, de grado VI-VII M., registrado en:

Málaga.....	a 15 h. 31 m. 38 s. con el epicentro a 220 kms.	} (1).
San Fernando.....	a 15 h. 31 m. 42 s. — » »	
Almería.....	a 15 h. 31 m. 44 s. — a 260 kms.	
Cartuja.....	a 15 h. 31 m. 49 s. — a 240 kms.	
Toledo.....	a 15 h. 32 m. 22 s. — a 550 kms.	
Alicante.....	a 15 h. 32 m. 34 s. — a 490 kms.	
Ebro.....	a 15 h. 32 m. 52 s. — a 600 kms.	
Emerge en Fabra....	a 15 h. 34 m. 49 s. — » »	

En el número 518 de la misma revista (8 de marzo de 1924), el distinguido sismólogo don Alfonso Rey Pastor, director de la Estación Central de Toledo, publica un trabajo muy interesante, titulado “Sismicidad de España y Norte de Africa en el año 1923”, en que se inserta la reproducción de la gráfica de este sismo, registrada por la componente N-S del péndulo astático Wiechert, reformado, que funciona en dicha Estación, y se dice textualmente:

“Otro sismo, también intenso, fué el del día 9 de julio, con el epicentro emplazado en el Rif (Kábila de Gueznaya), a unos 40 kilómetros al S. de la bahía de Alhucemas; se sintió como de grado VI-VII en Melilla, lo cual indica que en el epicentro, probablemente llegaría al VIII, o sea de la misma intensidad que el de Martes (Canal de Berdún), pero sin réplicas conocidas.”

La posición de este epicentro resulta de los valores de las distancias epicentrales insertas en “Ibérica” (1), y que acabamos de transcribir, pues si haciendo centro en cada uno de los puntos que en el mapa representan las Estaciones sismológicas (fig. 1), se trazan arcos de círculo, cuyos radios sean, en la escala elegida, las respectivas distancias epicentrales, se advierte en seguida que prescindiendo del **mn.** correspondiente a Ebro (Tortosa), todos los demás limitan, por su mutua intersección, una zona en forma de triángulo curvilíneo, en cuya parte central y muy próximo a su vértice meridional, cabría tomar como epicentro un punto, que viene a estar, como asegura el señor Rey Pastor, a unos 40 kilómetros al S. de la bahía de Alhucemas.

Como veremos más adelante, al analizar los datos del registro instrumental, las distancias epicentrales facilitadas por las Estaciones españolas, a excepción de la de Tortosa, son todas excesivas, a causa de haberse calculado por las tablas correspondientes

a los telesismos, y no por las que ha construido el profesor A. Mohorovičić (5), y que sirven para los sismos próximos. Por esta razón, los arcos trazados en la figura 1 tienden a correr hacia el S. la posición del epicentro y dan un punto situado en nuestra zona de influencia, cuando realmente su posición está en el fondo del Mediterráneo, a poca distancia de la península de Tres Forcas.

Para juzgar del grado de aproximación de las horas de P y de las distancias epicentrales (1), facilitadas por las Estaciones españolas, tracemos con tales datos la curva dromocrónica de las ondas P de este sismo. La figura 2 representa la posición de los puntos correspondientes a las distintas Estaciones, excepto las de San Fernando y Fabra (Barcelona), que no han dado el valor de la distancia epicentral. Como ya hemos demostrado en otro trabajo (1), la dromocrónica de las ondas P es sensiblemente una línea recta cuya dirección corresponde a la velocidad aparente de ocho kilómetros por segundo, que tienen dichas ondas en la superficie terrestre. Es fácil deducir por la inspección de la figura 2, que es imposible trazar una línea recta que pase por la inmediación de los puntos allí representados. Si por los que corresponden a Alicante y Ebro se trazan rectas paralelas a la dirección que ha de tener la dromocrónica, se advierte que dejan muy por debajo a todas las Estaciones restantes, por lo cual las horas facilitadas por Alicante y Ebro no se pueden adaptar al conjunto de las demás, de aceptar los datos del cuadro I. Si, prescindiendo de las dos Estaciones citadas, tratamos de trazar una recta que se aproxime lo más posible a las demás y que tenga la dirección de la dromocrónica, se obtiene la AB (fig. 2), que da discrepancias de tres a cuatro segundos, por término medio, lo que indica que las distancias epicentrales (1), son muy poco aproximadas.

Si aceptamos ahora el epicentro de Rey Pastor, representado en la figura 1 (punto 2, situado a unos 40 kilómetros al S. de la bahía de Alhucemas), las distancias epicentrales aproximadas, medidas directamente en el mapa, son las siguientes:

	Kms.	
Málaga.....	212	}
Almería.....	252	
Cartuja.....	257	
San Fernando.....	277	
Alicante.....	483	
Toledo.....	553	
Ebro.....	752	

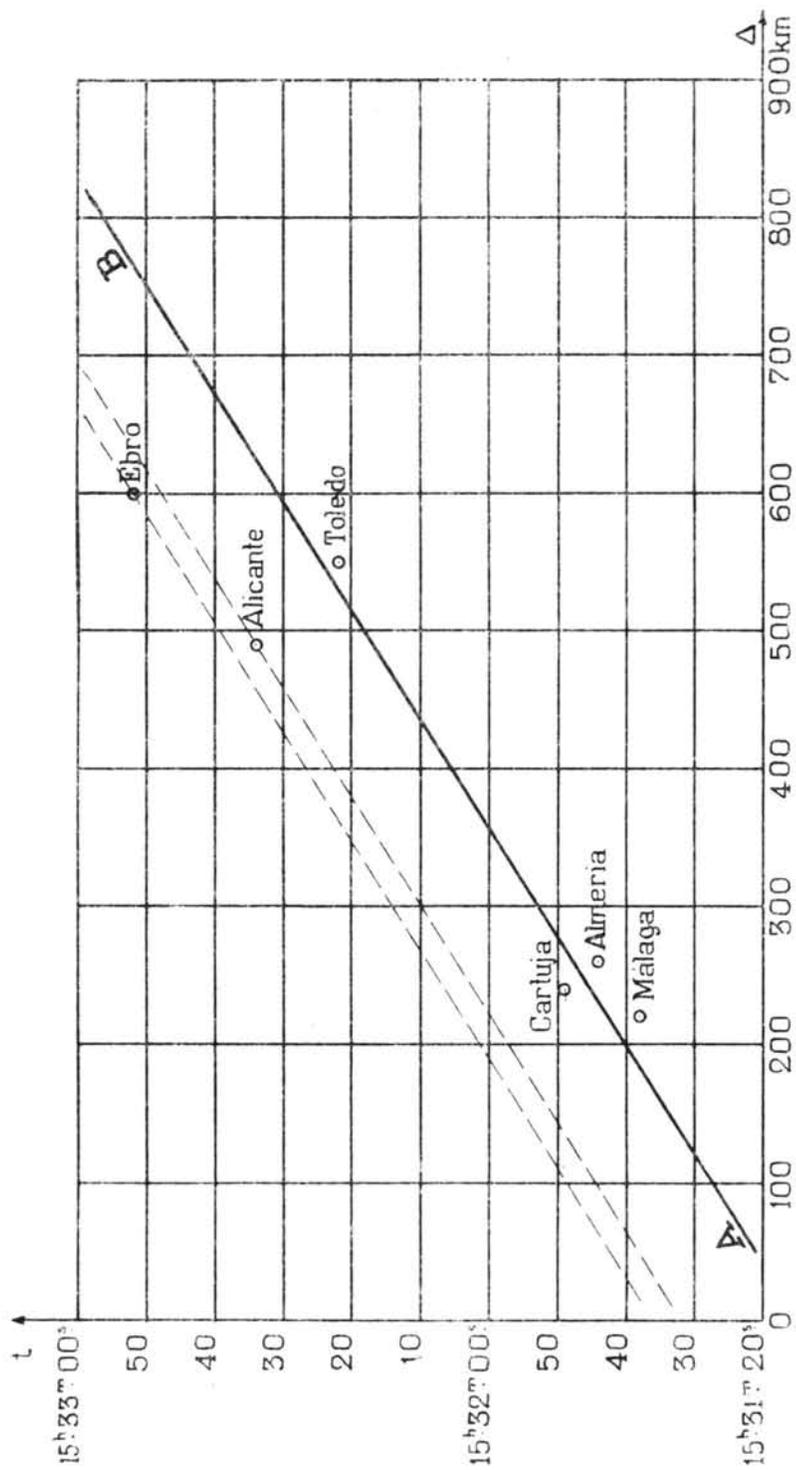


Figura 2.\*—Dromocrónica correspondiente a los datos facilitados por las Estaciones sismológicas y publicados en Iberica

Si se aceptan estos valores y las horas de P que figuran en el cuadro (1), para el trazado de la dromocrónica, se obtiene la figura 3, en la que se advierte desde luego que la hora de P de Alicante es inadmisibile, pues muestra un retraso de unos 20 segundos. La recta AB, trazada como dromocrónica en virtud de la posición de las Estaciones, pasa por las de Almería y Toledo y a la inmediateción de la de Málaga. Las de Cartuja y Ebro acusan un retraso de cuatro y cinco segundos, respectivamente, y la de San Fernando un adelanto de cinco.

Por último, si partiendo de las coordenadas del epicentro:

Latitud: 35° 5                      y                      Longitud: 4° 2. W. Greenwich. (3)  
 que se dan en el boletín de Cartuja, se calculan las distancias epicentrales que corresponden a las Estaciones españolas, se hallan los valores siguientes:

	Kms.	
Málaga.....	137	}
Almería.....	216	
Cartuja.....	194	
San Fernando.....	209	
Alicante.....	453	
Toledo.....	483	
Ebro.....	711	

que, utilizados para el trazado de la dromocrónica dan la figura 4, en la que se obtiene una recta AB, que pasa por las Estaciones de Málaga y Toledo, y discrepa de las de Almería, Cartuja, San Fernando y Ebro, en cantidades que varían de uno a cinco segundos. La de Alicante muestra un retraso inadmisibile de 16 segundos.

Se habrá advertido que no hemos considerado en el trazado de la dromocrónica de las ondas P la Estación de Barcelona, pues la hora comunicada por este Observatorio, con la indicación de que se trata de una emersión, tiene un retraso de dos minutos con relación a las demás, y no puede, por lo tanto, utilizarse.

Otro intento de trazado de la dromocrónica puede hacerse suponiendo que el epicentro está en Melilla, ya que en esta población se sintió el sismo con el grado VI-VII; las distancias epicentrales en este caso son:

	Kms.	
Málaga.....	207	}
Almería.....	178	
Cartuja.....	217	
San Fernando.....	320	
Alicante.....	3°9	
Toledo.....	515	
Ebro.....	676	

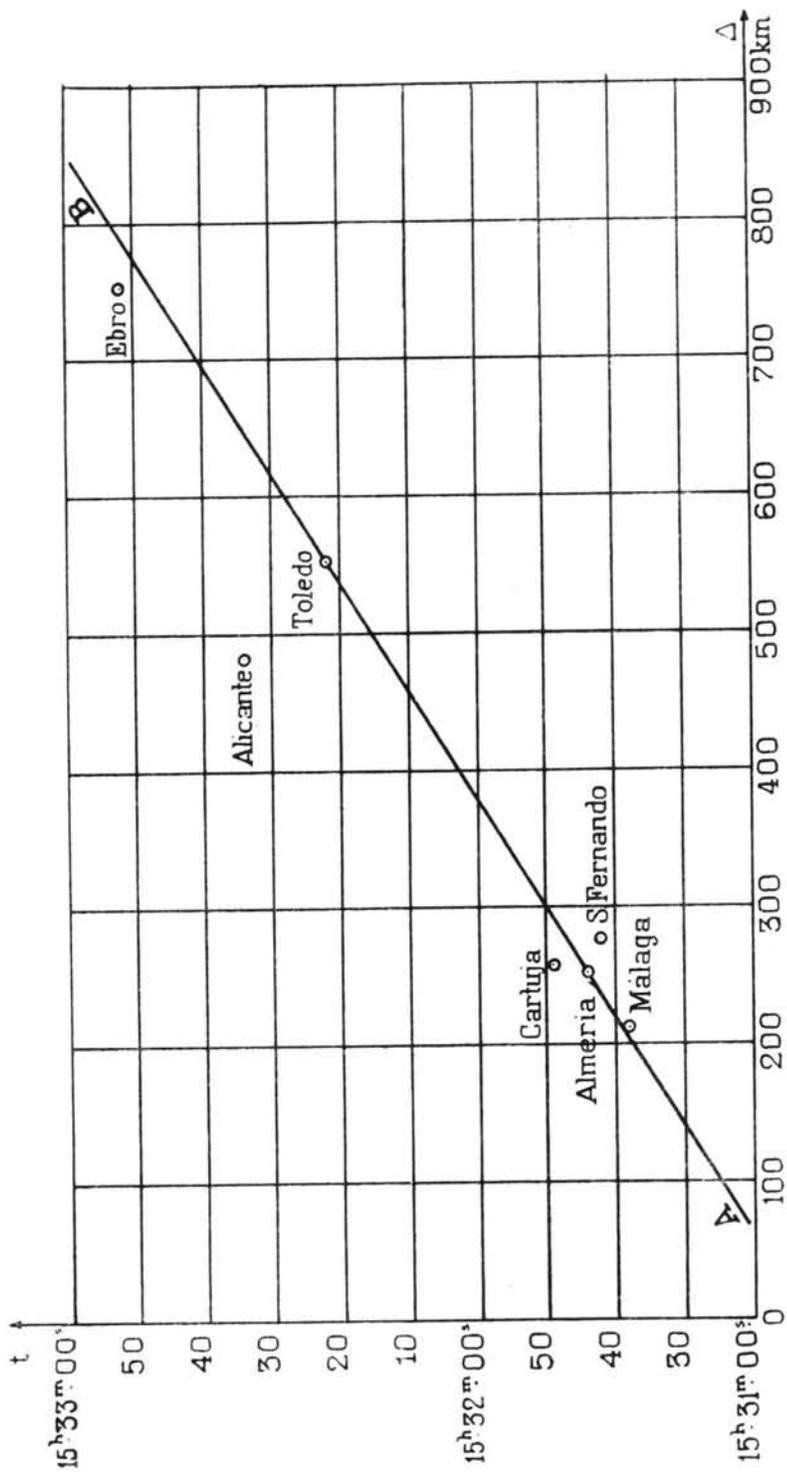


Fig. 3.<sup>a</sup> — Dromocrónica correspondiente al epicentro de Rey Pastor.

