



EL SISMO DEL BAJO SEGURA

DE 10 DE SEPTIEMBRE DE 1919

**Cálculo de las coordenadas del foco basado en la hora inicial
de los sismogramas registrados en varias estaciones próximas**

POR

VICENTE INGLADA ORS

Teniente Coronel de Estado Mayor e Ingeniero Geógrafo,
Profesor de la Escuela Superior de Guerra.

Del «Boletín del Instituto Geológico de España».

Tomo XLVII, VII de la 3.ª Serie.

MADRID
GRÁFICAS REÚNIDAS, S. A.

Calle del Barquillo, 8.

1926

EL SISMO DEL BAJO SEGURA

DE 10 DE SEPTIEMBRE DE 1919

CÁLCULO DE LAS COORDENADAS DEL FOCO, BASADO EN LA HORA INICIAL DE LOS SISMO- GRAMAS REGISTRADOS EN VARIAS ESTACIONES PRÓXIMAS

En un trabajo (1)* presentado en julio de 1925 a la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid, hemos expuesto con todo detalle un procedimiento de cálculo de las coordenadas del foco y de la hora inicial del sismo, basado en el conocimiento de las horas del principio \bar{P} del sismograma registrado en varias estaciones próximas.

Partiendo de que el foco es puntiforme o de dimensiones bastante pequeñas para ser despreciadas, se admite en dicho procedimiento que la velocidad v de las ondas sísmicas longitudinales en un punto situado a la distancia r del centro de la Tierra viene dada por la expresión

$$v = a - br^2 \quad [1],$$

en que a y b son constantes. Esta fórmula, correspondiente a un rayo sísmico circular, vale hasta una profundidad de 1.000 kilómetros y es la que más se adapta a las observacio-

* Una llamada en esta forma indica el número de orden de la Memoria en la lista bibliográfica que se inserta al fin de este trabajo.

nes sismométricas, según resulta de los trabajos fundamentales (2) sobre la propagación de las ondas sísmicas que han llevado a cabo el ilustre Sismólogo Wiechert y sus discípulos en el Instituto Geofísico de Göttingen.

Limitándonos a distancias epicentrales inferiores a 850 kilómetros, en cuyo caso el rayo sísmico atraviesa solamente la capa exterior de la corteza, es decir, no penetra a profundidad mayor de 57 kilómetros, la ley expresada por la ecuación [1] podrá aceptarse sin el menor escrúpulo, pues en tan delgada capa no hay superficie alguna de discontinuidad; admitiendo también, según resulta de un trabajo fundamental de B. Gutenberg (3), que la velocidad v_0 de las ondas sísmicas longitudinales es

$$v_0 = 5,55 \pm 0,05 \text{ km/seg.} \quad [2]$$

en la superficie terrestre y

$$v_{0,7} = 5,7 \pm 0,2 \text{ km/seg.} \quad [3]$$

a la profundidad de 57 kilómetros, donde está la superficie de discontinuidad que divide la corteza terrestre en dos capas del mismo espesor sensiblemente (4) (la zona de fractura y la de fluidez), las constantes a y b de [1] se calculan fácilmente y esta fórmula se convierte en

$$v = 0,002193116 - 0,001321846 \cdot r^2 \quad [4],$$

donde r se supone expresado en partes del radio medio terrestre R , o sea tomando como unidad $R = 6.370$ kilómetros.

Los elementos del rayo sísmico circular (radio, longitud, tiempo de recorrido) que corresponde a una cierta distancia epicentral Δ y a una profundidad h del foco, ambas conocidas, se determinan fácilmente; pero el problema admite mayor simplificación, pues dada la práctica corriente de las estaciones

ras, los valores más probables de x_0 , y_0 , τ se sacarán de las ecuaciones normales:

$$\left. \begin{aligned} [aa]x_0 + [ab]y_0 - [ac]\tau &= [al] \\ [bb]y_0 - [bc]\tau &= [bl] \\ [cc]z &= -[cl] \end{aligned} \right\} \quad [10]$$

empleando la tradicional notación de Gauss.

