

CORRECCION DE LA LINEA BASE DE REGISTROS DE TEMBLORES

O. Rascón*
M. Chavez*
L. Alonso*
V. Palencia*

ABSTRACT

In this paper a new method for the base line correction of earthquake accelerograms is used, which can also be useful for another kind of vibration records of soils or structures. It is also included a catalogue of accelerograms, velocity and ground displacement histories, and elastic response spectra corresponding to structural damping of 0, 2, 5, 10 and 20 per cent for some of the earthquakes recorded in Mexico City and Acapulco, Gro, during the period from 1961 to 1968.

RESUMEN

En este trabajo se utiliza un nuevo método para la corrección de la línea base de los acelerogramas de temblores, el cual puede emplearse también para otro tipo de registros de vibraciones de suelos o estructuras. Se presenta, además, un catálogo de los acelerogramas, de las historias de velocidad y desplazamiento del terreno, y de los espectros de respuesta elástica lineal para amortiguamientos estructurales de 0, 2, 5, 10 y 20 por ciento, correspondientes a algunos de los temblores registrados en la ciudad de México y en Acapulco, Gro, de 1961 a 1968.

* Instituto de Ingeniería, UNAM.

CORRECCION DE LA LINEA BASE DE REGISTROS DE TEMBLORES

1. INTRODUCCION

La información principal con que cuenta la ingeniería sísmica proviene generalmente de los registros (acelerogramas) de temblores, o sea gráficas de la aceleración del terreno en un sitio dado, vs tiempo, los cuales se obtienen mediante un aparato denominado acelerógrafo (ref 1), cuyo advenimiento en 1933, ha permitido estudiar mejor algunos fenómenos asociados a los temblores, tanto en sismología como en ingeniería civil.

Un problema que se ha estudiado desde la aparición del acelerógrafo es el de cómo obtener la máxima información confiable de los acelerogramas, para lo cual se han considerado dos aspectos esenciales: uno de ellos se refiere a la evaluación de los sistemas de operación y mantenimiento de los acelerógrafos (ref 2); el otro, se relaciona con los métodos de digitización y procesamiento óptimo de los acelerogramas (ref 3).

La digitización de un acelerograma consiste en representar el registro continuo mediante puntos característicos del mismo. El procedimiento consiste en calcular, entre otras cosas, la velocidad y el desplazamiento del terreno, y los espectros de respuesta, todo lo cual requiere conocer de antemano la posición de la línea de aceleraciones nulas, denominada línea base. Esto ha motivado la necesidad de ajustar una línea base a las aceleraciones registradas, utilizando procedimientos matemáticos que en general introducen errores que se suman a los que se generan durante la discretización del registro.

Dado que algunos registros de temblores que se han presentado en la zona blanda de la ciudad de México no han sido corregidos eficientemente con los métodos tradicionales, en este trabajo se utiliza un método propuesto recientemente para ajustar la línea base de los acelerogramas (ref 4). Además, se describen algunas investigaciones relacionadas con este problema y los resultados de las pruebas efectuadas al aplicarlas a un acelerograma de forma senoidal. Finalmente, se presenta una muestra de los resultados obtenidos al procesar los sismos registrados en la ciudades de México y Acapulco de 1961 a 1968.

2. LECTURA DE ACELEROGRAMAS

Para procesar los acelerogramas es necesario digitizarlos previamente, es decir, representar la traza continua del registro mediante puntos que lo caracterizan. Cada punto tiene como abscisa el tiempo medido a partir del inicio del registro, y como ordenada la aceleración medida a partir de una línea arbitraria, que conviene sea la señal continua que viene aparejada a cada componente, con lo cual se elimina bastante el efecto del movimiento transversal del papel de registro. El número de puntos que definen el acelerograma es función de su contenido de frecuencias. La lectura o digitización de los acelerogramas se puede efectuar a través de los siguientes métodos.