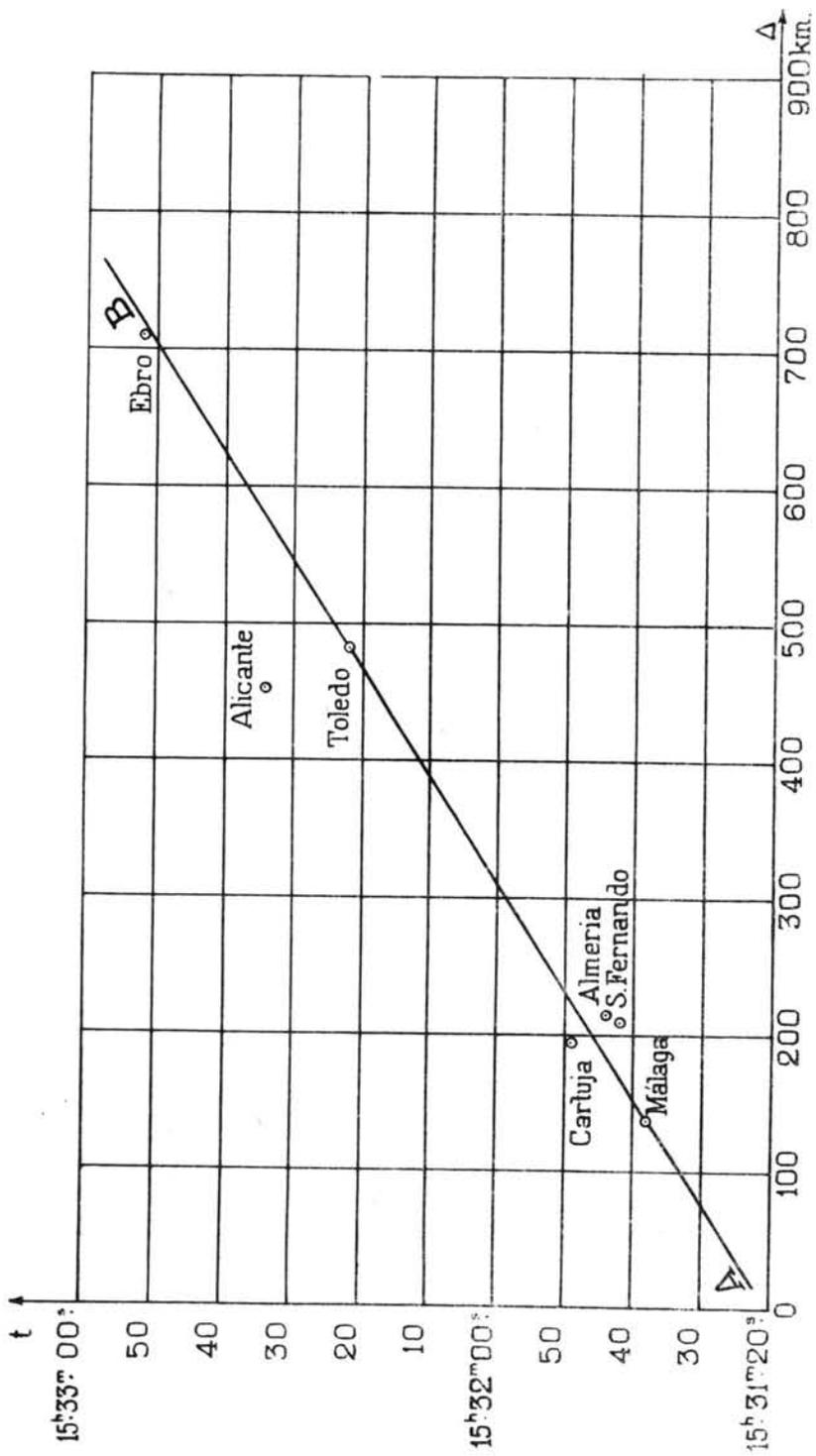


Fig. 4.\*—Dromocrónica correspondiente al epicentro del P. Sánchez Navarro

La posición de los puntos (fig. 5), que corresponde a esta hipótesis, admitiendo como siempre las horas de P que figuran en el cuadro (1), no muestra ventajas con relación a los demás epicentros, sino muy al contrario. El hecho de hallarse la Estación de Almería más próxima a Melilla que la de Málaga y San Fernando, está en contradicción con las horas facilitadas por los Observatorios españoles, ya que Almería da el principio seis segundos después que Málaga y dos después que San Fernando. El retraso con que en la figura 5 aparecen las Estaciones de Alicante y Ebro se acusa aún más decidido que en las figuras 2, 3 y 4, pues llega a ser para la primera nada menos que de 26 segundos, y para Ebro, de 10. La dromocrónica AB pasa por el punto que corresponde a Toledo y discrepa de cuatro a seis segundos de los de Málaga, Almería y Cartuja; el adelanto de 16 segundos, que corresponde a San Fernando, es de todo punto inadmisibles.

Vemos, pues, que la hipótesis de estar el epicentro en Melilla no puede adaptarse a las horas registradas por las Estaciones sísmológicas, y es la menos probable de todas las que hemos hecho hasta ahora respecto a la posición de tan importante punto.

Del tanteo que acaba de hacerse para juzgar del grado de precisión de las horas de P registradas en las Estaciones españolas, dedúcense algunas consecuencias interesantes. Es la primera de ellas que la hora comunicada por Alicante tiene un retraso considerable, mayor que 10 segundos, que la hace inadmisibles. La del Ebro, muestra también un retraso, no tan acusado, como la anterior y dada la gran distancia epicentral, puede atribuirse a que la fase inicial se registra con pequenísimas amplitud, lo que hace muy incierto el impulso inicial del sismograma. Será, pues, prudente prescindir también de esta Estación, si se quieren calcular con gran precisión las coordenadas del epicentro. Prescindiendo de la figura 2, que corresponde a unos valores muy erróneos de las distancias epicentrales (1), se advierte que la dromocrónica AB que hemos trazado pasa siempre por la Estación de Toledo; la hora facilitada por esta Estación se puede, pues, admitir con garantía de éxito. En todas las dromocrónicas (figuras 2, 3, 4 y 5), la hora correspondiente a Cartuja es 15 h. 31 m. 45 s.; ya veremos en el capítulo siguiente que ésta es efectivamente la inicial del sismograma registrado por la componente N-S del péndulo Berchmans, que funciona en dicha Estación, y en que el impulso inicial se manifiesta por un ímpetu clarísimo, que no deja lugar a duda.

Prescindiendo de la dromocrónica correspondiente al epicentro

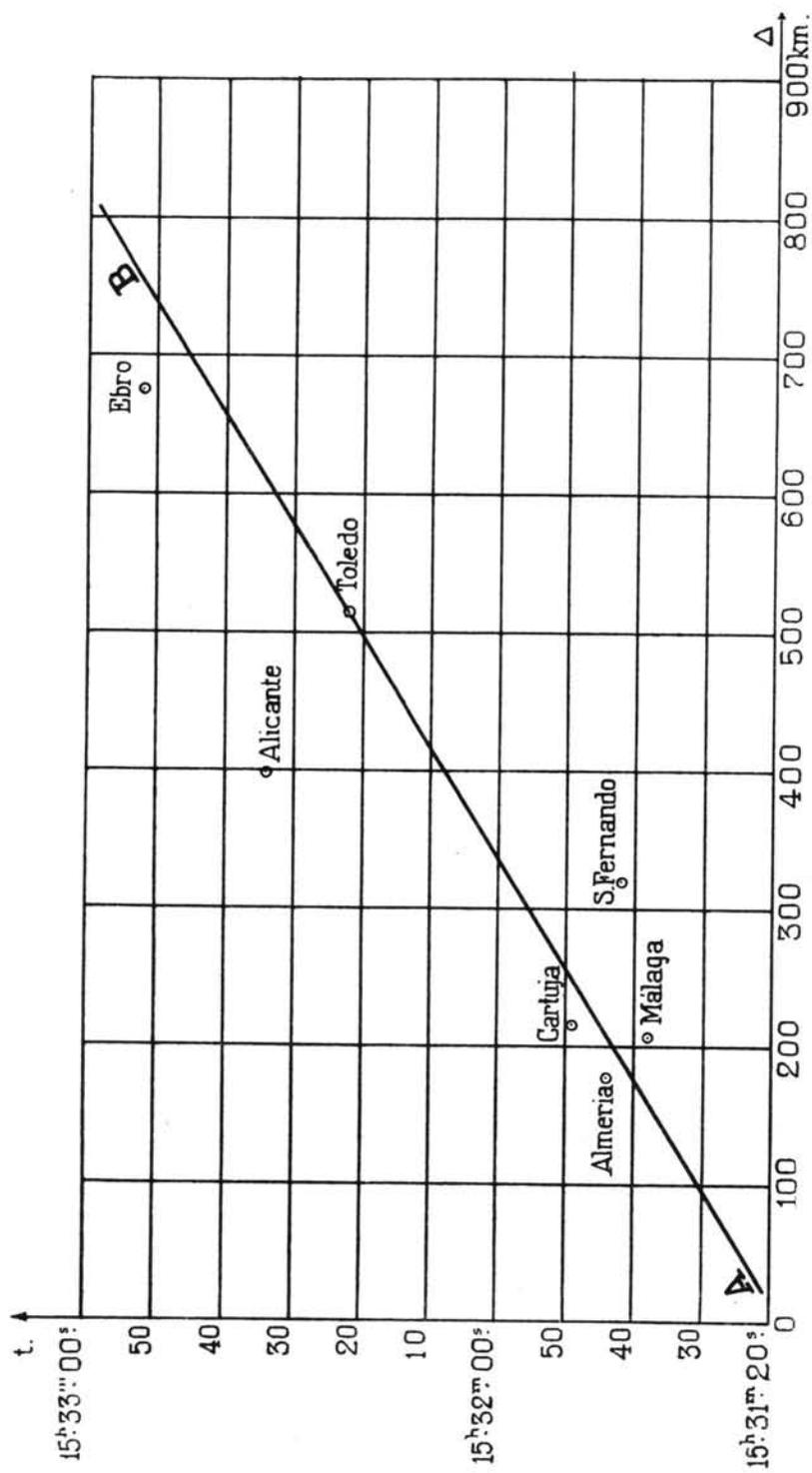


Fig. 5.<sup>a</sup>—Dromocronica en el supuesto de estar el epicentro en Melilla.

situado en Melilla, que da una discrepancia inadmisibile, la hora de San Fernando muestra en aquélla, siempre, un adelanto, que es, por término medio, de cuatro o cinco segundos.

Por último, las horas de Málaga y Almería muestran pequeñas discrepancias, pues, prescindiendo de las figuras 2 y 5, que corresponden a las hipótesis menos probables, el punto de la Estación de Málaga está situado en la dromocrónica de la figura 4, y discrepa un segundo de la de la figura 3, y en cuanto al de Almería, coincide con la dromocrónica de la figura 3 y muestra un adelanto de cuatro segundos con relación a la de la figura 4.

Puesto que hay que prescindir de la Estación de Alicante, y la del Ebro, por su gran distancia epicentral e incertidumbre en el impulso inicial, no es prudente utilizarla, resultan en total cinco datos de observación, que son los de los Observatorios de Málaga, Almería, Cartuja, San Fernando y Toledo.

Si se tiene en cuenta que es cuatro el mínimo de Estaciones registradoras para poder calcular por las horas de P las coordenadas epicentrales, y que las observaciones de que disponemos en este sismo pueden tener errores de tres o cuatro segundos, se comprenderá la dificultad extrema de obtener una posición precisa del epicentro, valiéndose de datos que tienen dos o tres segundos de error por término medio, y no olvidando que la velocidad aparente de las ondas P es, como hemos dicho, de unos ocho kilómetros por segundo.

Estas consideraciones aconsejan un análisis detenido de las gráficas registradas en las diversas Estaciones, con el objeto de llegar a una obtención segura de las horas iniciales de los sismogramas, que, por lo menos, no tengan errores superiores a un segundo.

Ese estudio, con la reproducción de las principales gráficas, algunas de ellas ampliadas, se hará en el capítulo II, pero antes de pasar a él, creemos interesante dar cuenta de algunos cálculos de tanteo que habíamos hecho en un principio, cuando sólo disponíamos de las gráficas registradas en Toledo y Cartuja y esperábamos recibir las de los Observatorios restantes, porque de ellos se deducen algunas consecuencias que pueden ser de utilidad, cuando no se disponga más que de las gráficas registradas en dos o tres Estaciones, caso que es muy frecuente en la práctica.

La reproducción, ampliada fotográficamente seis veces, de las preciosas gráficas registradas por el péndulo bifilar, de 340 kilogramos de masa, que funcionaba en la Estación de Cartuja, nos

hizo evaluar el principio del sismograma en la componente E-W, a las 15 h. 31 m. 49 s., hora que coincide exactamente con la inserta en el boletín de dicha Estación y comunicada a la revista "Ibérica" (cuadro I), pero en la componente N-S, el impulso inicial corresponde a las 15 h. 31 m. 46 s., como puede verse en la reproducción amplificada de la gráfica que damos más adelante. Esta diferencia de las dos horas registradas por ambas componentes, se explica en este caso porque, dada la posición del foco, que obtendremos en el capítulo II, el movimiento sísmico llega a Cartuja en dirección casi de S a N, de modo que la componente meridiana recibe un impulso de mayor amplitud, que se hace perceptible antes en la gráfica. Como este hecho de registrarse los principios de un sismograma por las dos componentes de un mismo péndulo con unos segundos de diferencia, es muy frecuente, tratándose de aparatos de no gran sensibilidad para las ondas P, y es criterio general tomar como hora de la fase la más adelantada de las que se registren, pues es evidente que la percepción del impulso en la componente que lo registra primero, es indicio indudable de la llegada del movimiento sísmico, tomaremos, pues, en el sismo que estamos estudiando como hora de P registrada en Cartuja, la de 15 h. 31 m. 46 s., leída en la componente N-S. Esta observación está de acuerdo con lo que hemos dicho al tratar de las dromocrónicas de las figuras 2, 3, 4 y 5. Si bien es cierto, que las rectas trazadas en dichas figuras muestran que la hora de Cartuja es 15 h. 31 m. 45 s., el error es sólo de un segundo, y para hacerlo desaparecer será necesario recurrir al sismograma registrado por la componente N-S del péndulo Berchmanns, que, a causa de una mayor sensibilidad, especialmente para el registro de las ondas preliminares, muestra el impulso inicial en forma de ímpetu clarísimo a las 15 h. 31 m. 45 s. Esta preciosa gráfica del Berchmanns nos fué facilitada posteriormente por el ilustre sismólogo Rvdo. P. Manuel María Sánchez-Navarro Neumann, S. J., y en un principio no disponíamos de ella, por lo cual adoptamos como hora de P la de 15 h. 31 m. 46 s.

En cuanto a Toledo, la gráfica, que reproducimos más adelante, registrada por la componente N-S del péndulo astático Wiechert reformado, que funciona en dicha Estación, muestra claramente el principio del sismograma a las 15 h. 32 m. 22 s., salvo algún error en el estado del reloj, único que puede haber, ya que no hay paralaje en la pluma inscriptora, error cronométrico, que no es probable exista, ya que la determinación de hora se hace en Toledo muy frecuentemente y con gran precisión.

Descartadas, por las razones dichas, las Estaciones de Alicante y Ebro, había que utilizar las de Málaga, Almería, Cartuja, San Fernando y Toledo, con las horas de P insertas en "Ibérica" (cuadro I), salvo la de Cartuja, que, como hemos dicho, era la de 15 h. 31 m. 46 s.

Aunque en otro trabajo (1), hemos expuesto detalladamente la marcha del cálculo de las coordenadas epicentrales en función de las horas de las ondas P, registradas en varias Estaciones próximas, indicaremos aquí rápidamente la manera de obtener las ecuaciones de condición, que por el método de los mínimos cuadrados han de dar los valores más probables de dichas coordenadas, si, como suponemos, son más de cuatro las Estaciones registradoras.

Dada la pequeña distancia, de algunos cientos de kilómetros, a que se hallan las Estaciones registradoras, no hay inconveniente alguno en suponer plana la región en que están enclavadas, y eligiendo por ejes coordenados las proyecciones sobre el geoide de un cierto paralelo y meridiano, que ocupen una posición central, las Estaciones sismológicas  $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$ , de cuyos datos de observación disponemos y suponemos en orden creciente de distancia epicentral, se podrán determinar por sus coordenadas rectangulares  $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), (x_3, y_3, z_3), \dots, (x_n, y_n, z_n)$ , que suponemos conocidas y de las cuales las  $z$  no son más que las altitudes ordinarias.

Si designamos ahora por  $x_0, y_0$  las coordenadas incógnitas del epicentro, por  $t_0$  la hora epicentral del sismo, también desconocida, y por  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$  las horas de P registradas en las Estaciones  $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$ , que son los datos de observación, la ley de propagación aparente de las ondas P por la superficie terrestre, con la velocidad constante de ocho kilómetros por segundo, nos permitirá escribir las siguientes ecuaciones:

$$\left. \begin{aligned} (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 &= 64 (t_1 - t_0)^2 \\ (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 &= 64 (t_2 - t_0)^2 \\ (x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2 &= 64 (t_3 - t_0)^2 \\ \dots\dots\dots \\ (x_n - x_0)^2 + (y_n - y_0)^2 &= 64 (t_n - t_0)^2 \end{aligned} \right\} (6).$$

en que las coordenadas se exponen expresadas en kilómetros y las horas de P en segundos.

Para pasar de este sistema de ecuaciones a otro lineal equi-



CUADRO II

Coordenadas geográficas y rectangulares de las Estaciones sismológicas españolas y horas a que se registraron en ellas las ondas P del sismo de Melilla de 9 de julio de 1923 (Ejes de coordenadas: las proyecciones del paralelo de 38° latitud N y meridiano de 4° longitud W. Gr.).