Los valores de x_0 , y_0 así hallados nos dan las coordenadas del epicentro, de importancia sin igual en las investigaciones sísmicas. El de τ nos permite hallar en seguida la hora inicial del sismo en el foco.

Conocidas x_0 , y_0 y τ , el sistema [6] nos permite calcular con suma sencillez el valor de z_0 , que es la profundidad del foco sísmico, y restando de la hora del sismo en el foco, ya calculada, el tiempo que el movimiento tarde en recorrer la distancia z_0 a la velocidad de 5,7 kilómetros seguidos, se tendrá la hora del sismo en el epicentro.

Cuando el sismo es terrestre y se dispone de información macrosísmica suficiente y de garantía, se puede efectuar el trazado de las isosistas y deducir de él las coordenadas del epicentro. Conocidas x_0 e y_0 , las ecuaciones [6] permiten calcular con mayor sencillez las otras dos incógnitas, o sea la profundidad hipocentral y la hora del sismo en el hipocentro.

En el trabajo (1) presentado a la Real Academia de Ciencias de Madrid, hemos hecho aplicación de nuestro procedimiento a los dos sismos de la Europa Central de 16 de noviembre de 1911 y 20 de julio de 1913, dando por conocidas las coordenadas epicentrales que calcula Gutenberg (5) en un admirable estudio de dichos sismos, y hallado para valor de la profundidad hipocentral el de 55 kilómetros, que coincide exactamente con el obtenido por él valiéndose de otros procedimientos más laboriosos y complicados.

En otra Memoria (6) presentada también a la Real Academia de Ciencias de Madrid en octubre último, se ha hecho aplicación de la misma teoría al sismo del bajo Segura de 10 de septiembre de 1919, el cual ofrece particular interés, pues el material de observación, tanto macrosísmica como instrumental, con que se cuenta, permite determinar con suficiente precisión las coordenadas del foco y las horas iniciales de las sacudidas.

En otro trabajo (7), basado en el material de observación macrosísmica de dicho temblor de tierra que enviaron las diversas localidades de las provincias de Alicante y Murcia, y en los reconocimientos hechos por la Comisión que para estudiar el sismo nombró el Instituto Geográfico, y a la cual tuvimos el honor de pertenecer, hemos presentado el trazado de las isosistas de mayor intensidad, de las que resulta que las dimensiones del foco sísmico deben ser en este caso muy pequeñas, pues la isosista de grado máximo sólo tiene un radio medio de seis a siete kilómetros, como puede verse en la figura que acompaña al presente trabajo. Esta circunstancia favorable permite aplicar nuestra teoría al sismo del bajo Segura y tomar como coordenadas epicentrales

Latitud: $\varphi = 38^{\circ}-4'-30''$ N; longitud: $\lambda = 51^{\circ}-46'$ O. Gr.,

que corresponden al punto marcado en la figura, con error que no excede de dos a tres kilómetros.

Partiendo de estas coordenadas epicentrales hemos procedido en el trabajo ya citado (6) a calcular la profundidad hipocentral utilizando cuatro métodos que nos dieron los valores respectivos de 57, 57, 58, 57, 55 y 46,3 kilómetros, cuyo promedio de 55 se ha tomado como valor de dicha profundidad con un error probable de dos kilómetros.

Determinada la profundidad hipocentral se ha pasado a la obtención de la hora inicial, en el epicentro e hipocentro, de

las cinco sacudidas más importantes registradas en el primer día y que se supone irradian del mismo foco. Estas horas son las siguientes:

	HORA EPICENTAL	HORA FOCAL
1. ^a sacudida....	10h - 40 ^m - 41 ^s	10h - 40 ^m - 31,3 ^s del 10 de septiembre.
2. ^a »	10h - 56 ^m - 53,8 ^s	10h - 56 ^m - 44,1 ^s » » » »
3. ^a »	11h - 59 ^m - 10,7 ^s	11h - 59 ^m - 1 ^s » » » »
4. ^a »	14h - 22 ^m - 39,3 ^s	14h - 22 ^m - 29,6 ^s » » » »
5. ^a »	0h - 38 ^m - 34,8 ^s	0h - 38 ^m - 25,1 ^s » 11 » »

Los errores de estas horas pueden evaluarse en un segundo o segundo y medio.