2.1 Amplificación

Consiste básicamente (ref 5) en amplificar diez veces el registro mediante un proyector, y con una escala cuya aproximación es de 0.1 mm leer las ordenadas del acelerograma asociadas a cada abscisa previamente fijada en el registro; finalmente, las coordenadas así obtenidas se perforan manualmente en tarjetas para computadora digital.

2.2 Lectura directa

La lectura directa del registro se efectúa con un lector de coordenadas X-Y Benson-Lehner sobre el cual se coloca el acelerograma, y mediante la intersección de dos líneas del aparato se eligen los puntos que a juicio del operador definen el registro. Este procedimiento tiene la ventaja de ser mucho más rápido que el anterior, de proporcionar flexibilidad respecto al número de puntos que definen el acelerograma, y de permitir la obtención automática de las tarjetas con las coordenadas de dichos puntos.

2.3 Revisión de acelerogramas leídos

Para revisar los datos digitizados de los acelerogramas leídos usando cualquiera de los procedimientos mencionados en los subcapítulos 2.1 y 2.2, se pensó aplicar a ambos grupos de datos un proceso de revisión, que consiste en lo siguiente: poner en forma gráfica, en computadora digital, los datos de los diversos componentes de los sismos, y obtener negativos de los registros originales respectivos, los que se proyectan sobre las gráficas suministradas por la computadora, que tienen las escalas de tiempos y de aceleraciones adecuadas a fin de que a cierta distancia de proyección, coincidan ambos registros. Los puntos que no coinciden se modifican en las tarjetas respectivas hasta lograr una buena concordancia del negativo con la gráfica correspondiente. Este procedimiento de revisión fue sugerido por Horacio Sandoval, Gerardo López y Alfonso Quiroz.

3. ERRORES EN LOS ACELEROGRAMAS DIGITIZADOS

Los errores que se presentan con el uso de los acelerogramas son de dos tipos: los que se generan cuando se registra el sismo, y los que ocurren durante el procesamiento de los acelerogramas. Al primer tipo corresponden los errores inherentes al acelerógrafo y a los efectos de la estructura en que se instala el aparato. El segundo grupo de errores ocurre cuando a) se digitiza el acelerograma, b) se ajusta la línea base, y c) se utilizan los acelerogramas corregidos para calcular, por ejemplo, la velocidad y el desplazamiento del terreno y los espectros de respuesta.

3.1 Errores de tipo instrumental

Respecto a los errores de tipo instrumental, en la ref 3 se describen algunas pruebas realizadas con objeto de examinar el comportamiento de los acelerógrafos sujetos a movimientos de baja frecuencia. Dichas pruebas consistieron en excitar una mesa, sobre la que se colocó un acelerógrafo, con una onda senoidal cuyo periodo variaba entre 10 y 35 seg, y en registrar en forma simultánea la perturbación y la respuesta del aparato. Las aceleraciones registradas se digitizaron y se les ajustó una línea base mediante un procesamiento que consistió en minimizar el error medio cuadrático de la aceleración. Los acelerogramas resultantes se integraron dos veces para obtener las gráficas

de desplazamientos correspondientes. De la comparación de estos desplazamientos con los calculados, se llegó a las siguientes conclusiones:

- a) La concordancia entre los desplazamientos registrados y los calculados para periodos cercanos a 10 y 12 seg fue muy satisfactoria; para periodos cercanos a los 20 seg aunque fue aceptable, se observaron pequeñas diferencias que revelaron la presencia de errores aleatorios de digitización. Para un periodo cercano a los 35 seg, la concordancia no fue satisfactoria.
- b) Los desplazamientos calculados utilizando la doble integración fueron aceptables hasta periodos de casi 16 seg, valor que se propuso como límite superior para obtener desplazamientos confiables del terreno.
- c) Los errores de alta frecuencia en los registros se suavizan por la doble integración, por lo que no afectan en forma significativa la exactitud del desplazamiento.