ESTACIÓN	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		COORDENADAS RECTANGULARES			Horas de P
	Latitud N	Longitud W Gr.	X kms.	Y kms.	Z metros	
Málaga.....	36° - 43' - 39"	4° - 24' - 40"	- 37	- 141	60	15 h. 31 m. 38 s.
San Fernando..	36° - 27' - 42"	6° - 12' - 19",5	- 198	- 171	28	- 42
Almería.....	36° - 51' - 9",07	2° - 27' - 35",18	+ 137	- 127	65	- 44
Cartuja.....	37° - 10' - 47"	3° - 36' - 13"	+ 36	91	768	- 46
Alicante.....	38° - 20' - 44"	0° - 28' - 59"	+ 307	+ 38	35	"      "
Toledo.....	39° - 51' - 38",5	4° - 1' - 4",01	- 2	+ 206	519	15 h. 32 m. 22 s.
Ebro.....	40° - 49' - 14"	0° - 29' - 58"E	+ 373	+ 313	39	"      "

Si partiendo de los datos contenidos en el cuadro precedente, se forma el sistema de ecuaciones (9), se halla en este caso:

$$\left. \begin{aligned}
 \text{Málaga-San Fernando} & \dots\dots 161 x_0 + 30 y_0 - 256 \tau = - 23085,5 \\
 \text{San Fernando-Almería} & \dots\dots 355 x_0 + 44 y_0 + 128 \tau = - 17413,5 \\
 \text{Almería-Cartuja} & \dots\dots\dots 101 x_0 - 36 y_0 - 128 \tau = 13556,5 \\
 \text{Cartuja-Toledo} & \dots\dots\dots 38 x_0 - 297 y_0 - 2304 \tau = 43472,5
 \end{aligned} \right\} (10).$$

cuya resolución, por el método de los mínimos cuadrados, da los valores más probables de las incógnitas:

$$x_0 = - 28,793 \text{ km.} \quad y_0 = - 459,13 \text{ km.} \quad \tau = 40,113 \text{ s.} \quad (11)$$

o expresando en kilómetros redondos las coordenadas del epicentro, ya que los datos de observación no permiten mayor grado de aproximación:

$$x_0 = - 29 \text{ km.} \quad y_0 = - 459 \text{ km.} \quad (12).$$

La posición de este epicentro corresponde a un punto situado en Marruecos, en los Montes Riata, a unos 60 kilómetros al SE de Fez.

Si se calculan las distancias epicentrales que corresponden a este punto, se hallan los valores siguientes:

	<u>Kms.</u>	
Málaga.....	318	
Almería.....	371	
Cartuja.....	374	(13).
San Fernando.....	334	
Alicante.....	600	
Toledo.....	666	
Ebro .....	873	

Si, con arreglo a estos valores y los de las horas de P del cuadro I, excepto la de Cartuja, que es 15 h. 31 m. 46 s., se construye la dromocrónica de las ondas P, se obtiene la figura 6, en que se advierte desde luego que las Estaciones del Ebro y Alicante muestran, como siempre, retrasos que en este caso son de 4 y 20 segundos, respectivamente, pero las demás se ajustan muy bien al trazado, pues la discrepancia máxima apenas excede de un segundo.

La posición del epicentro de coordenadas (12), es sumamente improbable, pues, hallándose éste a unos 200 kilómetros de Melilla y habiéndose sentido en esta ciudad el sismo con el grado VI-VII, es indudable que en Fez, que dista unos 60 kilómetros de dicho punto, se hubiera percibido aún con mucha mayor fuerza, cuando no hay datos de que se haya sentido en dicha población.

Por otra parte, las distancias epicentrales (13), que acabamos de calcular son mucho mayores que las del cuadro I, inserto en "Ibérica", y que hemos reputado excesivas.

Este desfavorable resultado del cálculo de las coordenadas del epicentro, por medio de las horas de P de las Estaciones de Málaga, Almería, Cartuja, San Fernando y Toledo, que figuran en el cuadro II, muestra que los datos de observación tienen errores de dos a tres o más segundos, que hacen imposible la obtención exacta del epicentro.

Como para decidir cuáles puedan ser los errores de las horas de P, facilitadas por las Estaciones de Málaga, Almería y San Fernando, ya que las de Cartuja y Toledo son bastante aproximadas, no disponíamos en un principio más que de las gráficas registradas en estas dos últimas, tuvimos que recurrir a ellas para obtener una posición aproximada del epicentro.

En las gráficas del péndulo bifilar de Cartuja, de 320 kilogramos de masa, el intervalo entre las ondas P y S es de 23 segundos,

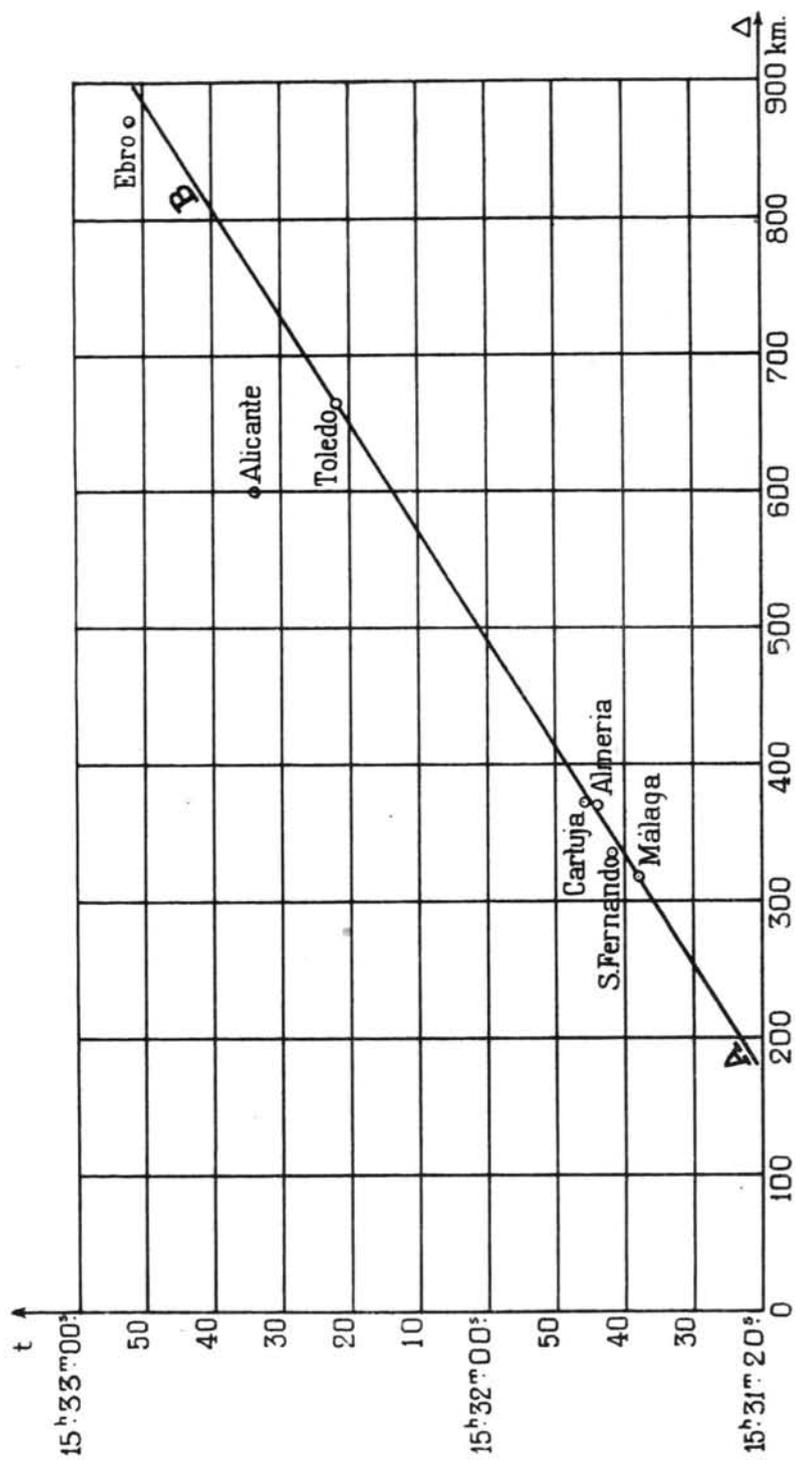


Fig. 6.ª.—Dromocronica correspondiente al epicentro:  $t_0 = -20$ ,  $y_0 = -459$  km.

lo que, según las tablas de A. Mohorovičić, para la profundidad hipocentral media de 25 kilómetros, corresponde a una distancia epicentral de 180 kilómetros en números redondos. En cuanto a la gráfica de la componente N-S del péndulo Wiechert, de Toledo, el

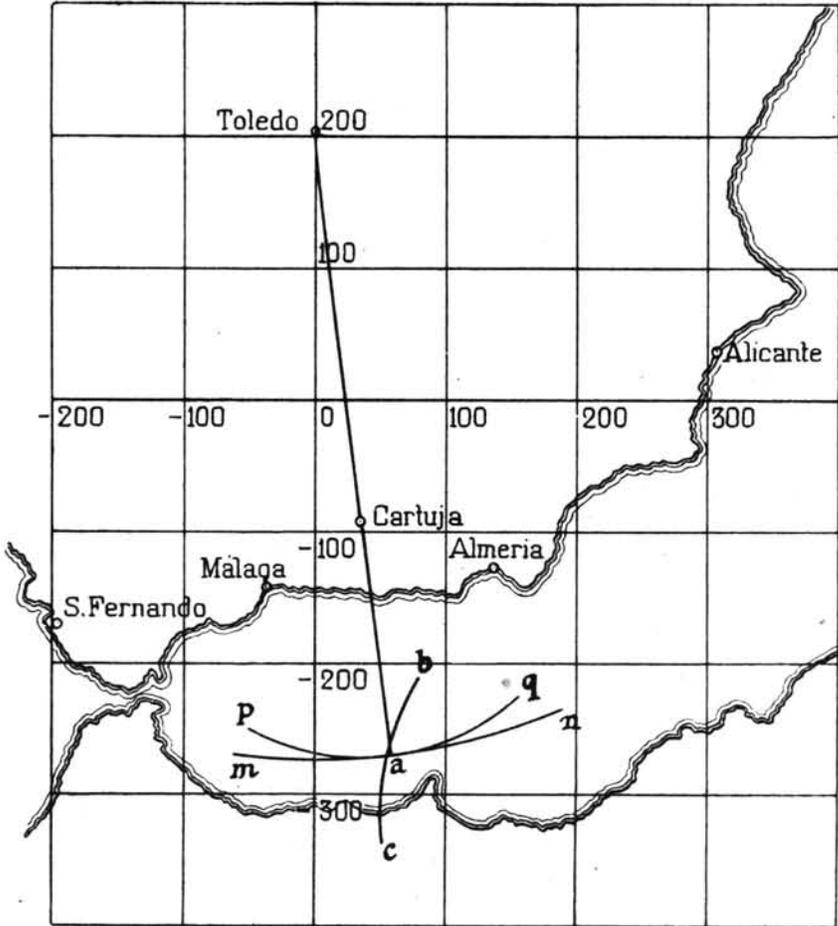


Fig. 7.<sup>a</sup>—Obtención gráfica del epicentro por medio de sus distancias a Cartuja y Toledo.

señor Rey Pastor evalúa en 1 m. 15 s. el intervalo entre las ondas P y las que él llama  $iL$ , y que son las  $S$ . A este intervalo, según las tablas de A. Mohorovičić, para la misma profundidad focal de 25 kilómetros, corresponde una distancia epicentral de unos 483 kilómetros, que vamos a tomar en números redondos de 480. Trazando desde Cartuja y Toledo como centros dos arcos de círculo  $pq$  y  $mn$

cuyos radios, en la escala elegida, sean respectivamente de 180 y 480 kilómetros, éstos nos darán por intersección una posición aproximada del epicentro (fig. 7). En el presente caso, como la distancia entre Toledo y Cartuja es sensiblemente de 300 kilómetros, e igual, por tanto, a la diferencia de dichos radios, los arcos de círculo serán tangentes interiormente, de modo que para obtener el epicentro bastará tomar sobre la prolongación de la recta que una ambas Estaciones una distancia igual a la epicentral de Cartuja, que es, como hemos dicho, de 180 kilómetros. Este punto *a* de contacto de los dos arcos *mn* y *pq*, se ajusta a la hora registrada en Almería, 15 h. 31 m. 44 s., pues, difiriendo ésta en dos segundos de la de Cartuja, el epicentro debe distar  $8 \times 2 = 16$  kilómetros menos de Almería que de Cartuja, es decir, que debe pertenecer *a* un arco de hipérbola *bc*, que tenga por focos los dos puntos que representan dichas Estaciones y por eje transversal el segmento que en la escala elegida mida los 16 kilómetros.

En la figura 7, en que se ha hecho la construcción expuesta, se advierte que los tres arcos se cortan sensiblemente en un mismo punto, que tiene por coordenadas aproximadas:

$$x_0 = + 55 \text{ km.} \qquad y_0 = - 270 \text{ km.} \qquad (14).$$

Midiendo las distancias que corresponden a las Estaciones españolas, se hallan los valores siguientes:

	Kms.	
Málaga.....	157	
Almería.....	165	
Cartuja.....	180	(15)
San Fernando.....	267	
Alicante.....	395	
Toledo.....	480	
Ebro.....	665	

Claro está que la posición del epicentro que acabamos de obtener por simple construcción gráfica es sólo aproximada, y puede tener una incertidumbre de unos 10 a 12 kilómetros, y lo mismo podemos decir de las distancias epicentrales (15), pero esta aproximación es suficiente para juzgar de los adelantos o retrasos de las horas de P que figuran en el cuadro I.

En efecto, conocidas las distancias epicentrales de las distintas Estaciones y teniendo en cuenta la velocidad de ocho kilómetros por segundo, con que se propagan las ondas P, es fácil obtener por divisiones muy sencillas las diferencias entre las horas

de P que corresponden al epicentro de coordenadas aproximadas (14). Conocido el intervalo de llegada de las ondas P a las distintas Estaciones, basta conocer la hora registrada en una de ellas para obtener las de las demás. En el presente caso, por ofrecernos más garantía de acierto, partiremos de la hora 15 h. 31 m. 46 s., correspondiente a Cartuja, y, efectuando el sencillísimo cálculo de dichos intervalos, se obtienen las siguientes horas de P, que corresponden al epicentro (14):

Málaga.....	15 h. 31 m. 43,1 s.	
Almería.....	44,1	
Cartuja.....	46	
San Fernando... .	56,9	(16)
Alicante.....	15 h. 32 m. 12,9 s.	
Toledo.....	23,5	
Ebro.....	46,6	

Comparando estas cifras con las del cuadro I se advierte que la Estación de Alicante muestra un retraso de 21,1 segundos, discrepancia que ha resultado también en todas las dromocrónicas y que nos ha obligado a prescindir de ella. La del Ebro acusa un retraso mucho menor, pues es sólo de 5,4 segundos, lo que está también de acuerdo con la discrepancia que han mostrado las figuras 2, 3, 4 y 5, y que oscilaba alrededor de cinco segundos. La hora de Almería coincide casi con la registrada, pues sólo difieren en una décima de segundo. La de Toledo difiere en segundo y medio. La registrada por San Fernando muestra un adelanto de 14,9 segundos, y ésta es la causa principal, a nuestro juicio, de la poca aproximación del epicentro calculado (11). Por último, la hora registrada en Málaga manifiesta un adelanto de 5,1 segundos.

Estos resultados nos decidieron a examinar una por una las gráficas registradas en las distintas Estaciones, amplificándolas en caso necesario, para poder deducir con la mayor exactitud posible el principio del sismograma.

Con este motivo nos dirigimos a los jefes de las Estaciones sismológicas, rogándoles el envío de los sismogramas originales o de reproducciones fotográficas. Damos aquí las más expresivas gracias a todos por su bondad en facilitarnos tan valiosas gráficas.

Recibimos inmediatamente la gráfica de Málaga, que nos permitió obtener como hora de P la 15 h. 31 m. 42 s., retrasada cuatro segundos respecto a la facilitada en un principio por dicho Observatorio.

La preciosa gráfica de la componente N-S del Berchmanns, de

Cartuja, nos permitió evaluar la hora de P, por un ímpetu clarísimo, en 15 h. 31 m. 45 s., lo que hacía disminuir en un segundo todas las horas del cuadro (16), y, por lo tanto, que coincidieran las de Toledo y Málaga con las que habíamos calculado.

Las gráficas de Almería no llegaron a nuestro poder, a pesar de haberlo solicitado varias veces, y, por último, las de Alicante y San Fernando, que eran de un interés extraordinario, para dilucidar si era cierta nuestra presunción del gran adelanto y retraso que respectivamente marcan sus horas de P con relación a la del cuadro (16), tardaron cerca de un mes, y mientras tanto, efectuando numerosos cálculos, que creemos inútil reproducir o exponer en resumen, llegamos a la conclusión de que las horas de P en el sismo de 9 de julio de 1923 debían de ser las siguientes:

Málaga.....	15 h. 31 m. 42 s.	(segura por haberse deducido de su gráfica).
Almería.....	44 s.	(la dada por ella).
Cartuja.....	45 s.	(segura por el examen de su gráfica).
San Fernando...	55 s.	(dudosa por carecer de su gráfica y ser muy distinta de la registrada). (17)
Alicante.....	15 h. 32 m. 13 s.	(dudosa por carecer de su gráfica y ser muy distinta de la registrada).
Toledo.....	22 s.	(segura y coincidente con la dada por esta Estación).