Pero la marcha seguida en esta investigación ha sido la de suponer conocidas las coordenadas epicentrales y, tomándolas como base, hallar los valores de la profundidad hipocentral y de la hora inicial del sismo. La gran precisión de los resultados obtenidos era una prueba concluyente en favor de nuestro procedimiento; pero quedaba la duda de si aplicando el cálculo a la obtención de las tres coordenadas del foco, utilizando solamente las horas de \bar{P} facilitadas por el registro instrumental y prescindiendo de los datos de la información macrosísmica, los valores hallados así para las coordenadas epicentrales coincidirían sensiblemente con las que resultan de dicha información y de los reconocimientos hechos sobre el terreno a raíz del sismo.

Esto nos sugirió la idea del presente trabajo, para decidir si existía o no tal coincidencia y la precisión a que podría llegar la teoría en la determinación de los elementos primordiales de los temblores de la tierra, y por eso lo vamos a exponer indicando sólo los resultados del cálculo para no alargar excesivamente esta nota.

Suponiendo que las cinco sacudidas primeras del sismo de 10 de septiembre de 1919, que se sucedieron en un intervalo

menor que veinticuatro horas, corresponden a un mismo foco, cuyas coordenadas se trata de calcular, podremos agrupar los datos facilitados por las estaciones sismológicas como si se tratara de un solo sismo. Eligiendo los promedios que se obtienen para cada estación, según resulta del estudio crítico hecho en nuestro trabajo (6), las horas de \bar{P} que nos servirán de dato, referidas, por ejemplo, a la primera sacudida, son las siguientes:

Alicante.....	10 ^h - 40 ^m - 46 ^s	}	(11).
Almería.....	41 ^m - 9,6 ^s		
Cartuja.....	41 ^m - 20 ^s		
Ebro.....	41 ^m - 31 ^s		
Toledo.....	41 ^m - 33,7 ^s		
Málaga.....	41 ^m - 34 ^s		

De las demás estaciones (Fabra y San Fernando, así como las extranjeras) se ha prescindido, pues según hemos demostrado en el trabajo tantas veces citado (6), el empleo de datos registrados a distancia epicentral mayor que 350 kilómetros no influye de modo sensible en el resultado del cálculo de que estamos tratando.

Eligiendo como plano xy la superficie del geoide, por eje de las z la vertical correspondiente a la estación sismológica de Toledo y por ejes horizontales las direcciones Este-Oeste para el de las x y la Norte-Sur para el de las y , las coordenadas rectangulares de los diversos observatorios, en kilómetros redondos, son las siguientes, prescindiendo de la z , por ser su valor menor que 1 en este caso:

COORDENADAS RECTANGULARES
DE LAS ESTACIONES SISMOLÓGICAS ESPAÑOLAS
(ORIGEN: TOLEDO)

	X	Y
	—	—
	Kilómetros	Kilómetros
Alicante	+ 303	- 168
Almería.....	+ 133	- 336
Cartuja	+ 37	- 300
Ebro.....	+ 386	+ 108
Toledo.....	0	0
Málaga.....	- 32	- 349

En virtud de estos datos y los [11], el sistema de ecuaciones [8] correspondiente a este caso será:

$$\begin{array}{l}
 \text{Almería.....} \quad 170 x_0 + 168 y_0 + 767 \tau = 3.709 \\
 \text{Cartuja.....} \quad 266 x_0 + 132 y_0 - 1.105 \tau = 33.111 \\
 \text{Ebro.....} \quad 83 x_0 - 276 y_0 - 1.462 \tau = -12.582 \\
 \text{Toledo.....} \quad 303 x_0 - 168 y_0 - 1.550 \tau = 96.981 \\
 \text{Málaga.....} \quad 335 x_0 + 181 y_0 - 1.560 \tau = 36.032
 \end{array} \quad [12],$$

que resulta de restar la ecuación correspondiente a Alicante de cada una de las demás y cuyo nombre se consigna a la izquierda.