También se presentan errores de tipo instrumental debido al movimiento transversal del papel o película fotográfica en el mecanismo del acelerógrafo, lo que puede generar errores con amplitudes hasta de varios milímetros en la grabación; sin embargo, es factible eliminarlos en gran parte si el acelerograma y la traza fija correspondiente se digitizan, y se restan las ordenadas de esta última de las del acelerograma (ref 3).

3.2 Errores de digitización

Con relación al tipo de errores que se genera durante la digitización del registro, en la ref 6 se mencionan las diferencias de criterio tan notorias respecto al número de puntos usados para definir el componente N 21°E del sismo de Taft, Calif, 1952, por el personal de cuatro instituciones norteamericanas. La línea base de los datos obtenidos se corrigió empleando un mismo método, y se integraron los resultados para obtener las gráficas de velocidades y desplazamientos, y los espectros de respuesta respectivos. Con base en los resultados obtenidos se llegó a las siguientes conclusiones:

- a) Las gráficas de velocidades fueron muy parecidas entre sí
- b) Las gráficas de desplazamientos y los espectros de respuesta presentaron marcadas diferencias, debido a errores de lectura de naturaleza aleatoria.

Por otra parte, en la ref 7 se describen las pruebas realizadas para estimar los errores de digitización en un registro de una función muestra de un proceso estocástico no estacionario, con condiciones inicial y final conocidas, y expresiones analíticas cerradas para las curvas de velocidad y desplazamiento respectivas. Las conclusiones obtenidas en esta referencia son análogas a las de la ref 6; además, se menciona que los errores de lectura pueden ocasionar que los errores en los espectros de respuesta sean hasta de un diez por ciento.

Por último, en la ref 3 se presentan estudios relacionados con los errores de periodo largo introducidos en la digitización de los acelerogramas. Para estudiar estos errores se les dividió en varios grupos, de los cuales los más importantes fueron:

- a) Errores sistemáticos debidos a imperfecciones del mecanismo lector de coordenadas X - Y
- b) Errores aleatorios generados durante el proceso de lectura causados por la inadecuada apreciación del ojo humano.

Para estudiar ambos tipos de errores, se digitizó cinco veces un acelerograma consistente en una línea recta utilizando cuatro operadores. Del análisis estadístico de los datos así obtenidos se concluyó que los errores aleatorios tienen distribución normal y son del mismo orden de magnitud que los errores sistemáticos, siendo pequeños para periodos de onda intermedia y muy grandes para periodos largos.

A fin de determinar la influencia de los dos grupos de errores sobre los desplazamientos calculados, se integraron los datos dos veces suponiendo condiciones iniciales nulas de velocidad y desplazamiento. Al examinar estadísticamente estos resultados se observó que todas las curvas así calculadas tenían la misma forma, lo cual demostró la existencia de errores sistemáticos; analizando cada una de ellas se detectaron errores aleatorios. Finalmente, se concluyó que la media de los errores combinados en el desplazamiento es relativamente pequeña para periodos menores de 16 seg, aumentando rápidamente para periodos mayores que este valor; esta última conclusión coincidió en forma aceptable con la que se expresó en el subcapítulo 3.1.

4. ANTECEDENTES SOBRE LOS METODOS PARA AJUSTAR LA LINEA BASE

Debido a que al digitizar un acelerograma, esto se hace respecto a

una línea base arbitraria, y a que durante el proceso de digitización se incurre en los errores ya citados, es necesario corregir la línea base original, es decir, ajustar la de aceleraciones nulas. Algunos procedimientos propuestos se presentan enseguida.

4.1 Velocidad final nula

Este procedimiento consiste en trasladar uniformemente la línea base original a fin de obtener al final del registro una velocidad nula; sin embargo, con este método se obtienen en general desplazamientos máximos del terreno inaceptables, como el que se menciona en la ref 8; así, para el componente N-S del sismo de El Centro, Calif, del 18 de mayo de 1940, con duración de 30 seg, se obtuvo por este procedimiento un desplazamiento máximo de 4.6 m.