Para confirmar este cálculo o reconstitución de las horas de P, faltaba examinar las gráficas de las Estaciones de Alicante y San Fernando, pero antes de recibirlas obtuvimos una confirmación sorprendente de nuestro cálculo, pues, habiendo ocurrido el 11 de octubre de 1926 un sismo bastante intenso en Melilla, al que siguieron numerosas réplicas hasta el 22 del mes siguiente, solicitamos de nuestro buen amigo, el sabio director de la revista "Ibérica", Rvdo. P. A. Linari, S. J., nos remitiera los datos que habían de ser publicados en la reseña trimestral de dicha revista, relativos al sismo de Melilla del 11 de octubre de 1926.

A los pocos días el P. A. F. Linari nos remitía, en amable carta, los siguientes datos, facilitados por las respectivas Estaciones sismológicas:

### TERREMOTO DE MELILLA

Día 11 de octubre de 1926

Málaga.....	6 h. 39 m. 16 s.	Distancias: 100 kms.	
Almería.....	18 s.	—	120 —
Cartuja.....	19 s.	—	210 —
San Fernando...	28 s.	—	240 —
Ebro.....	40 m. 21 s.	—	757 —

Los intervalos entre las horas de P que se acaban de transcribir coinciden exactamente con los del cuadro (17), calculados por nosotros para las Estaciones de Málaga, Almería y Cartuja, difieren en un segundo para la de San Fernando, y dan un adelanto de cinco segundos para la hora del Ebro, del sismo de 9 de julio de 1923, resultado que está de acuerdo con la conclusión que habíamos deducido para este Observatorio.

En virtud de estos datos, la sacudida sísmica sentida en Melilla el 11 de octubre de 1926 parece irradiar del mismo foco que la del 9 de julio de 1923.

Este interesante resultado aumentó el interés que había despertado en nosotros el cálculo de las coordenadas epicentrales del sismo de 9 de julio de 1923, y una vez recibidas las gráficas de las Estaciones de Alicante y San Fernando, pudimos efectuar el estudio completo del temblor, tal como se indica en los capítulos siguientes.

## CAPÍTULO II

### Cálculo de las coordenadas del epicentro

Como en el sismo que estamos estudiando la Estación más próxima al foco, que es Málaga, dista más de 150 kilómetros, el cálculo de las coordenadas epicentrales ha de hacerse basándose en las horas de P (1), registradas en los Observatorios españoles, pero antes de proceder a él, vamos a dar algunos pormenores acerca del análisis de las gráficas, que nos ha permitido deducir el valor de tales horas.

Estudiaremos sucesivamente las gráficas de las Estaciones en el orden creciente de distancia epicentral.

#### Estación de Málaga

Hemos dispuesto de los sismogramas registrados en ella y que amablemente nos facilitó nuestro compañero don Juan García de Lomas, director de la Estación sismológica.

Los sismógrafos que funcionaban allí el día 9 de julio de 1923 eran el Vicentini, de tres componentes, y el péndulo horizontal Bosch, de 25 kilogramos de masa. Dada la pequeña amplificación de estos aparatos y la carencia de amortiguamiento, las gráficas no tienen gran valor científico y la determinación de las fases resulta muy difícil.

En la banda del Vicentini, la componente N-S, única que funcionaba de las dos horizontales, empieza por un pequeño impulso,

cuyo punto preciso se determina con seguridad, pero la pequeña velocidad del aparato de relojería, que se traduce en la gráfica por una longitud del minuto de 7,5 u 8 milímetros, según se considere el primero o el segundo de los que corresponden a la fase inicial, la paralaje de la pluma, que es de 10,5 milímetros, y la dificultad, por el ahumado de la banda, de referir los puntos del sismograma a los de las señales de minuto, hacen que el principio del movimiento se determine con incertidumbre de dos a tres segundos.

La variación del cronómetro en el día que ocurrió el sismo era de siete segundos en veinticuatro horas.

El principio del sismograma leído con una lente de aumento corresponde en la componente horizontal a las 15 h. 31 m. 42 s. En la vertical resulta aún más difícil la apreciación, dado el pequeño período de esta componente, por lo cual hemos desistido de hacerla.

No se percibe en el principio del sismograma nada que permita hacer distinción entre las ondas P y  $\bar{P}$ , y se advierte un impulso nueve segundos después del punto inicial que pudiera corresponder a las  $R_s\bar{P}$ , aunque resulta muy dudoso asegurar nada. La fase  $\bar{S}$ , parece presentarse unos 18 ó 19 segundos después del impulso inicial.

En cuanto al sismógrafo Bosch, la pluma de la componente N-S no ha marcado desde las 11 h. 21 m. hasta las 20 h. 18 m. del 9 de julio, de modo que el sismo no ha sido registrado. La componente E-W empieza por una emersión que hace sumamente difícil precisar cuál es la hora del principio del sismograma. No hay distinción perceptible que permita saber si se trata de las ondas P o  $\bar{P}$ . En estas condiciones, la determinación de la hora inicial es muy incierta, y valiéndonos de una lenta pudimos evaluarla a las 15 h. 31 m. 41,7 s., por lo cual tomamos en segundos redondos la misma hora del Vicentini.

La fase inicial del sismograma en el Bosch se manifiesta por impulsos pequeñísimos que en la gráfica alcanzan amplitud menor que medio milímetro. El principio de las ondas S queda cubierto por una señal cronográfica de minuto, que la hace determinar con alguna incertidumbre. Hemos evaluado en 19 s. el intervalo entre las primeras ondas, que deben de ser las  $\bar{P}$  y las S. Ninguna otra fase resulta perceptible, y el minuto en esta banda tiene una longitud de 14,5 milímetros. La variación del reloj es la misma que para el Vicentini.

Las figuras 8 y 9 reproducen, ampliadas, las gráficas de la Estación de Málaga, a que se refieren las consideraciones precedentes.

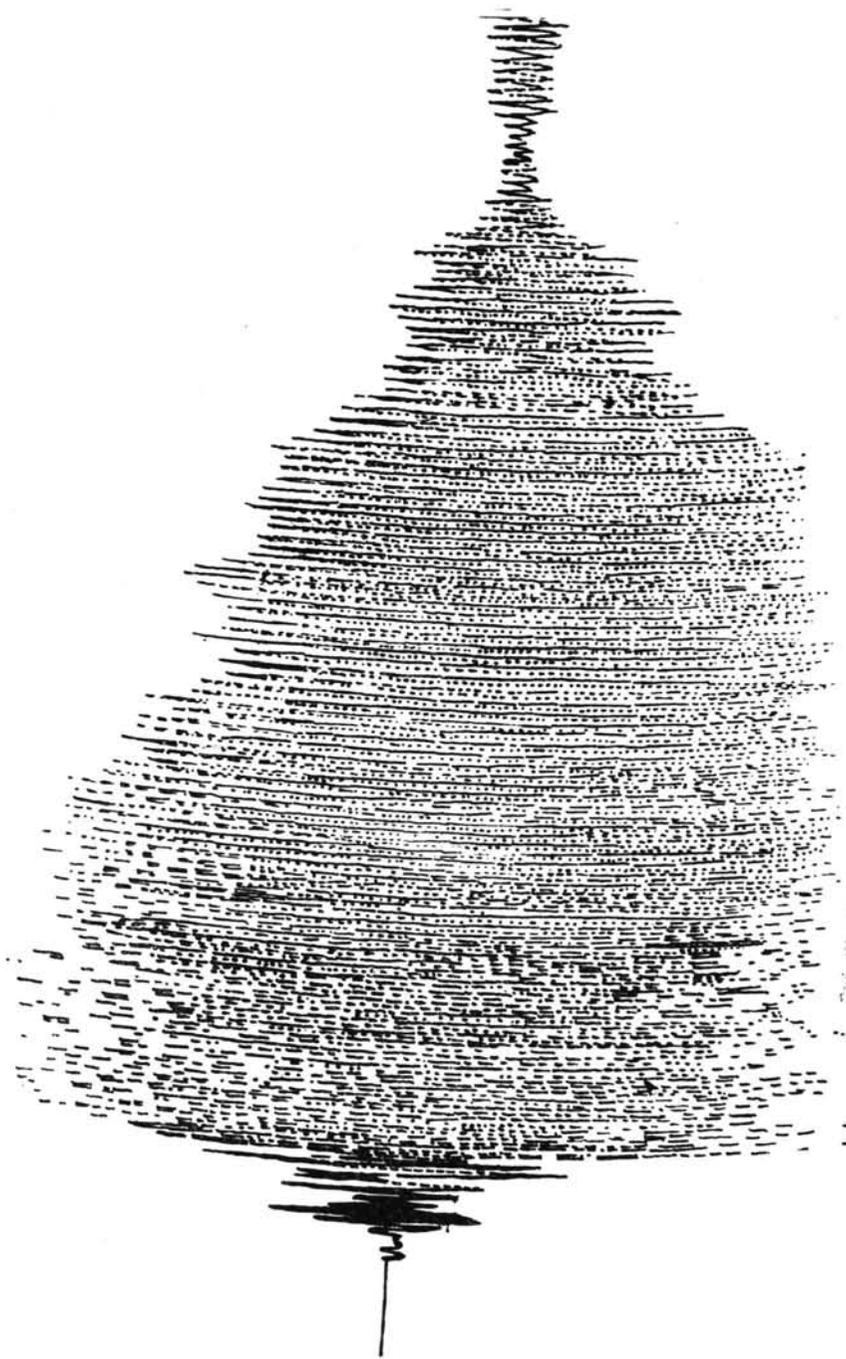


Fig. 8. — Gráfica del sismo registrada por la componente N-S del péndulo Vicentini de la Estación de Málaga



Fig. 9.<sup>a</sup>—Gráfica del sismo registrada por la componente E-W del péndulo horizontal Bosch de la Estación de Málaga.

### Estación de Almería

No hemos podido disponer de las gráficas de esta Estación, que ofrecerán poco más o menos, las condiciones de las de Málaga, ya que en ella funcionaban los mismos tipos de aparatos (Vicentini y Bosch). Por no haber examinado los sismogramas de este Observatorio, tomamos como hora de P la de 15 h. 31 m. 44 s., facilitada por él y publicada, como hemos dicho, en el resumen trimestral de "Ibérica" (3).

### Estación de Cartuja

Debemos a la amabilidad del Rvdo. P. Manuel María Sánchez-Navarro Neumann, S. J., director de dicho Observatorio y eminente sismólogo, la reproducción fotográfica de los preciosos sismogramas registrados por las dos componentes del péndulo bifilar de 340 kilogramos de masa y por la componente N-S del Berchmans, de 3.060.

Las constantes de estos sismógrafos en el momento de ocurrir el sismo, eran las siguientes:

#### Cartuja Bifilar

Masa: 340 kilogramos. Período: 13 segundos. Amplificación: 50. Coeficiente de amortiguamiento:  $\varepsilon : 1 = 4$ . Estado del reloj: — 40 segs.

Estas constantes son las mismas para ambas componentes.

#### Componentes N-S del Berchmans

Masa: 3.060 kilogramos. Período: 2,7 segundos. Amplificación: 700. Coeficiente de amortiguamiento:  $\varepsilon : 1 = 2,6$ . Estado del reloj + 11 s.

Las figuras 10, 11 y 12 reproducen estos preciosos sismogramas, ampliados fotográficamente seis veces los del bifilar Cartuja, y 2,5 el del Berchmans. Como en estas ampliaciones están marcadas las señales de los minutos y no hay corrección de paralaje, el lec-

tor puede perfectamente calcular los principios de los sismogramas, sin más que tener en cuenta la corrección cronométrica, que ya hemos dado.

En la componente E-W del Cartuja bifilar, resulta como hora inicial la de 15 h. 31 m. 49 s.; en la N-S, la de 15 h. 31 m. 46 s., y, por último, en la N-S del Berchmans, aparece clarísimo el principio del movimiento a las 15 h. 31 m. 45 s. Dada la potente amplificación de este sismógrafo, hemos juzgado que la hora inicial estaba en él determinada con mayor precisión que en las componentes del bifilar, y como, además, precede en uno y cuatro segundos, respec-

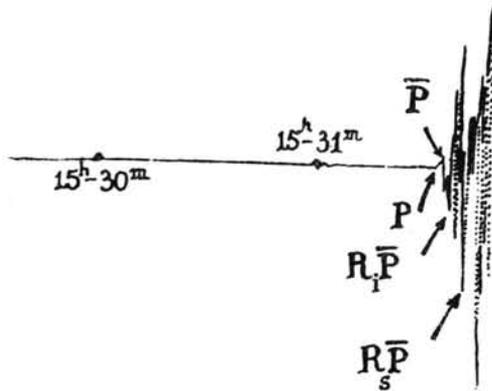


Fig. 10.—Gráfica del sismo registrada en la Estación de Cartuja por la componente N-S del péndulo Berchmans.

tivamente, a las de este último, la hemos adoptado como dato definitivo de observación en Cartuja.

En cuanto a las demás fases de estos sismogramas, en el próximo capítulo, al tratar del cálculo de la profundidad hipocentral, entraremos en detalles acerca de las horas que les corresponden.

### Estación de San Fernando

Nuestro buen amigo y distinguido director del Observatorio Astronómico e Instituto de Marina de San Fernando, don León Herrero, tuvo la extrema amabilidad de facilitarnos todos los sismogramas registrados en la Estación sismológica que funciona en tan reputado centro científico.

La gráfica de la componente N-S del péndulo horizontal Milne (que reproduce la figura 13, cuyas constantes son:

Masa: 1 kilogramo. Período: 2) segundos. Amplificación: 7,

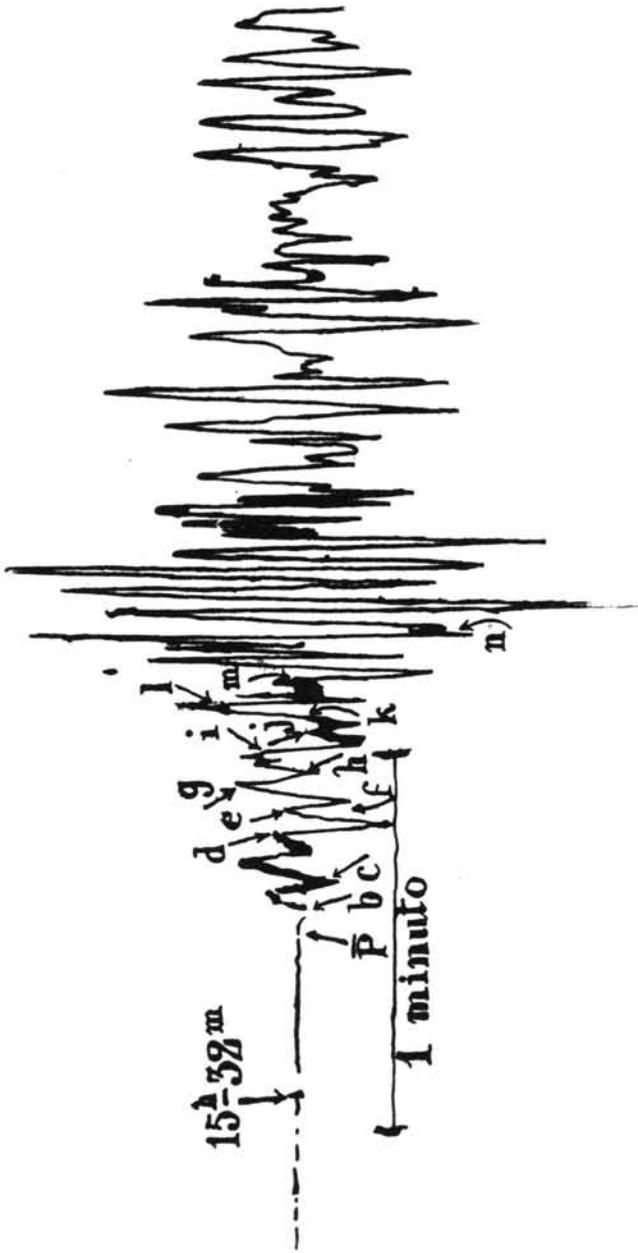


Fig. 11.— Gráfica del sismo registrada por la componente N-S del péndulo biliar Cartuja.