Antes de aplicar el método de los mínimos cuadrados a estas ecuaciones lineales, hallaremos valores aproximados de las incógnitas x_0 , y_0 y τ . Resolviendo tres de las ecuaciones precedentes se halla como valor aproximado de τ el de 12,5, y para x_0 e y_0 tomaremos las coordenadas del epicentro que han resultado del trazado de las isosistas y que son: $x = + 271$ e $y = - 198$.

Haciendo, pues, $x_0 = 271 + \alpha$, $y_0 = - 198 + \beta$, $\tau =$

$= 12,5 + \gamma$, en que α , β y γ son las pequeñas correcciones que hay que calcular, el sistema [12] se transforma en:

$$\left. \begin{aligned} 170 \alpha + 168 \beta - 767 \gamma &= 546 \\ 266 \alpha + 132 \beta - 1.105 \gamma &= 970 \\ 83 \alpha + 276 \beta + 1.462 \gamma &= 1.298 \\ 303 \alpha - 168 \beta - 1.550 \gamma &= 977 \\ 335 \alpha + 181 \beta - 1.560 \gamma &= 579 \end{aligned} \right\} [13];$$

y tomando como incógnita auxiliar $\gamma' = 10\gamma$, se convierte a su vez en:

$$\left. \begin{aligned} 170 \alpha + 168 \beta - 76,7 \gamma' &= 546 \\ 266 \alpha + 132 \beta - 110,5 \gamma' &= 970 \\ 83 \alpha + 276 \beta - 146,2 \gamma' &= 1.298 \\ 303 \alpha - 168 \beta - 155,0 \gamma' &= 977 \\ 335 \alpha + 181 \beta - 156,0 \gamma' &= 579 \end{aligned} \right\} [14].$$

Si se aplica a estas ecuaciones la teoría de los mínimos cuadrados, se llega al sistema de ecuaciones normales:

$$\left. \begin{aligned} 310.579 \alpha + 96.311 \beta - 129.522 \gamma' &= 948.570 \\ 96.311 \alpha + 182.809 \beta + 10.683 \gamma' &= 518.679 \\ -129.522 \alpha + 10.683 \beta + 87.829 \gamma' &= -201.054 \end{aligned} \right\} [15],$$

cuya resolución nos da los valores más probables de las correcciones:

$$\alpha = +6,2868, \quad \beta = -0,88921, \quad \gamma' = +7,0903 \text{ y } \gamma = 0,70903 \dots [16].$$

Limitándonos a la aproximación que puede exigirse, ya que las coordenadas de las estaciones sismológicas se han expresado en kilómetros redondos, las coordenadas del epicentro serán:

$$x_0 = 277,3 \text{ km.} \quad y_0 = -197,1.$$

Sustituyendo los valores [16] de α , β , γ' en las ecuaciones de condición [14], se hallan los errores residuales, que son, respectivamente:

$$v_1 = +170,4, \quad v_2 = +198,6, \quad v_3 = -15, \quad v_4 = +21,7 \text{ y } v_5 = -260,1$$

mediante los cuales se puede determinar el error medio de

una de dichas ecuaciones, que es: $\pm 261,6$, y los de las incógnitas, que son, respectivamente: el de x_0 , $\pm 1,16$; el de y_0 , $\pm 0,95$, y el de τ , $\pm 0,20$. Los errores probables son: 0,71, 0,63 y 0,13.

Estos resultados muestran elocuentemente la gran precisión del procedimiento de que estamos tratando, pues el error probable de las coordenadas epicentrales no llega a un kilómetro.

Hemos de advertir que al hallar los errores probables hemos supuesto exactas las coordenadas de las estaciones sismológicas, es decir, hemos prescindido de los errores de posición de los Observatorios, que quedan incluidos en el grado de apreciación de que hemos partido al expresar aquéllas en kilómetros redondos.