4.2 Velocidad final nula por suma de impulsos

Consiste en aplicar una serie de impulsos al acelerograma haciendo que el diagrama de velocidades oscile con respecto a su línea de ceros hasta obtener una velocidad final nula. En la ref 8 se hace ver que para el mismo componente, utilizando dos impulsos iniciales y ocho corrimientos intermedios, se obtuvo un desplazamiento máximo de 21 cm, resultado bastante aceptable. Este método tiene el inconveniente (ref 6) de que dos personas trabajando independientemente con el mismo procedimiento obtienen resultados diferentes, ya que la magnitud y punto de aplicación de los impulsos queda a juicio de ellas.

4.3 Corrección parabólica considerando condiciones iniciales nulas

Estriba en sumar a la aceleración un polinomio de segundo orden ($C_0 - C_1t - C_2t^2$), cuyos coeficientes se calculan minimizando el cuadrado medio de la velocidad corregida. El procedimiento de minimización ha sido examinado exhaustivamente en varias investigaciones (refs 5, 6, 7 y 9), y las fórmulas obtenidas para los coeficientes son:

$$C_0 = \frac{-300 \int_0^S v(t)t \, dt}{S^3} + \frac{900 \int_0^S v(t)t^2 \, dt}{S^4} - \frac{630 \int_0^S v(t)t^3 \, dt}{S^5} \quad (1)$$

$$C_1 = \frac{1800 \int_0^S v(t)t \, dt}{S^4} - \frac{5760 \int_0^S v(t)t^2 \, dt}{S^5} + \frac{4200 \int_0^S v(t)t^3 \, dt}{S^6} \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{-1800 \int_0^S v(t)t \, dt}{S^5} + \frac{6300 \int_0^S v(t)t^2 \, dt}{S^6} - \frac{4725 \int_0^S v(t)t^3 \, dt}{S^7} \quad (3)$$

donde $v(t)$ es la velocidad obtenida al integrar una vez el acelerograma sin corregir, y S la duración del registro; además, se supone que para $t = 0$ la velocidad y el desplazamiento son nulos.

Al aplicar este método al componente N-S del temblor registrado en El Centro (18 de mayo de 1940), el desplazamiento máximo fue de 29 cm (ref 10). Este procedimiento, aunque también es arbitrario, tiene ventajas sobre otros métodos desde el punto de vista matemático, ya que se basa en un sistema de optimación por mínimos cuadrados. Además, al aplicarlo a un número considerable de sismos, los resultados han sido aceptables.

En la ref 9 se presentan tres métodos para calcular las expresiones 1 a 3, de los cuales se recomienda uno de ellos sobre la base de minimizar el error en el cálculo de la integral de la velocidad.

Se ha observado (ref 11) que los errores en los acelerogramas digitizados causados por la distorsión que sufre el registro, se reducen en muchos casos mediante dicha corrección. También se ha demostrado que los periodos parásitos introducidos al acelerograma por este método de corrección de línea base no afectan en forma notable la exactitud de los espectros de respuesta calculados para periodos menores de 5 seg. Sin embargo, se ha encontrado que para acelerogramas de duración intermedia o larga, los resultados pueden no ser satisfactorios (refs 5 y 11); esto se debe a que los errores introducidos por la digitización y por el movimiento transversal del papel en el acelerógrafo afectan principalmente los componentes de periodos intermedios y largos del registro, lo que aumenta de importancia cuando los periodos dominantes del movimiento son largos; tal es el caso de la zona

blanda del Valle de México, como puede apreciarse en los resultados de la ref 5, en la cual, inclusive, se mejoró el procedimiento ajustando varias parábolas en vez de una sola.