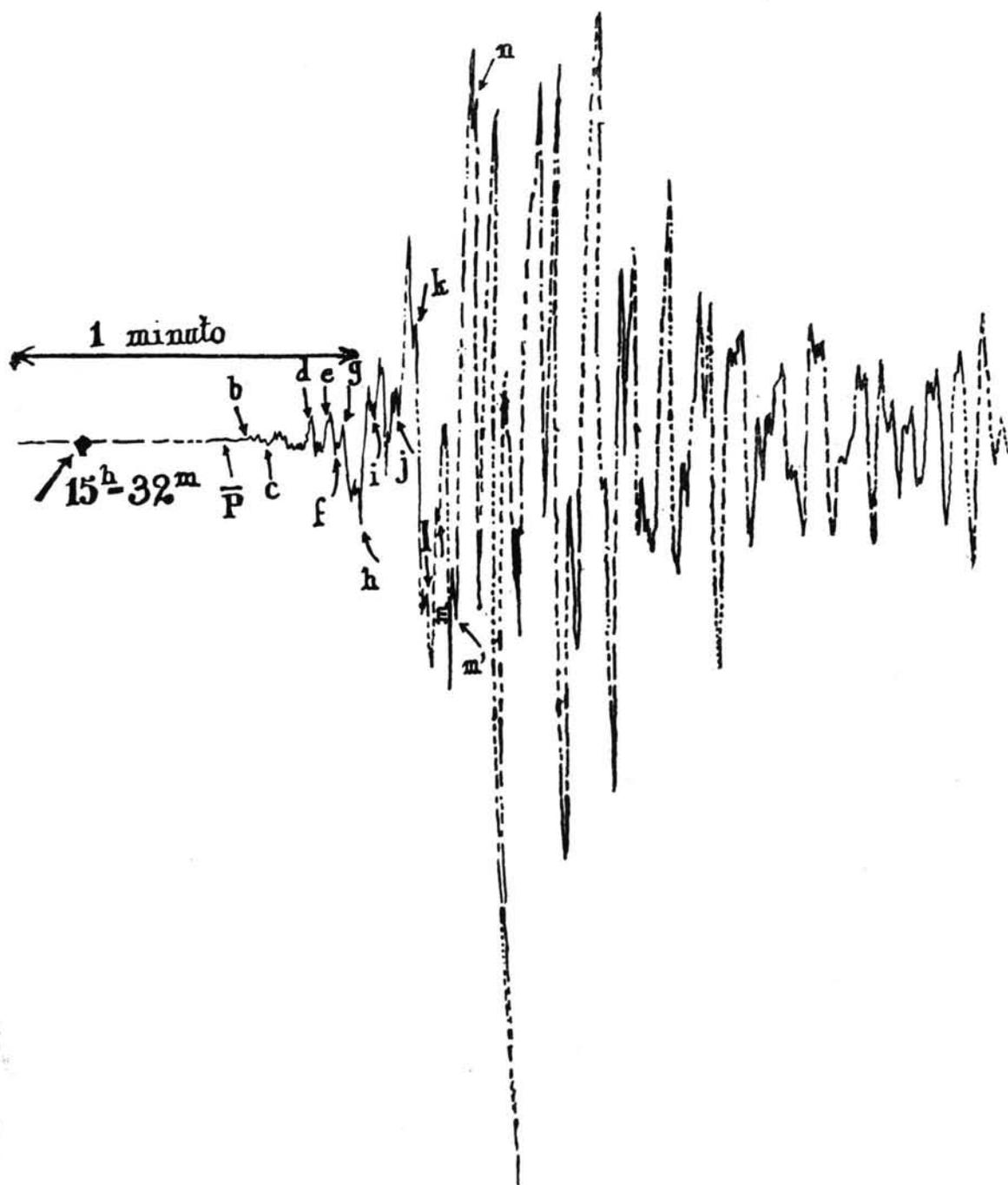


Fig. 12.—Gráfica del sismo registrada por la componente E-W del péndulo bifilar Cartuja.

no puede servir para nuestro estudio, pues dada la pequeñísima velocidad del aparato motor, que se traduce en la gráfica por una longitud de cuatro milímetros para cada minuto y la carencia de amortiguamiento, es imposible distinguir ninguna fase en la insignificante curva que da el registro fotográfico del péndulo Milne.

La gráfica registrada por la componente E-W del péndulo horizontal, cuyas constantes son:

Masa: 60 kilogramos. Período: 24 segundos. Amplificación: 13, presenta los mismos inconvenientes de la precedente; la pequeña sensibilidad del aparato para sismos próximos, ya que su período y amplificación no permiten registrar ampliamente las fases iniciales del movimiento sísmico, y la velocidad del aparato de relojería, también pequeñísima como en el Milne, dificultan extraordinariamente la determinación en segundos de las fases.

Los seis minutos que en la banda preceden al sismograma tienen las longitudes respectivas siguientes: 4,5, 5, 6, 7 y 8,5 milímetros, y este movimiento irregular de rotación de la banda aumenta



Fig. 13.—Gráfica del sismo registrada en la Estación de San Fernando por el péndulo Milne.

la incertidumbre de la determinación. En la gráfica apenas se perciben las ondas longitudinales del sismo, pues con una lente de aumento se advierten pequeñísimas oscilaciones, cuya amplitud es del orden de una vigésima de milímetro, y aun las ondas S son también de amplitud insignificante. El máximo de las ondas principales tiene en la banda una amplitud de unos tres milímetros y, por todas estas razones, hemos renunciado a determinar en este sismograma la hora P, por la poca seguridad que ofrecía tal evaluación.

La banda registrada por la componente N-S, del péndulo horizontal, cuyas constantes son:

Masa, 1100 kilogramos; período, 43,5 segundos; amplificación, 20 inicia el sismograma con unas ondas de amplitud pequeñísima, y además el papel tiene una rasgadura en los minutos 15 h. 32 m. y 15 h. 33 m. del 9 de julio, que dado el estado del reloj de —49 segundos corresponden al principio del movimiento e impiden determinar la hora de P.

La gráfica registrada por la componente N-S, del péndulo horizontal, cuyas componentes son:

Masa, 600 kilogramos; período, 13,2; amplificación, 110, presenta un hermoso sismograma, que reproduce la figura 14, y va a servirnos de base para la determinación de la hora de P correspondiente a la Estación de San Fernando.

El principio del sismograma se manifiesta por una emersión de pequeñísima amplitud (del orden de un cuarto de milímetro); siguen después unas impulsiones algo mayores (en la gráfica de un milímetro), pero la señal cronográfica del minuto perturba algo el trazado de la curva e impide determinar las fases de estos diez primeros segundos. A las 15 h. 32 m. 22 s. se presenta un impulso

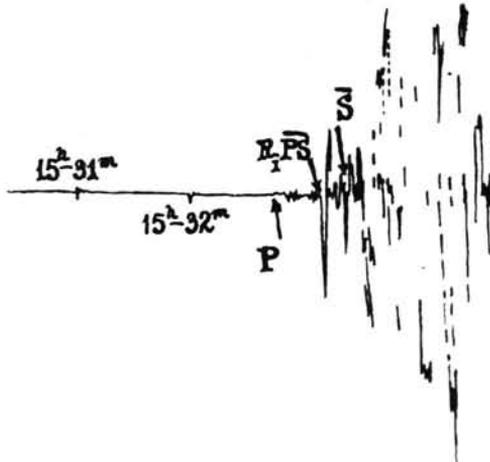
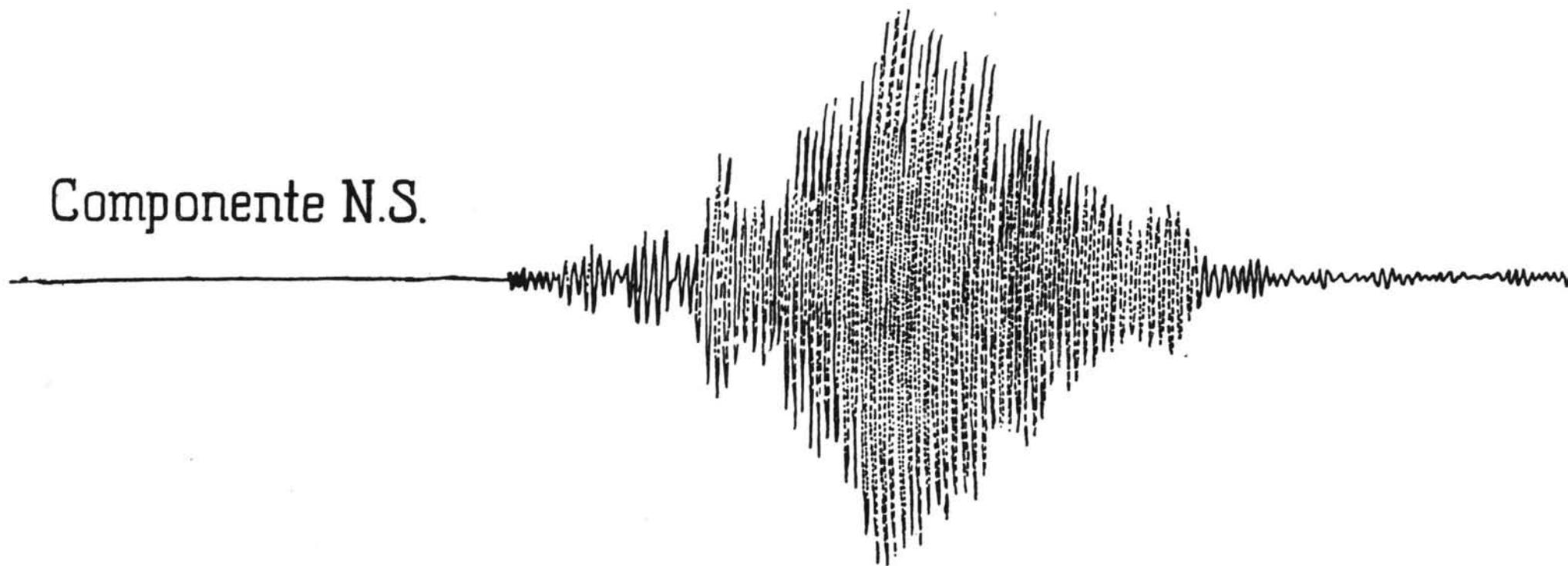


Fig. 14.—Gráfica del sismo registrada en la Estación de San Fernando por la componente N-S del péndulo horizontal de 600 kg. de masa.

muy brusco, que tiene nada menos que 22,5 milímetros de amplitud y que, a nuestro juicio, corresponde a la fase  $R, \overline{PS}$ . A las 15 h. 32 m. 32 s. se registran las ondas  $\overline{S}$ . No hemos podido percibir con seguridad más fases porque en esta parte del sismograma la pluma inscriptora se mueve tan rápidamente que no marca de un modo continuo, y las interrupciones del trazado no permiten determinar con seguridad los principios de los impulsos.

En el sismograma que estamos estudiando nos ha parecido se presenta el caso ya indicado al tratar de la componente N-S del péndulo bifilar de Cartuja. Dado el período propio del péndulo de San Fernando, la gráfica no comienza con las ondas P, sino con las  $\overline{P}$ . Las primeras, por su pequeña amplitud no se perciben, y esto

Componente N.S.



Componente E.W.

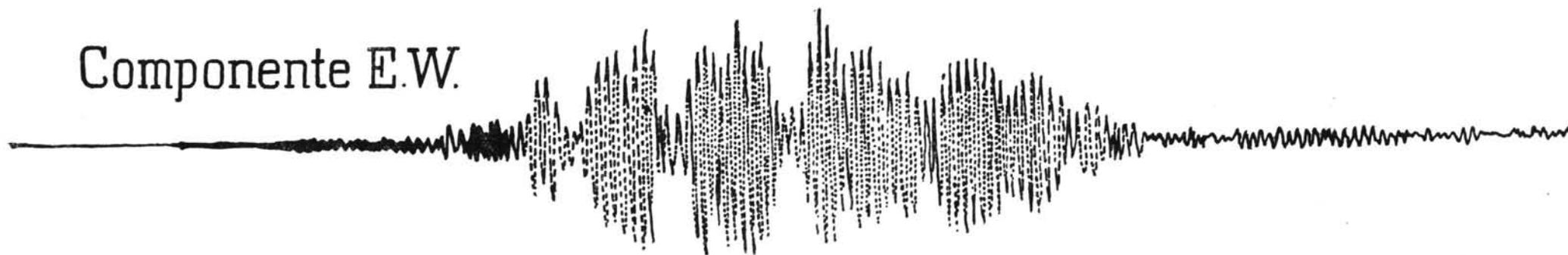


Fig. 15. — Gráfica del sismo registrada en la Estación de Alicante por las componentes horizontales del péndulo Vicentini.

da alguna incertidumbre a la determinación de la hora inicial. Guiados por estas consideraciones, hemos deducido que la hora P corresponde a las 15 h. 31 m. 55 s., y las de las ondas  $\bar{P}$  a 15 h. 39 m. 59 s. La incertidumbre en la determinación de P podrá ser de uno a dos segundos.

El último sismograma de que hemos de tratar es el registrado por la componente E-W, del péndulo vertical, cuyas constantes son:

Masa, 700 kilogramos; período, 2,1 segundos; amplificación, 200.

En la banda de este sismógrafo, se advierten con bastante frecuencia oscilaciones de la pluma, que no son de origen sísmico, las cuales se intercalan entre cada dos señales consecutivas de minutos, y cuya duración es variable, según la parte de la banda que se examine. Estos movimientos, cuya causa desconocemos (quizá puedan ser debidos a vibraciones de las rocas en que asienta la Estación causadas por el oleaje), ofrecen cierta regularidad, y desgraciadamente para el estudio del sismo de 9 de julio de 1923, en la parte de la banda que corresponde al principio del sismograma, es decir, desde las 15 h. 31 m. 31 s. hasta las 15 h. 32 m. 03 s., se presenta una serie de oscilaciones de esta clase que impide determinar la hora de las ondas P.

A las 15 h. 32 m. 16,5 s., aparece un impulso muy caracterizado, que atribuimos a la fase  $R_{s\bar{P}}$ , a las 15 h. 32 m. 22 s. otro que suponemos corresponde a las ondas  $R_i\bar{P}$  y, por último, a las 15 h. 32 m. 32 s. el de las  $\bar{S}$ .

En todas las bandas de que acabamos de tratar, el estado del reloj es de —49 segundos.

### Estación de Alicante

Gracias a la amabilidad de nuestro compañero el distinguido ingeniero don Luciano de Estremera, director de la Estación, hemos podido examinar los sismogramas originales registrados por el péndulo Vicentini, de tres componentes, y el horizontal Bosch, de 25 kilogramos de masa.

Como los aparatos registradores son de tipo idéntico a los de Málaga, las consideraciones que hicimos al tratar de dicha Estación sirven aquí, con la agravante de que la distancia epicentral excede ahora de 400 kms., lo que dificulta aun más la apreciación de la hora de la fase inicial del sismograma.

El estado del cronómetro en el momento de ocurrir el sismo, era para los dos péndulos de —56 segundos.

En el péndulo Vicentini, la componente vertical registra amplitudes tan pequeñas que es imposible distinguir las fases del movimiento sísmico.

En la competente E-W (fig. 15), el sismograma se inicia con un engruesamiento de la línea trazada por la pluma, que es debido a la adherencia a ella de partículas de humo, y esto impide una determinación exacta de la hora de P. Numerosas medidas hechas en la banda, con auxilio de una lente, han dado valores de dicha hora, que oscilan entre 15 h. 32 m. 11 s. y 15 h. 32 m. 15 s., por lo cual hemos tomado como valor definitivo el promedio 15 h. 32 m. 13 s. La incertidumbre puede ser de dos segundos. Unos 41 después de P se percibe un impulso que atribuimos a la fase  $R_i\overline{PS}$ .

Las ondas  $\overline{P}$  no se perciben, a causa de la poca sensibilidad del péndulo, y las  $\overline{S}$  aparecen a las 15 h. 33 m. 15 s.

En la componente N-S (fig. 15), el sismograma empieza por la fase  $R_i\overline{PS}$ , cuya hora lo mismo que las de las ondas  $\overline{S}$ , coincide sensiblemente con la determinada en la otra componente, y tiene la misma incertidumbre de un par de segundos. Es sorprendente que no se haya registrado ningún impulso anterior a la fase  $R_i\overline{PS}$ , porque dada la posición aproximada del epicentro que hemos determinado (fig. 7), la dirección del movimiento sísmico para Alicante no discrepa mucho de la SW-NE por lo cual la amplitud registrada por las dos componentes debiera ser aproximadamente igual. Acaso un mayor rozamiento de la pluma de la componente meridiana haya sido la causa de que ésta no registre las ondas P.

En las dos componentes del péndulo Bosch (figs. 16 y 17), la fase inicial no se percibe absolutamente y las ondas  $\overline{S}$  en ambas se registran a las 15 h. 33 m. 14 s.

### Estación de Toledo

Hemos podido examinar las gráficas originales registradas por las dos componentes del péndulo astático Wiechert, que nos ha facilitado nuestro compañero, director de dicha Estación, don Alfonso Rey Pastor. La figura 18 reproduce la gráfica de la componente NE-SW, algo retocada por dicho ingeniero para la obtención del fotograbado que se utilizó en el artículo ya citado (4).



Fig. 16.—Gráfica del sismo registrada por la componente N-S del péndulo horizontal Bosch de la Estación Sismológica de Alicante.



Fig. 17.—Gráfica del sismo registrada por la componente E-W del péndulo horizontal Bosch de la Estación Sismológica de Alicante.