Si se comparan los valores más probables de las coordenadas epicentrales que acabamos de calcular:

$$x_0 = 277,3 \text{ kilómetros} \quad \text{e} \quad y_0 = -197,1 \text{ kilómetros}$$

con las que resultan del trazado de las isosistas

$$x_0 = +271 \quad \text{e} \quad y_0 = -198,$$

se advierte que las y difieren en menos de un kilómetro y las x en unos seis, resultado que no puede ser más satisfactorio, ya que los errores que resultan de haber supuesto plana la superficie terrestre en la extensión que consideramos y de haber referido todos los puntos al meridiano y paralelo de Toledo, lleva consigo discrepancias de dicho orden en los valores relativos de las coordenadas del epicentro y de las estaciones sismológicas.

Como la posición del epicentro es sensiblemente la misma que la que ha dado el trazado de las isosistas y en la que hemos basado nuestro trabajo ya citado (6), dedicado al cálculo de la profundidad hipocentral y de la hora inicial del sismo en

el foco y en el epicentro, creemos innecesario repetir el cálculo, cuyos resultados hemos consignado ya, y remitimos a la referida Memoria a los Sismólogos que deseen conocer al detalle la marcha del procedimiento.

En virtud de lo dicho podemos llegar a la conclusión de que la teoría que hemos expuesto en resumen en esta nota, permite hallar con gran aproximación las coordenadas del foco sísmico, cuando se conoce el principio del sismograma registrado en varias estaciones próximas, y este procedimiento presenta suma utilidad en las débiles sacudidas que no han permitido recoger suficiente material de observación macrosísmica y aun en aquellos sismos destructores, como el terrible del Japón del 1 de septiembre de 1923, en que por tratarse de un foco submarino, las isosistas se presentan como líneas abiertas y es imposible valerse de ellas para la localización del epicentro.

BIBLIOGRAFÍA

1. VICENTE INGLADA: *Cálculo de las coordenadas del foco sísmico y del instante inicial de la sacudida 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, págs. 523-592 (junio, 1926).

2. UEBER ERDBEBENWELLEN.—I. WIECHERT, E.: *Teoretisch über die Ausbreitung der Erdbebenwellen.* Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. Math-phys. Klasse, 1907, págs. 415-529. II.—ZÖPPRITZ, K. und GEIGER, L.: *Laufzeitkurven.* Loco citato, 1909, páginas 529-549. —III. ZÖPPRITZ, K. und GEIGER, L.: *Berechnung von Weg und Geschwindigkeit der Vorläufer. Die Poissonsche Konstante im Erdinnern.* L. c., 1909, págs. 400-428. —V. ZÖPPRITZ, K., GEIGER, L. und GUTENBERG, B.: *Konstitution des Erdinnern, erschlossen aus den Bodenverrückungen der einmal reflektierten zu den direkten longitudinalen Erdbebenwellen und einige andere Beobachtungen über Erdbebenwellen.* L. c., 1912, páginas 121-206. —VI. GEIGER, L. und GUTENBERG, B.: *Konstitution des Erdinnern, erschlossen aus der Intensität longitudinaler und transversaler Erdbebenwellen und einiger Beobachtungen an den Vorläufern.* L. c., 1912, págs. 623-675. VII. A. GUTENBERG, B.: *Beobachtungen an Registrierungen von Fernbeben zu Göttingen und Folgerungen über die Konstitution des Erdkörpers.* L. c., 1914, págs. 1-52.

3. GUTENBERG, B.: *Neue Auswertung der Aufzeichnungen der Erdbebenwellen infolge der Explosion von Oppau.*—Physikalische Zeitschrift *Enero*, 1925.