4.4 Corrección parabólica considerando velocidad inicial diferente de cero

Una variante del método anterior se presenta en la ref 12, en la cual se establece que no existe razón justificada para suponer que la velocidad inicial del terreno es nula, por lo que la constante de integración K que aparece al integrar la aceleración corregida, debe incluirse en el sistema de ecuaciones que resulta al minimizar el cuadrado medio de la velocidad corregida. Esta constante, si bien no interviene en forma explícita en la expresión de la aceleración corregida, sí modifica el valor de las otras constantes. En este caso, las constantes se calculan con las expresiones:

$$K = \frac{16 \int_0^S v(t) dt}{S} - \frac{120 \int_0^S v(t) t dt}{S^2} - \frac{240 \int_0^S v(t) t^2 dt}{S^3} - \frac{140 \int_0^S v(t) t^3 dt}{S^4} \quad (4)$$

$$C_0 = \frac{-120 \int_0^S v(t) dt}{S^2} + \frac{1200 \int_0^S v(t) t dt}{S^3} - \frac{2700 \int_0^S v(t) t^2 dt}{S^4} + \frac{1680 \int_0^S v(t) t^3 dt}{S^5} \quad (5)$$

$$C_1 = \frac{480 \int_0^S v(t) dt}{S^3} - \frac{5400 \int_0^S v(t) t dt}{S^4} + \frac{12960 \int_0^S v(t) t^2 dt}{S^5} - \frac{8400 \int_0^S v(t) t^3 dt}{S^6} \quad (6)$$

$$C_2 = \frac{-420 \int_0^S v(t) dt}{S^4} + \frac{5040 \int_0^S v(t) t dt}{S^5} - \frac{12600 \int_0^S v(t) t^2 dt}{S^6} + \frac{8400 \int_0^S v(t) t^3 dt}{S^7} \quad (7)$$

donde $v(t)$ es la velocidad que resulta al integrar una vez la aceleración no corregida, y S es la duración del registro.

4.5 Por medio de un filtro pasa-alta*

Este procedimiento se basa en la interpretación física del problema de que las señales reales permanezcan en el registro, mientras que las parásitas de periodo largo, introducidas durante el registro o la digitización, se eliminan (ref 3).

De las pruebas acerca de errores en los acelerogramas digitizados, se concluyó que para periodos de excitación mayores de 16 seg las señales introducidas durante la digitización producen valores excesivos del desplazamiento (ref 3). Con base en este resultado, se propuso una corrección de la línea base que consiste en eliminar mediante un filtro digital del acelerograma no corregido, los periodos mayores de 16 seg.

Al aplicar este método al componente N21E del sismo registrado en Taft, el desplazamiento máximo fue de 11 cm aproximadamente, mientras que con la corrección parabólica resultó de 26 cm.

5. METODO PARA AJUSTE DE LINEA BASE EMPLEADO EN ESTE TRABAJO

En la actualidad se cuenta con registros de sismos en la zona arcillosa de la ciudad de México, que presentan grandes distorsiones transversales ocasionadas por movimientos indebidos del papel en esa dirección (fig 1). Las correcciones de la línea base han dado como resultado desplazamientos calculados del terreno demasiado grandes, por lo que se consideró necesario procesarlos con el método de la ref 4, con el que se obtienen desplazamientos de magnitud razonables.

El procedimiento consiste básicamente en combinar las ventajas del filtro pasa-alta (subcapítulo 4.5) del ajuste parabólico con condiciones iniciales (velocidad y desplazamiento) no nulas, y de los promedios móviles (ref 13).

Brevemente, los pasos del método son:

1. Interpolar el acelerograma a intervalos de tiempo constantes, t . Para registros en terreno duro se tomó $t = 0.02$; para suelo blando, $t = 0.04$ seg.
2. Trasladar la línea base original hasta situarla a la altura de la aceleración media nula, restándole a cada ordenada el promedio aritmético de todas las aceleraciones.