La hora de P, que en dichas gráficas hemos determinado: 15 h. 32 m. 22 s., coincide exactamente con la facilitada por la Estación de Toledo, inserta en el cuadro I de la revista "Ibérica", tantas veces citado.

De las horas de las demás fases que se perciben en estos sismogramas, trataremos en el capítulo siguiente, dedicado al cálculo de la profundidad hipocentral y de la hora inicial de la sacudida.

### Estación del Ebro (Tortosa)

El Rvdo. P. P. Trullás, S. J., director de la Sección sísmica del Observatorio Astronómico del Ebro nos facilitó la gráfica, que re-

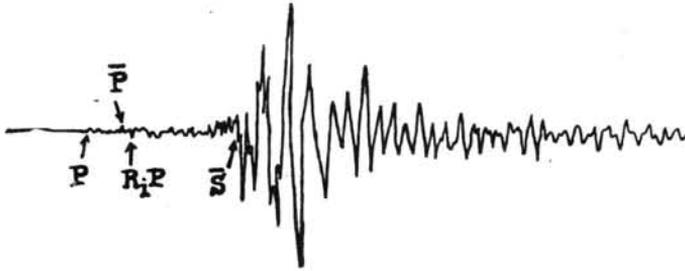


Fig. 18.—Gráfica del sismo registrada por la componente NE-SW del péndulo astático Viechert de la Estación de Toledo.

produce la figura 19, de la componente N-S del péndulo horizontal que funciona en dicha Estación, y cuyas constantes, al ocurrir el sismo de 9 de julio de 1923, eran las siguientes:

Masa: 1.500 kilogramos. Período: 15 segundos. Amplificación: 200. Coeficiente de amortiguamiento:  $\varepsilon : 1 = 2,4$ . Ídem de rozamiento:  $\frac{r}{T_0^2} = 0,002$ . Corrección del reloj: — 0,5 segundos.

El lector, por la simple inspección de la gráfica, comprenderá

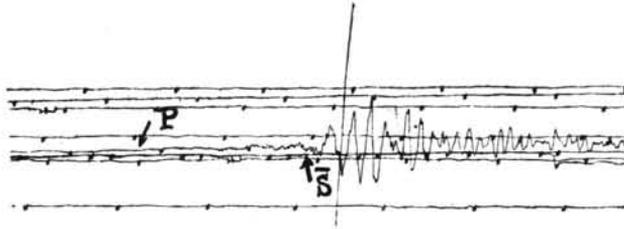


Fig. 19.—Gráfica del sismo registrada por la componente N-S del péndulo horizontal de 1.500 kg. de masa de la Estación del Ebro (Tortosa).

en seguida, dada la pequenísima amplitud de los movimientos preliminares, apenas perceptibles, la extrema dificultad de determinar en segundos una hora precisa de P. La facilitada por el Observatorio del Ebro (cuadro I), es: 15 h. 32 m. 52 s.

Dada la distancia epicentral de 672 kilómetros y la poca sensibilidad del péndulo para el registro de la fase inicial de este sismo, nada tiene de particular que las primeras ondas no se hayan registrado, y que el punto inicial de la curva corresponda a un impulso posterior. Esto se halla de acuerdo con la conclusión, ya expuesta, de tener la hora del Ebro un retraso de unos cinco segundos por término medio.

En el sismo de Melilla de 11 de octubre de 1926, la hora facilitada por el Observatorio del Ebro muestra, basándose en la de Málaga, un adelanto de cinco segundos respecto a la que acabamos de citar, de modo que si el foco de ambas sacudidas fuera el mismo, tendríamos una confirmación de que la hora del sismo de 9 de julio de 1923, comunicada por la Estación del Ebro tiene, efectivamente, un retraso de cinco segundos, como varias veces hemos indicado en el precedente capítulo.

De todos modos, dada la incertidumbre que puede ofrecer el principio del sismograma registrado en la Estación del Ebro y la desfavorable distancia y posición que tiene con relación al foco, nos ha parecido prudente prescindir de este Observatorio en el cálculo de las coordenadas epicentrales, pues de haberlo considerado se perjudicaría seguramente el grado de precisión que con las restantes observaciones puede obtenerse en este sismo.

Como resumen de todo lo expuesto, resulta que las horas de P registradas por las Estaciones españolas y que hemos de utilizar en el cálculo de las coordenadas del epicentro, son las que siguen:

Málaga.....	15 h. 31 m. 42 s.	
Almería.....	— 44 s.	
Cartuja.....	— 45 s.	
San Fernando...	— 55 s.	(19).
Alicante.....	— 32 m. 13 s.	
Toledo.....	— 22 s.	

Con estos datos y las coordenadas rectangulares de las Estaciones, que figuran en el cuadro II, es muy fácil obtener el sistema lineal de ecuaciones de condición (9). Hechos los cálculos, se halla:

$$\begin{aligned}
 174 x_0 + 14 y_0 + 128 \tau &= 6696 \\
 101 x_0 - 36 y_0 - 64 \tau &= 12820,5 \\
 234 x_0 + 80 y_0 - 640 \tau &= -24314 \\
 505 x_0 + 209 y_0 + 1152 \tau &= -11720 \\
 309 x_0 - 168 y_0 - 576 \tau &= 47074,5
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

cuya resolución por el método de los mínimos cuadrados da los siguientes valores más probables de las incógnitas:

$$x_0 = +43,1 \text{ km.} \quad y_0 = -269,55 \text{ km.} \quad \tau = 19,84 \text{ s.}
 \tag{21}$$

cuyos errores medios son, respectivamente:

$$\text{De } x_0: \pm 0,5 \text{ km.} \quad \text{De } y_0: \pm 1,7 \text{ km.} \quad \text{De } \tau: \pm 0,23
 \tag{22}$$

En realidad, el sistema de ecuaciones (20), excede en dos solamente al número de incógnitas. La superabundancia de las observaciones es muy pequeña, y sería, por lo tanto, imprudente creer en el grado de precisión extremado que muestran las cifras (22). A nuestro juicio, dada la incertidumbre de las horas de P, de que nos hemos valido, especialmente las de algunas Estaciones, como Málaga, Almería, San Fernando y Alicante, en que puede haber errores de uno e dos segundos, la posición del epicentro puede discrepar de la verdadera en algo más de los dos kilómetros que dan los errores medios (22).

Debemos prudentemente admitir que la incertidumbre en la posición del epicentro del sismo de 9 de julio de 1923 sea de unos ocho kilómetros o de diez en números redondos, pues en el estudio que hemos hecho del mismo pirenaico (Canal de Berdún), de 10 de julio de 1923, a las 5 h. 31 m., con los datos de observación de 17 Estaciones sismológicas, hemos determinado el epicentro con incertidumbre de unos seis kilómetros, lo que está de acuerdo con la opinión (que en carta nos ha manifestado el profesor A. Mohorovičić), de que en el estado actual de las observaciones sismométricas, la posición del epicentro sólo puede hallarse con aproximación de 0,05 de grado terrestre, o sea, de cinco a seis kilómetros.

Una vez conocidas las coordenadas (21), del epicentro del sismo de 9 de julio de 1923, a las que corresponden las siguientes geográficas:

$$\text{Latitud: } 35^{\circ}\text{-}34'\text{-}16'' \text{ N. Longitud: } 3^{\circ}\text{-}31'\text{-}28'' \text{ W. Gr.}
 \tag{23}$$

se pueden hallar las distancias epicentrales de las Estaciones, bien sea midiéndolas directamente en un mapa donde se haya situado el epicentro, o bien calculándolas por la sencilla fórmula que corresponde al supuesto de la superficie terrestre plana:

$$\Delta = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (24)$$

en que  $x_0, y_0$  son, como siempre, las coordenadas del epicentro, y  $x, y$  las de la Estación considerada.

Esta fórmula se calcula rapidísimamente, valiéndose de una tabla de cuadrados y raíces cuadradas, como las de Barlow (7), por ejemplo.

Hechas tan sencillas operaciones, se obtienen los siguientes valores de las distancias epicentrales :

	Kms.	
Málaga.....	151,4	
Almería.....	170,7	
Cartuja.....	178,6	
San Fernando.....	260,4	(25).
Alicante.....	405,2	
Toledo.....	477,6	
Ebro.....	672,4	

Si con estos valores de las distancias epicentrales y los (19) de las horas de P hacemos el trazado de la dromocrónica (fig. 20), resulta una línea recta AB, que, teniendo por dirección la que corresponde a la velocidad de ocho kilómetros por segundo de dichas ondas, pasa sensiblemente por los puntos que representan todas las Estaciones, excepto la del Ebro, cuya hora de 15 h. 32 m. 52 s. muestra un retraso de unos cinco segundos y medio, resultado que coincide con lo que habíamos deducido precedentemente.

Los datos de observación (19), se ajustan perfectamente a la posición del epicentro (21), y la dromocrónica no muestra discrepancia como las de las figuras 2 a 6, pues ahora, exceptuada la Estación del Ebro, todos los puntos que corresponden a las demás pertenecen a la dromocrónica.

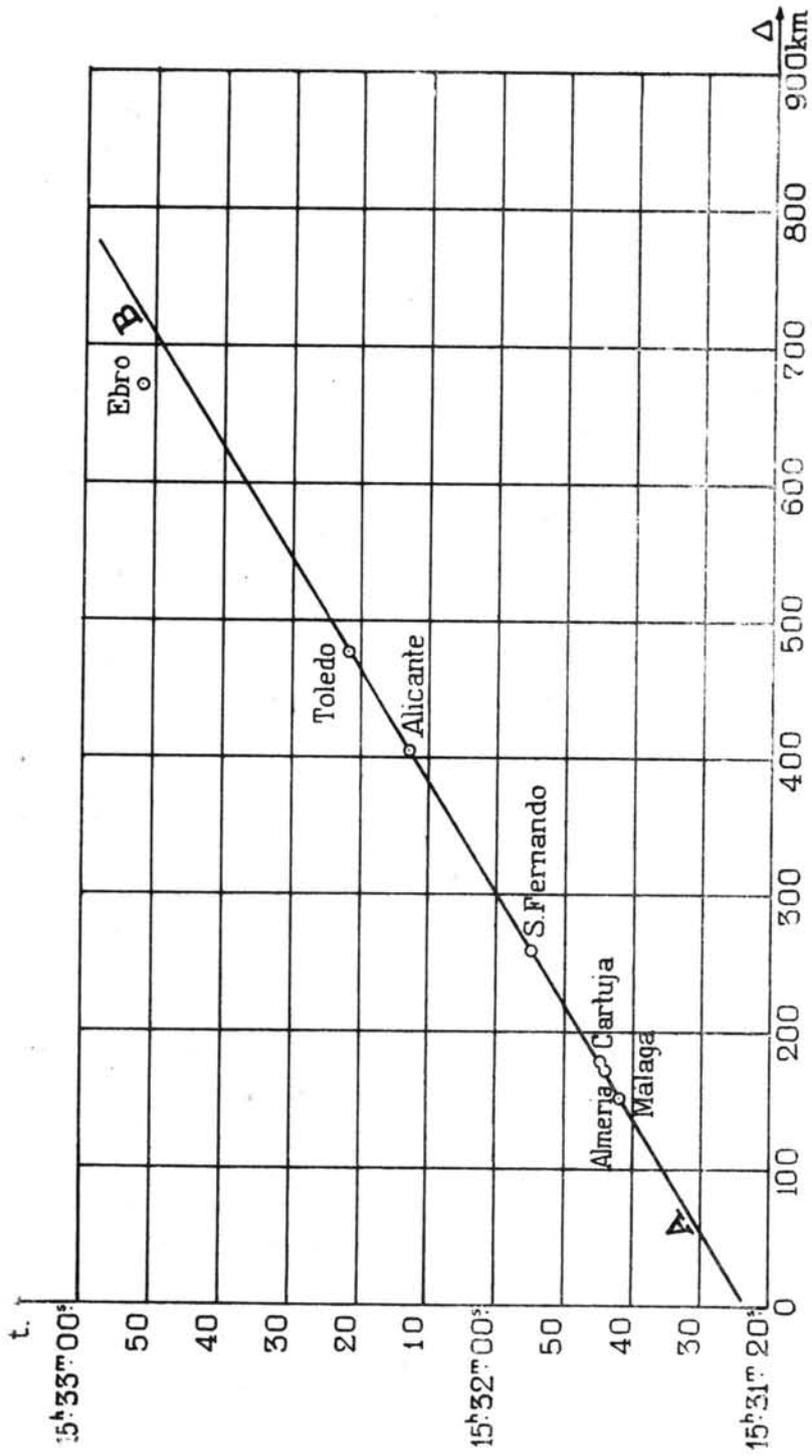


Fig. 20.—Dromocronica correspondiente al epicentro:  $A_0 = +43.1$ ,  $t_0 = -269.55$  km.

Conocida ya la posición del epicentro y halladas las distancias epicentrales de las Estaciones, podemos pasar al cálculo de la profundidad hipocentral del sismo de 9 de julio de 1923 y a la determinación de la hora inicial de la sacudida en el foco y en el epicentro.

### CAPÍTULO III

#### **Cálculo de la profundidad hipocentral y de la hora inicial del sismo**

Si en el sismo que estamos estudiando conociéramos las horas de P, registradas en Estaciones inmediatas al epicentro, una de ellas, a menos de 40 ó 50 kilómetros, cabría aplicar el procedimiento explicado en otros trabajos (8 y 9), y que nos ha permitido calcular la profundidad hipocentral del megasismo japonés de 1.º de septiembre de 1923, con una incertidumbre de un par de kilómetros.

En el sismo de 9 de julio de 1923, la estación más próxima al epicentro, que es Málaga, dista más de 150 kilómetros, y siendo las dromocrónicas de las ondas P rectas sensiblemente paralelas, no puede utilizarse su trazado, como el de las ondas  $\bar{P}$ , para calcular la profundidad del foco, por lo cual habremos de recurrir a las gráficas registradas para deducir de ellas el valor de tan importante coordenada.

El procedimiento general consiste en buscar en el sismograma las fases que puedan identificarse y obtener sus horas con la mayor precisión posible: comparando los intervalos medidos en la gráfica con los que dan a la misma distancia epicentral las tablas del profesor A. Mohorovičić (5), para los cuatro valores de la profundidad hipocentral  $h = 0, 25, 45$  y  $57$  kilómetros, se podrá obtener por interpolación lineal, el valor de la profundidad del foco que corresponde al intervalo entre las dos fases, medido en el sismograma. Claro está que utilizando todos los sismogramas registrados, se podrán hallar tantos valores de la profundidad hipocentral como intervalos se hayan medido, y el promedio de todos ellos se considerará como el valor más probable de tan importante coordenada.

vamos a hacer el análisis de los sismogramas que han llegado a nuestro poder, siguiendo el orden creciente de distancia de las estaciones, como ya lo hicimos en el capítulo II, al obtener las horas de P para el cálculo de las coordenadas del epicentro.

### Estación de Málaga

Como ya hemos dicho al tratar de los sismogramas registrados en esta estación, el intervalo entre las ondas  $R_s\bar{P}$  y  $\bar{P}$ , medido en la gráfica del Vicentini, es de 9 segundos, y el que existe entre  $\bar{S}$  y  $\bar{P}$ , de 18 ó 19 en este péndulo y de 19 en el de Bosch.

A la distancia epicentral de 151,4 kilómetros, que corresponde a Málaga, las tablas citadas dan:

	Intervalo entre $R_s\bar{P}$ y $\bar{P}$	Intervalo entre $\bar{S}$ y $\bar{P}$
Para $h = 25$ km.....	9,1 s.	19,1 s.
Para $h = 45$ km.....	9,9	19,6

Al primer intervalo, medido en el Vicentini, de 9 segundos, corresponde la profundidad de 23 kilómetros, y si tomamos 19 segundos para el intervalo entre  $\bar{S}$  y  $\bar{P}$ , resulta  $h = 21$ . El promedio de estos dos valores es  $h = 22$  kilómetros.

### Estación de Almería

Como ya hemos dicho, las gráficas de esta estación no han llegado a nuestro poder, por lo cual no podemos calcular el valor de la profundidad focal que corresponde a este Observatorio.

### Estación de Cartuja

Las figuras 10, 11 y 12, reproducen respectivamente la preciosa gráfica, amplificada 2,5 veces, de la componente N-S del Berchmanns, y las de la componente N-S y E-W del péndulo bifilar Cartuja de 340 kilogramos de masa.

En la primera se percibe perfectamente el principio de las ondas P a las 15 h. 31 m. 45 s. Siguen en ímpetu muy claro las P un segundo después. En las dos componentes del bifilar no se perciben las ondas P y las  $\bar{P}$  se registran a las 15 h. 31 m. 46 s. en la N-S. y a las 15 h. 31 m. 49 s. en la E-W. Ya hemos explicado en el capítulo I a qué puede ser debida esta diferencia de las horas iniciales del sismograma.