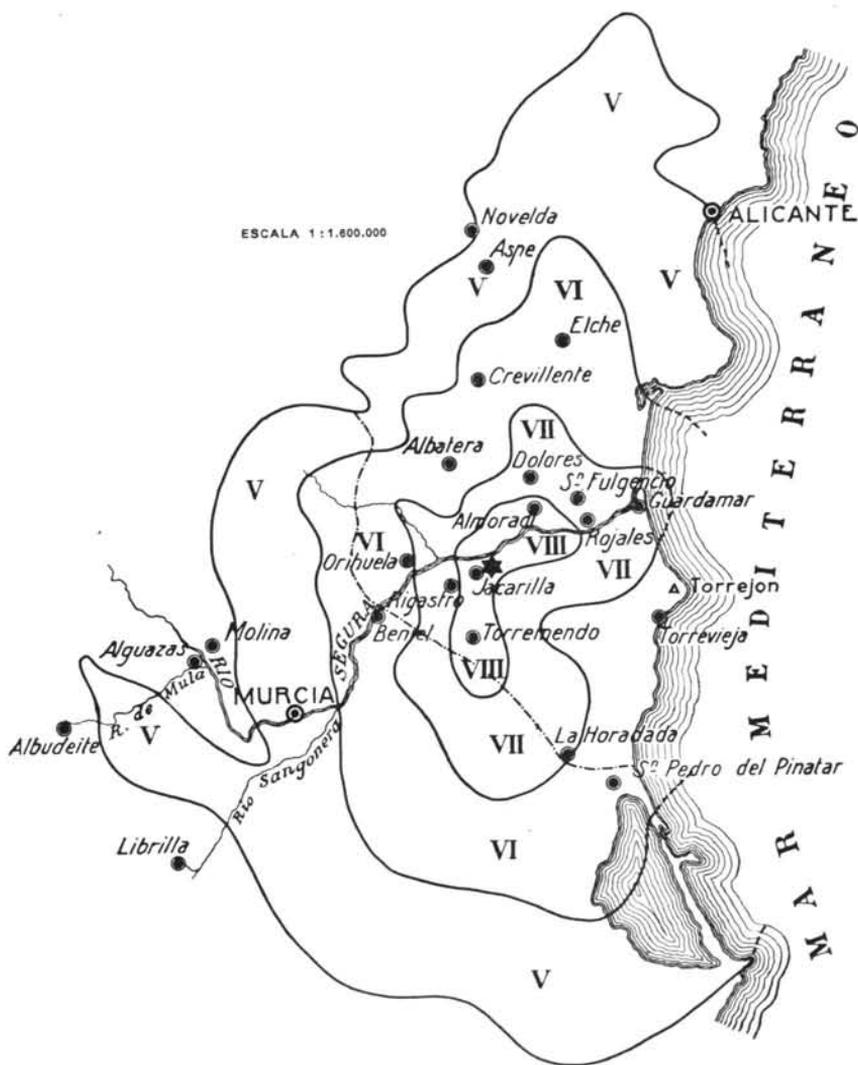
4. VICENTE INGLADA: *La corteza terrestre.*—Madrid. Instituto Geográfico, 1923.

5. GUTENBERG, B.: *Die mitteleuropäischen Beben vom 16 November 1911 und 20 Juli 1913.*—I. Herausgegeben von O. Hecker. Veröffent

des Zentralbüros d. Int. seis. Assoziation Strasburg, 1915, 84 páginas y un atlas de 32 láminas.

6. VICENTE INGLADA: *Estudios de sismos españoles.—El terremoto del bajo Segura de 10 de septiembre de 1919. Cálculo de su profundidad hipocentral y de la hora inicial de sus sacudidas en el foco y en el epicentro.*—Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid. Tomo XXIII, págs. 47-135 (octubre, 1926).

7. VICENTE INGLADA: *Nuevas fórmulas para abreviar el cálculo de la profundidad aproximada del foco sísmico por el método de Köveslighegy y su aplicación a algunos temblores de tierra.* Págs. 47 a 50. Madrid. Instituto Geográfico, 1921.



★ Punto epicentral a que se refieren las distancias medias de las isosistas

Mapa de las Isosistas del terremoto de 10 de septiembre de 1919 en el Bajo Segura.