3. Diezmar el registro reteniendo uno de cada N puntos con objeto de reducir el tiempo de computadora destinado a corrección. El valor de N depende del contenido de frecuencias que visualmente se puedan detectar en el registro. Así, para los acelerogramas registrados en terreno duro se tomó $N = 5$, y en blando $N = 3$; es decir, los nuevos incrementos de tiempo fueron $\Delta t = 0.1$ y 0.12 seg, respectivamente.
4. Obtener una línea base preliminar $l_1(t_i)$, eliminando parcialmente las ondas de alta frecuencia del acelerograma mediante promedios móviles de orden n (ref 13). En todos los casos se usó $n = 25$, con lo cual se eliminó parte de las ondas de periodos menores de $25 \times 0.1 = 2.5$ seg en registros obtenidos en terreno duro, y $25 \times 0.12 = 0.3$ seg en terreno blando.
5. Obtener una nueva línea base $l_2(t_i)$, pasando a $l_1(t_i)$ por el filtro digital de Ormsby (ref 14), con frecuencia de corte de 0.07 Hz, mediante el cual se eliminan casi por completo las ondas con periodos menores de 16 seg.
6. Interpolación de $l_2(t_i)$ a cada t original. La línea base resultante se denotará como $l_3(t_i)$.
7. Calcular el acelerograma corregido, restando al que se obtuvo en el punto 3 de la línea base $l_3(t_i)$. Por tanto, este nuevo acelerograma casi no contendrá ondas con periodos mayores de 16 seg, que son las que se pretende eliminar, de acuerdo con lo descrito en capítulos anteriores.
8. Ajustar una nueva línea base al acelerograma mediante una parábola de segundo orden, con velocidad inicial (WBOYCE) o velocidad y desplazamiento iniciales diferentes de cero (DESMIN). El acelerograma resultante se conocerá como $a_5(t_i)$.
9. Obtener las velocidades y desplazamientos del terreno a través de integrar el acelerograma una o dos veces, respectivamente, y el espectro de respuesta para amortiguamiento nulo.
10. Representación gráfica automática de los acelerogramas y de las funciones calculadas en el punto anterior.
11. Analizar las gráficas para juzgar si la corrección es adecuada. En caso de que la oscilación de las aceleraciones a todo lo largo del registro sea alrededor de la línea base, se puede considerar que la corrección es aceptable y pasar al punto 16. Si no sucede así, o sea que aparece un tramo (generalmente al principio o final) que evidentemente no quedó bien corregido,

como ocurre en la fig 2, entonces hay que pasar al punto 12. Esto se puede confirmar observando los tiempos en los cuales ocurrieron las aceleraciones espectrales correspondientes a pe riodos largos (mayores de 5 seg, por ejemplo).

12. Obtener promedios móviles de orden N' en los tramos en los que se juzga que la corrección no fue adecuada, donde N' se escoge a criterio de la persona que procesa los datos, y se fi ja de manera que no se eliminen ondas de periodos que obvia-men te no son espurios. En los casos aquí presentados, en los que hubo necesidad de aplicar este paso, se usó $N' = 101$ cu ando se requirió la corrección adicional en el tramo inicial del registro, o $N' = 251$ cuando se necesitó al final ($T = 0.04$ seg). Este proceso conduce a una nueva línea base $l_4(t_i)$.
13. Calcular el acelerograma nuevo, $a_6(t_i)$, restando del anterior, $a_5(t_i)$, la línea base $l_4(t_i)$.
14. Ajuste parabólico igual al del punto 8; el acelerograma resultante se denota como $a_7(t_i)$.
15. Cálculo y representación gráfica de las nuevas velocidades y desplazamientos del terreno, Repetición del paso 11.
16. Cálculo y representación gráfica de los espectros de respuesta elástica para periodos T desde 0.1 hasta 10 seg, y fracciones de amortiguamiento 0, 0.02, 0.05, 0.10 y 0.20.

En la fig 3 se presenta el diagrama de flujo de este procedimiento, y en las figs 4 a 15 los acelerogramas correspondientes a algunos de los sismos de la tabla 1 (en la que además se presentan los datos sismo-lógicos), corregidos mediante el procedimiento aquí propuesto, junto con las correspondientes trazas de velocidad y desplazamiento, lo que resulta a simple vista razonable en todos los casos. Los registros obtenidos en la Alameda Central y en los edificios Atizapán, Hidalgo y Manuel González de la unidad habitacional Nonoalco-Tlatelolco, corresponden a la zona de alta compresibilidad de la ciudad de México; los registros en Ciudad Universitaria y en Acapulco corresponden a terreno duro o rocoso. En las figs 16 a 18 se presentan los cortes estrá-tigráficos de estos sitios, excepto en Acapulco por no haber uno disponible. En la ref 20 se presenta la totalidad de registros corregidos y de espectros de respuesta correspondientes a los sismos listados en la tabla 1.