Dada la potente amplificación del Berchmanns, hemos tomado como hora inicial del sismograma, o sea, de las ondas P, la 15 h. 31 m. 45 s., y ésta es la que hemos utilizado en el cálculo de las coordenadas epicentrales y, como hora de P, la de 15 h. 31 m. 46 s., que resulta de los sismogramas de las dos componentes N-S, y si bien, en la E-W del bifilar, no aparece el principio de la curva hasta las 15 h. 31 m. 49 s., hemos tomado como punto a que corresponden las ondas P, el que en la gráfica marca las 15 h. 31 m. 46 s., aunque en ésta, dada la dirección casi meridiana del movimiento sísmico, no se perciba aún oscilación ninguna.

En los tres cuadros que siguen se indican los intervalos entre las ondas  $\bar{P}$  y todas las fases que hemos podido identificar en los sismogramas del Berchmanns y de las dos componentes del bifilar Cartuja, los que dan las tablas de Mohorovičić a la distancia epicentral de 180 kilómetros (que es aproximadamente la de Cartuja), para las dos profundidades hipocentrales  $h = 25$  y 45 kilómetros, y, por último, los valores de ésta que corresponden a los intervalos medidos en las gráficas.

COMPONENTE N-S DEL BIFILAR DE CARTUJA

Intervalo entre  $\bar{P}$  y las fases siguientes

Nombre de la fase en la gráfica	Notación de E. Rothé	INTERVALO DE LAS TABLAS y 1 A. MOHOROVICIC		Intervalo medido en la gráfica — Segundos	Valor de $\bar{h}$ que corresponde al intervalo medido en la gráfica — $Kms.$
		Para $\bar{h} = 25$ segundos	Para $\bar{h} = 45$ segundos		
<i>b</i>	$R_1\bar{P}$	3,0	1,0	3,0	25
<i>c</i>	$R_8\bar{P}$	7,9	9,7	7,9	26
<i>d</i>	$R_{i_2}\bar{P}$	15,5	12,5	15,3	26
<i>e</i>	$R_1\bar{P}\bar{S}$	18,7	20,1	18,7	25
<i>f</i>	$R_8\bar{P}_2\bar{S}$	19,5	20,2	19,8	34
»	$R_{s_2}\bar{P}$	22,6	25,1	»	»
<i>g</i>	$\bar{S}$	22,7	23,0	22,7	25
<i>h</i>	$R_{i_2}\bar{P}_3\bar{S}$	24,9	22,3	24,7	27
<i>i</i>	$R_i\bar{S}$	27,8	24,6	27,9	24
»	$R_8\bar{P}_2\bar{S}_2$	31,1	30,8	»	»
<i>j</i>	$R_{s_2}\bar{P}_4\bar{S}$	31,2	33,6	31,2	25
<i>k</i>	$R_{i_2}\bar{P}_2\bar{S}_2$	34,3	32,2	34,0	28
<i>l</i>	$R_8\bar{S}$	36,1	39,2	35,9	24
<i>m</i>	$R_{s_2}\bar{P}_3\bar{S}$	39,8	42,0	39,8	25
»	$R_{i_1}\bar{P}\bar{S}_3$	43,8	42,1	»	»
<i>n</i>	$R_{i_2}\bar{S}$	49,1	44,2	48,7	27

El promedio de estos valores de  $\bar{h}$  es:  $\bar{h} = 26,2 \pm 0,54$  kms.

### COMPONENTE N-S DEL PÉNDULO BERCHMANN'S

Intervalo entre  $\bar{P}$  y las fases siguientes.

Nombre de la fase. Notación de E. Rothé	INTERVALO DE LAS TABLAS DE A. MOHOROVICIC		Intervalo medido en la gráfica — Segundos	Valor de $h$ que corresponde al intervalo medido en la gráfica — Kms.
	Para $h = 25$ segundos	Para $h = 45$ segundos		
	$R_1\bar{P}$	3,0		
$R_5\bar{P}$	7,9	9,7	7,0	15
$R_{12}\bar{P}$	15,5	12,5	15,2	27
$R_1\bar{PS}$	18,7	20,1	18,8	26
$\bar{S}$	22,7	23,0	22,7	25

El promedio de estos valores es:  $h = 23,6 \pm 2,18$  kilómetros.

### COMPONENTE E-W DEL BIFILAR CARTUJA

Intervalo entre  $\bar{P}$  y las fases siguientes.

Nombre de la fase en la gráfica	Notación de E. Rothé	INTERVALO DE LAS TABLAS DE A. MOHOROVICIC		Intervalo medido en la gráfica — Segundos	Valor de $h$ que corresponde al intervalo medido en la gráfica — Kms.
		Para $h = 25$ segundos	Para $h = 45$ segundos		
		$b$	$R_1\bar{P}$		
$c$	$R_5\bar{P}$	7,9	9,7	8,0	26
$d$	$R_{12}\bar{P}$	15,5	12,5	15,3	26
$e$	$R_1\bar{PS}$	18,7	20,1	18,8	26
$f$	$R_1\bar{P}_2\bar{S}$	19,5	20,2	19,9	36
»	$S_5\bar{P}$	22,6	25,1	»	»
$g$	$\bar{S}$	22,7	23,0	22,8	33
$h$	$R_{12}\bar{P}_3\bar{S}$	24,9	22,3	24,9	25
$i$	$R_1\bar{S}$	27,8	24,6	27,6	26
»	$R_5\bar{PS}_2$	31,1	30,8	»	»
	$R_{12}\bar{P}_4\bar{S}$	31,2	33,6	31,6	29
$k$	$R_{12}\bar{P}_2\bar{S}_2$	34,3	32,2	34,2	26
$l$	$R_5\bar{S}$	36,1	39,2	36,4	28
$m$	$R_{12}\bar{P}_3\bar{S}_2$	39,8	42,0	39,4	21
$m'$	$R_{12}\bar{PS}_5$	43,8	42,1	42,8	36
$n$	$R_{12}\bar{S}$	49,1	44,2	49,0	25

El promedio de estos valores de  $h$  es:  $h = 27,2 \pm 1,35$  kilómetros.

Si se forma el promedio de los tres que se han obtenido de los valores deducidos de cada gráfica, se halla finalmente:

$$h = 25,7 \pm 0,72 \text{ kms.}$$

o si nos limitamos a expresar la profundidad en kilómetros redondos:

$$h = 26 \text{ kilómetros}$$

Es sorprendente el acuerdo admirable de los resultados del análisis de las gráficas registradas en Cartuja. Gracias a estar los sismógrafos amortiguados y a tener el Berchmanns potente amplificación, se ha podido apreciar en las bandas, con gran exactitud, el principio de las fases P y P y hallar las horas de 14 fases más o prácticamente de todas las que se consignan en las tablas de A. Mohorovičić, pues las ondas que faltan, que son  $R_{12}\bar{P}$  y  $R_1PS_2$ , no es extraño que no se perciban en la gráfica, pues su hora difiere sólo en una décima de segundo de la de la fase siguiente, de modo que prácticamente esas dos fases consecutivas se superponen.

Una circunstancia que ha contribuido poderosamente a la mejor determinación de las fases de los sismogramas, ha sido la amplificación fotográfica de las gráficas originales. En las del bifilar Cartuja se han amplificado seis veces, de modo que el minuto tiene una longitud equivalente a 51 milímetros, lo que permite apreciar en décimas de segundo las horas de los impulsos.

En el Berchmanns, la poderosa amplificación del sismógrafo, que es de 700 veces, da una gran amplitud a los impulsos, y como el período del péndulo es muy pequeño, las líneas del trazado se aproximan de tal modo, que es difícil apreciar las horas de las fases, excepto las iniciales de P y  $\bar{P}$ , que son ímpetus clarísimos. Por esta razón, en el segundo de los cuadros precedentes, sólo figuran cinco fases siguientes a la  $\bar{P}$ . Quizá amplificando en mayor escala la gráfica original se hubiera logrado separar más las líneas del trazado, pero esto hubiera obligado a aumentar considerablemente el tamaño de la figura, y como con la amplificación, de 6 veces, de los sismogramas del bifilar Cartuja, se han obtenido las horas de todas las fases, nos ha parecido innecesario hallarlas también en el Berchmanns, y nos hemos limitado a una amplificación de 2,5 veces, como aparece en la figura -10. A causa de la

proximidad de las líneas del sismograma no hemos podido indicar por flechas en la figura más que las fases P,  $\bar{P}$ ,  $R_1\bar{P}$  y  $R_2\bar{P}$ ; el lector encontrará fácilmente las demás y comprenderá la imposibilidad de indicárlas de un modo claro, pues falta espacio para poner la flecha y la notación literal de la fase.

El examen de las gráficas de Cartuja hará comprender perfectamente que el problema de la Sismología instrumental consiste en tener péndulos amortiguados de gran aumento, y que la determinación de hora sea exacta. Cumplidas estas condiciones la ampliación fotográfica de las gráficas permite determinar las horas de las fases en décimas de segundo y calcular la profundidad hipocentral con un error medio menor de un kilómetro.

La circunstancia de no haber visto hasta ahora publicado ningún trabajo en que se indiquen en los sismogramas todas las fases directas y reflejadas que se insertan en las tablas del profesor A. Mohorovićić, nos ha impulsado a presentar las gráficas, creyendo que pueden ser de interés a los directores de las estaciones sismológicas.

Claro está que nuestra interpretación de las fases del sismograma, aunque en admirable acuerdo con las tablas de A. Mohorovićić, pudiera tener algunos errores, y esperamos que la indulgencia de los sismólogos sabrá perdonar los que hayamos cometido al analizar las gráficas que se reproducen en este trabajo.

### Estación de San Fernando

Como la distancia epicentral es de 260,4 kilómetros, tomaremos en números redondos 260, por ser éste uno de los valores que están en la tabla de A. Mohorovićić.

Según hemos expuesto, en el sismograma de la componente N-S del péndulo horizontal de 600 kilogramos de masa (fig. 14), hemos encontrado un intervalo de 4 segundos entre las ondas P y  $\bar{P}$ , y teniendo en cuenta que las tablas de A. Mohorovićić dan a dicha distancia epicentral para  $h = 25$ , un intervalo de 3,8 y para  $h = 45$ , uno de 6,4; una sencilla interpolación permite evaluar en 26,6 kilómetros la profundidad que corresponde al intervalo medido en la gráfica. Hemos de decir, en honor a la verdad, que no habiendo podido amplificar la gráfica y siendo en ésta de un cuarto de milímetro la longitud que equivale al segundo, no hay medio de apreciar en décimas de segundo, ni mucho menos, las horas de las fases, pues un error de medio segundo es casi inevitable, por lo

cual creemos más prudente tomar la profundidad de 25 kilómetros, que es uno de los valores de la tabla, ya que el intervalo medido, dentro del error de apreciación, se ajusta muy bien al dado en la tabla.

Los intervalos entre P y las demás fases que hemos podido identificar, o sean  $R_3\bar{P}$ ,  $R_1\bar{PS}$  y  $\bar{S}$  figuran en el siguiente cuadro, así como los de las tablas de Mohorovičić, y los valores de  $h$  que a los primeros corresponden.

**Intervalos entre las ondas P y las  $R_3\bar{P}$ ,  $R_1\bar{PS}$  y  $\bar{S}$  en las gráficas de San Fernando.**

Nombre de la fase. Notación de E. Rothé	INTERVALO DE LAS TABLAS y DE A. MOHOROVICIC		Intervalo medido en la gráfica — Segundos	Valor de $h$ que corresponde al intervalo medido en la gráfica — Kms.
	Para $h = 25$ segundos	Para $h = 45$ segundos		
$R_3\bar{P}$	21,6	26,3	21,5	25
$R_1\bar{PS}$	26,9	33,1	27	25
$\bar{S}$	36,6	39,1	37	28

El promedio de estos valores es  $h = 26$  en kilómetros redondos, y no hallamos el error medio, porque las horas de las fases en el sismograma, sólo se han podido evaluar en segundos redondos.

**Estación de Alicante**

Como hemos dicho al tratar de las gráficas, en la banda del Vicentini, se aprecia un intervalo de 41 segundos entre  $R_1\bar{PS}$  y P. En cuanto a la fase  $\bar{S}$  el intervalo es de 62 ó 61 segundos, según se trate del sismograma del Vicentini o del Bosch, y tomaremos el promedio 61,5.

En el siguiente cuadro se indican los valores de  $h$  que corresponden a estos intervalos medidos en las gráficas.

Nombre de la fase que sigue a P	INTERVALO DE LAS TABLAS y DE A. MOHOROVICIC		Intervalo medido en la gráfica — Segundos	Valor de $h$ que corresponde al intervalo medido en la gráfica — Kms.
	Para $h = 25$ segundos	Para $h = 45$ segundos		
$R_1\bar{PS}$	42,3	51,0	41	22
$\bar{S}$	61,7	63,6	61,5	20

El promedio de estos dos valores es  $h = 21$  kilómetros. No calculamos el error medio, porque la incertidumbre en la evaluación de las fases del sismograma es de dos segundos, y, por lo tanto, los valores de  $h$  son poco seguros.

### Estación de Toledo

La figura 18 reproduce, en tamaño natural, el sismograma registrado por la componente NE-SW del péndulo astático Wiechert reformado, que funciona en dicha estación. El de la otra componente no ha podido ser reproducido a causa de aparecer rayada la banda en la parte donde está la curva, de modo que el trabajo finísimo de la pluma, apenas destaca del gris muy claro de la capa del ahumado, por lo cual es imposible obtener una reproducción del sismograma, ya que al retocar éste como se ha hecho con el de la otra componente, los principios de los impulsos no pueden determinarse con la exactitud del segundo, que es necesaria en estos cálculos.

El retoque de la gráfica fué obligado para obtener la reproducción que se inserta en el trabajo ya citado (4) del señor Rey Pastor, director de la Estación Sismológica de Toledo.

Examinando con la mayor atención los simogramas originales del péndulo Wiechert, a pesar de estar retocado el de la componente NE-SW, y muy borroso el de la otra, hemos podido identificar las siguientes fases: P,  $\bar{P}$ , R,  $\bar{P}$  y  $\bar{S}$ .

Las horas de estas fases coinciden, dentro de la apreciación del segundo, que en la banda equivale a un cuarto de milímetro, con las halladas por el señor Rey Pastor para el registro diario de la Estación de Toledo. La única diferencia estriba en que él llama  $\bar{L}$  la fase que hemos reconocido como S y no emplea tampoco la denominación de Rothé para la fase R.

En el cuadro que sigue se insertan los valores de los intervalos entre P y las demás fases, tal como los hemos medido en la gráfica, los que se dan en las tablas de A. Mohorovičić a la distancia epicentral de Toledo, que es 477,6 kms. para  $h = 25$  y  $h = 45$ , y, por último, los valores de  $h$  que corresponden a los primeros intervalos.

Nombre de la fase que sigue a la P	INTERVALO DE LAS TABLAS DE A. MOHOROVIC <sup>v</sup> C		Intervalo medido en la gráfica — Segundos	Valor de $h$ que corresponde al intervalo medido en la gráfica — Kms.
	Para $h = 25$ segundos	Para $h = 45$ segundos		
$\bar{P}$	14,6	16,6	15	29
$R_1\bar{P}$	21,1	21,7	21	22
$\bar{S}$	74,0	75,7	74	25

El promedio de estos valores es:  $h = 25,3 \pm 2,0$  kilómetros.

Una circunstancia interesante de las gráficas del péndulo astático Wiechert que estamos analizando, es que permiten determinar por sí solas y con gran aproximación la posición del foco sísmico.

En efecto, como el intervalo entre las fases  $\bar{S}$  y P, que se perciben muy bien en dichas gráficas, es, como hemos dicho, de 74 segundos, las tablas de Mohorovičić (profundidad hipocentral  $h = 25$  kilómetros), dan la distancia epicentral de 477 kilómetros en números redondos. Determinada la distancia, para hallar la posición del epicentro, basta conocer el acimut, y éste se puede calcular por las amplitudes verdaderas del movimiento del suelo, registradas por las dos componentes del sismógrafo.

El señor Rey Pastor nos ha facilitado amablemente el valor de la amplitud calculada por él, del primer máximo de las ondas lentas, que es:

Componente NE-SE: 15 micrones.      Id. NW-SE: 18.

La relación de estas dos amplitudes da la tangente del ángulo que determina el acimut. Hechos los cálculos, se halla para acimut del epicentro, contado desde el S al E:  $5^{\circ}-11'40''$ .

Conocida la dirección acimutal y el valor de la distancia epicentral, poco trabajo cuesta ya hallar las coordenadas del epicentro. Hecho el cálculo se obtiene:

$$x_0 = + 41 \text{ kms.} \qquad y_0 = - 269 \text{ kms.}$$

Comparadas estas cifras con las (21)  $x_0 = \pm 43,1$   $y_0 = - 269,55$  kilómetros, que nos ha dado el cálculo de las coordenadas del epicentro, dedúcese que las gráficas del péndulo astático Wiechert de la Estación de Toledo, permiten fijar la posición del epicentro con incertidumbre de dos o tres kilómetros. Los resul-

tados no pueden ser más concordantes, y muestran el gran partido que se puede sacar de las gráficas de un sismógrafo amortiguado, siempre que la determinación de hora esté hecha con gran cuidado y se analice el sismograma escrupulosamente.

### Estación del Ebro (Tortosa)

La figura 19 reproduce la gráfica registrada por la componente N-S del péndulo horizontal de 1.500 kilogramos de masa que funciona en dicha Estación. No se perciben en ella con distinción impulsos que correspondan a las fases que figuran en las tablas de A. Mohorovičić y que permitirían calcular la profundidad hipocentral.

Para la distancia epicentral del Ebro, que es de 672 kilómetros, y para una profundidad focal de 25, las citadas tablas dan un intervalo de 1 m. 46,9 s. entre las ondas  $\bar{S}$  y P. Si admitimos como hora de P en Tortosa la 15 h. 32 m. 47 s. que resulta de restar los cinco segundos, con que aparece retrasada la 15 h. 32 m. 52 s., facilitada por dicho Observatorio, la hora de S sería 15 h. 34 m. 33,9 s. que, teniendo en cuenta el estado del reloj, que es de  $-0,5$  s. da el punto marcado por la flecha para la aparición de las ondas  $\bar{S}$

\* \* \*

Del estudio que acabamos de hacer resultan los siguientes valores de la profundidad hipocentral del sismo de 9 de julio de 1923:

	<u>Kms.</u>
Málaga.....	22
Cartuja.....	26
San Fernando.....	26
Alicante.....	21
Toledo.....	25

Aunque el promedio de estos cinco valores dé

$$h = 24 \text{ kms.}$$

nosotros creemos más seguro el valor de 26 kilómetros, que resulta como promedio de los numerosos determinados en Cartuja, ya que los hallados por las gráficas de Málaga y Alicante, que son los que más discrepan de los 26 kilómetros, son muy poco seguros por la gran incertidumbre con que se han determinado las fases, y los obtenidos, basándose en los sismogramas de San Fernando y Toledo, valen 25 kilómetros.

En estas condiciones, creemos acercarnos más a la realidad tomando como valor definitivo de la profundidad focal el ya citado de 26 kilómetros.

Fáltanos ahora calcular la hora inicial del sismo en el epicentro y en el foco.

En otro trabajo (1), hemos demostrado, partiendo del hecho experimental de que las curvas dromocrónicas de las ondas P son sensiblemente rectas paralelas, que su tiempo de recorrido  $T_1$ , referido a la hora epicentral, para una cierta distancia epicentral  $\Delta$  y una profundidad del foco  $h$  viene dado por la fórmula:

$$T_1 = 13,8 - 0,326316 \cdot h + \frac{\Delta}{8}$$

en que  $\Delta$  y  $h$  se suponen expresados en kilómetros y  $T_1$  en segundos.

Si en esta fórmula hacemos  $h = 26$  y sustituímos los valores (25) de las distancias epicentrales de las Estaciones españolas, se obtienen fácilmente los tiempos de recorrido de las ondas P, referidos a la hora epicentral, y que son los siguientes:

ESTACION	Tiempo de recorrido $T_1$ — Segundos
Málaga.....	24,2
Almería.....	26,6
Cartuja.....	27,6
San Fernando....	37,8
Alicante.....	55,9
Toledo.....	65,0

los cuales, restados respectivamente de las horas de P (19), registradas en las distintas Estaciones, nos dan los siguiente valores de la hora epicentral:

ESTACION	Hora epicentral
Málaga.....	15 h. 31 m. 17,8
Almería.....	17,4
Cartuja.....	17,4
San Fernando....	17,2
Alicante.....	17,1
Toledo.....	17,0

El promedio de estos valores es:

Hora epicentral..... 15 h. 31 m. 17,33 s.  $\pm$  0,12 s.

Conocida la hora epicentral, para hallar la hora en el foco no hay más que restar de la primera el tiempo que el rayo sísmico ha tardado en recorrer la vertical sísmica, que es en este caso de 26 kilómetros. Como la velocidad de las ondas  $\bar{P}$  es de 5,7 kilómetros por segundo (8), resulta para dicho tiempo 4,56 s., y, por tanto, la hora inicial del sismo en el foco es:

15 h. 31 m. 12,77 s.

El error medio es sensiblemente igual al de la hora epicentral, es decir, de una décima de segundo.

Con este cálculo hemos determinado los elementos fundamentales del sismo de 9 de julio de 1923, ya que conocemos las tres coordenadas del foco, es decir, el punto de donde irradió el movimiento sísmico y la hora a que éste se inició en el foco y en el epicentro.

De este modo el sismo de 9 de julio de 1923 queda definitivamente incorporado al catálogo sísmico de España, ya que conocemos el lugar y tiempo de la ocurrencia del fenómeno.

#### CAPÍTULO IV

#### Conclusiones

En el presente trabajo se ha tratado de calcular las coordenadas epicentrales del sismo sentido en Melilla el 9 de julio de 1923, a las 15 h. 31 m., utilizando un procedimiento original—aplicado ya al sismo pirenaico (Canal de Berdún), de 10 del mismo mes (1)—y que se basa en el supuesto del foco puntiforme y en la propagación aparente de las ondas P por la superficie terrestre, con la velocidad constante de ocho kilómetros por segundo.

Las horas de P y las distancias epicentrales comunicadas por las Estaciones españolas y publicadas en la revista "Ibérica" ofrecen tales contradicciones, que fué imposible trazar una dromocrónica que se ajustara a ellas. Tampoco dieron resultado satisfactorio los supuestos de estar el epicentro en Melilla—único punto donde se tenía noticia de haberse sentido el sismo—en el punto obtenido por el señor Rey Pastor (cábila de Gueznaya, a unos 40 kilómetros al S. de la bahía de Alhucemas), o el calculado en la Estación Sismológica de Cartuja (latitud: 35°5 N. Longitud: 4°2 W Greenwich).

De estos tanteos para conocer el grado de precisión de las ob-

servaciones, dedújose que la hora comunicada por la Estación de Alicante tenía un retraso superior a diez segundos y otro de cinco la del Ebro, justificado por la gran distancia epicentral a que ésta se halla (672 kilómetros) y ser la gráfica de tan pequeña amplitud que las fases iniciales apenas se perciben.

Descartadas ambas Estaciones y hecho el cálculo con las horas de P comunicadas por las demás y utilizando para Cartuja la que dió una amplificación fotográfica de las preciosas gráficas registradas por sus péndulos bifilares, se obtuvo como epicentro un punto situado en los Montes Riata, a unos 60 kilómetros al S. E. de Fez y a unos 200 de Melilla, resultado inadmisibile, ya que no se tenía noticia de haberse sentido el sismo en Fez, a pesar de hallarse esta ciudad más cerca del epicentro que Melilla, donde se había percibido con el grado VI-VII (escala Mercalli).

Este negativo resultado del cálculo de las coordenadas epicentrales, era debido a que en la hora de P comunicada por la Estación de San Fernando había un adelanto de unos 14 segundos y discrepancias de dos a tres en otras, debidas a la pequeña sensibilidad de los péndulos, cuyas gráficas resultaban en su fase inicial muy poco perceptibles.

Como al hacer estos cálculos sólo disponíamos de los sismogramas registrados en Cartuja y Toledo, cuyos péndulos amortiguados y de gran sensibilidad permitían determinar con gran precisión la hora de P y calcular la distancia epicentral, nos fué fácil hallar una posición aproximada del epicentro, que por rara coincidencia estaba en la prolongación de la recta que une ambas Estaciones, y a 180 kilómetros de la de Cartuja.

Conocida ya la posición del epicentro, se determinaron las distancias de todas las Estaciones, se calculó para cada una el tiempo de recorrido de las ondas P, y como la hora de éstas en Cartuja se sabía con gran precisión, fué posible hallar las horas de P correspondientes a cada uno de los Observatorios. Las horas así calculadas diferían de las comunicadas, y para algunas Estaciones las discrepancias eran considerables: a Alicante, por ejemplo, correspondía un retraso de 21 segundos, y a San Fernando un adelanto de 15.

Pero estas horas de P, obtenidas por el cálculo, ¿correspondían realmente al registro instrumental, o serían engañosa ilusión de las fórmulas? Para decidir esta cuestión, no había más que hacer un análisis minucioso de los sismogramas originales, ampliados fotográficamente y obtener la hora de P con la mayor precisión posi-

ble. Para ello rogamos a los directores de las Estaciones sismológicas españolas nos enviaran las gráficas originales o sus reproducciones fotográficas, pero antes de recibirlas tuvimos una brillante confirmación de los resultados del cálculo, pues al remitirnos el Rvdo. P. A. F. Linari, S. J., director de la revista "Ibérica", los datos a él comunicados por las Estaciones sismológicas acerca del sismo de Melilla de 11 de octubre de 1926, ocurrido poco días antes, pudimos comprobar que los intervalos entre las horas de P, comunicadas por las Estaciones, eran los mismos que habíamos calculado para el sismo de 9 de julio de 1923, lo que permitía suponer que ambos temblores irradiaban del mismo foco.

Recibidas las gráficas originales de las Estaciones españolas y ampliadas fotográficamente, fué posible determinar con gran precisión las horas de P, que coincidían sensiblemente con las de nuestro cálculo, y, partiendo de los nuevos datos de observación, hacer el cálculo de las coordenadas del epicentro, que resultaron:

$$x_0 = + 43.1 \qquad y_0 = - 269,55 \text{ kms.}$$

con error medio de  $\pm 0,5$  para  $x_0$  y de  $\pm 1,7$  para  $y_0$  y que corresponden a un punto situado en el Mediterráneo, a 60 kilómetros al WNW de Melilla.

Las gráficas del péndulo astático Wiechert, de Toledo, permitieron por sí solas hacer la determinación del epicentro, valiéndose de la amplitud verdadera del movimiento del suelo, calculada para ambas componentes, que da el acimut del epicentro ( $5^{\circ}11'40''$ , contado desde el S al E): las coordenadas del epicentro así calculadas,

$$x_0 = + 41 \qquad y_0 = - 269 \text{ kms.}$$

corresponden a un punto que dista del anterior tan sólo dos kilómetros.

Calculadas las distancias epicentrales de todas las Estaciones, se pasó a la determinación de la profundidad hipocentral por el procedimiento, explicado ya en otro trabajo (1), de medir los intervalos entre las distintas fases de cada sismograma y deducir por interpolación lineal, con auxilio de las tablas de Mohorovičić (5), los valores de dicha coordenada.

El promedio de los 32 obtenidos con las gráficas ampliadas de la Estación de Cartuja, fué:

$$h = 25,7 \pm 0,72 \text{ kms}$$

ó 26 en kilómetros redondos.

Es muy importante observar la gran precisión con que se obtiene la profundidad hipocentral, y el hecho de que en dichas gráficas se hayan podido, por primera vez, identificar todas las ondas directas y reflejadas de la fase inicial, lo que constituye una brillante confirmación de la ingeniosa teoría del profesor A. Mohorovičić acerca de la propagación de las ondas sísmicas en la capa superior de la corteza y la existencia de la superficie de discontinuidad por él descubierta.

Conocidas ya las coordenadas del foco, se obtuvieron los valores de la hora inicial de la sacudida:

Hora del sismo en el epicentro..	15 h. 31 m. 17,33 s.
Idem en el foco.....	15 h. 31 m. 12,77 s.

con error medio de una décima de segundo.

Como en el trabajo (1), dedicado al sismo pirenaico (canal de Berdún), de 10 de julio de 1923, dedúcese en éste que las condiciones de propagación de las ondas sísmicas en la Europa Central, son sensiblemente las mismas que reinan en nuestra Península y áreas adyacentes mediterráneas.

Si se tiene en cuenta que los datos utilizados para el estudio de este sismo son sólo las de seis Estaciones y que en algunas de ellas ofrecen incertidumbre de dos a tres segundos, se comprenderá fácilmente los numerosos tanteos que hemos debido efectuar para llegar por el cálculo a resultados de gran precisión.

A nuestro juicio, para obtener resultados satisfactorios en esta clase de cálculos, conviene que un mismo investigador analice todas las gráficas, ampliadas fotográficamente, y las compare escrupulosamente para identificar las fases y estar seguro de que los impulsos que se eligen en cada sismograma corresponden realmente a la llegada de la onda sísmica que se busca. No teniendo a la vista muchas gráficas, es difícil darse cuenta de ciertas particularidades del trazado, que varían de un sismo a otro y que pueden hacer incurrir en errores de interpretación al analizar los sismogramas registrados en un solo Observatorio.

Acaso parezca excesivo el trabajo de cálculo dedicado a este sismo para deducir solamente las coordenadas del foco y la hora inicial de la sacudida, pero cuando faltan datos de información macrosísmica que permitan localizar el epicentro, no hay otro medio de determinarlo con seguridad que hacer un análisis minucioso de los datos del registro instrumental para llegar a resultados positivos.

La determinación gráfica del epicentro por intersección de arcos de círculos, cuyos radios sean las distancias epicentrales, es muy expedita, pero si éstas no son exactas, el error en la situación del epicentro puede ser considerable. El estudio de este sismo habrá demostrado el peligro de tales determinaciones, sin un análisis minucioso de los sismogramas que garantice la exactitud de las distancias epicentrales; lo mismo puede decirse del trazado de arcos de hipérbola, que se funda en el conocimiento de las horas de las ondas P: hace falta asegurarse de que los impulsos tomados en el sismograma corresponden realmente a dichas ondas, y esto ofrece ciertas dificultades en los sismos próximos, cuyo epicentro no se conoce, pues, según el valor de la distancia epicentral, varía el intervalo entre las ondas P y  $\bar{P}$  y aun el orden en que éstas aparecen en la gráfica. En tales casos, las dudas de interpretación de las gráficas, sólo pueden salvarse con el examen de conjunto de las registradas en gran número de Estaciones.

La determinación de epicentros es la base de los estudios de sismicidad y de la delimitación de zonas sísmicas; sólo con datos seguros de la posición de los focos sísmicos, cabe abordar aquéllos y llegar al conocimiento de tantas misteriosas particularidades del fenómeno sísmico. Estas consideraciones acaso muestren la utilidad de trabajos como el presente, en que, por ingrata y penosa que parezca la labor del cálculo, se tiende a evitar errores groseros y a tener alguna garantía de que el epicentro calculado corresponde realmente al punto en que tembló la Tierra.

### BIBLIOGRAFÍA

- (1) V. Inglada.—Contribución al estudio del sismo pirenaico (Canal de Berdún), de 10 de julio de 1923. Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid. Tomo XXIV, cuaderno IV, págs. 448-501.
- (2) Boletín de la Estación sismológica de Cartuja, correspondiente al mes de julio de 1923.
- (3) Datos sísmicos de España. Tercer trimestre de 1923. Revista "Ibérica", núm. 499, de 27 de octubre de 1923.
- (4) A. Rey Pastor.—Sismicidad de España y Norte de Africa en el año 1923. Revista "Ibérica", núm. 518, de 8 de marzo de 1924.
- (5) Tables de A. Mohorovičić. Publications du Bureau cent. sism. int. Série A. Travaux scientifiques. Fasc. 3, 1925.
- (6) W. Jordan.—Handbuch der Vermessungskunde, fortgesetzt

von Weil Dr. C. Reinhertz. Dritter Bund. Sechste erweiterte Auflage bearbeitet von Dr. O. Eggert. Stuttgart, 1916.

(7) Barlow's: Tables of squares, cubes, square roots, cube roots, reciprocals of all integers numbers up to 10.000. London, 1914.

(8) V. Inglada.—Cálculo de las coordenadas del foco sísmico y del instante inicial de las sacudidas por medio de las horas del principio de los sismogramas registrados en varias Estaciones próximas. Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid. Tomo XXII, cuad. IV, págs. 523-592.

(9) V. Inglada.—Contribución al estudio del megasismo japonés de 1.º de septiembre de 1923. Cálculo de las coordenadas focales y del instante inicial del terremoto principal por medio de las horas de P registradas en las Estaciones próximas. Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid. Tomo XXIII, cuad. I, págs. 47-135.

Publicado en la «Revista de la Real  
Academia de Ciencias Exactas, Físicas  
y Naturales, de Madrid». Tomo XXV,  
— — 10.º de la 2.ª serie. 1930. — —