6. CALCULO DE ESPECTRO DE RESPUESTA, VELOCIDADES Y DESPLAZAMIENTOS DEL TERRENO

Para calcular los espectros de respuesta elástica se probaron los programas de computadora empleados en las refs 15 a 17, de los que se escogió el de la ref 15 por ser el más rápido. En él se usa el método de Newmark (ref 18) con $\beta = 1/6$, previa corrección de los acelerogramas mediante el método desarrollado en el presente trabajo. Los espectros correspondientes a algunos de los sismos de la tabla 1 se muestran en las figs 19 a 30.

Cabe señalar que en algunos casos se obtuvieron ordenadas espectrales grandes correspondientes a periodos relativamente largos (5 seg), como sucedió, por ejemplo, para el temblor del 23 de agosto de 1965 registrado en Ciudad Universitaria, y para el del 1 de julio de 1968 captado en el edificio Atizapán de la ciudad de México. Sin embargo, no se pudo dilucidar si esto aconteció por deficiencia del método de corrección de línea base o porque realmente dichas ordenadas son correctas, ya que a simple vista no se notaron anomalías en los registros corregidos de aceleraciones.

En los espectros de respuesta correspondientes a acelerogramas obtenidos en suelo blando, se observa que el periodo dominante está en la vecindad de 2.5 seg. En la fig 31, para periodos mayores de 2.5 seg y 10 por ciento de amortiguamiento, se muestran las envolventes de los espectros de los componentes horizontales de los sismos registrados en la zona blanda de la ciudad de México, normalizados a una velocidad de 100 cm/seg en el periodo de 2.5 seg.

Puesto que la ecuación representativa del lado derecho del espectro de diseño en el Reglamento para Construcciones en el Distrito Federal en vigor es

$$a = 2.5 g/T$$

donde a es la aceleración espectral y T el periodo natural de la estructura, la cual implica una pseudovelocidad constante, resulta, al observar la fig 31, que esta sobrestima en general la respuesta máxima, ya que solo en los espectros de los componentes N10-46W y N-S de los sismos del 10 de diciembre de 1961 y del 1 de julio de 1968, registrados en la Alameda Central y en el edificio Atizapán, respectivamente, se llega a exceder el valor de 100 cm/seg en algunos periodos mayores de 2.5 seg.

En la fig 31 se presentan también los casos en que el decaimiento del espectro de diseño (de aceleraciones) a la derecha de $T = 2.5$ seg es proporcional a $T^{-3/2}$ y a T^{-2} . Comparando estos casos con los espectros reales normalizados, se puede concluir que tal vez sea más razonable que el espectro de diseño del reglamento mencionado tenga un decaimiento proporcional a $T^{-3/2}$ o a T^{-2} , lo que se está estudiando en el Instituto de Ingeniería, UNAM, para las modificaciones generales al reglamento.

En los espectros de registros obtenidos en Ciudad Universitaria se observa que a pesar de que la capa superficial es de roca volcánica con espesor variable entre 0 y 10 m, los periodos dominantes no siempre son cortos, sino que en algunos casos aparecen picos bastante grandes en periodos mayores de 2 seg. Esto se debe tal vez a que el suelo donde se apoya la roca es estratificado y relativamente blando en comparación con ella; en la fig 18 se muestra un corte estratigráfico (ref 14), correspondiente a un sitio localizado entre los edificios de la División de Estudios Superiores de la Facultad de Ingeniería y el Instituto de Ingeniería, UNAM.

En la mayoría de los espectros correspondientes a los temblores registrados en Acapulco se aprecia que los periodos dominantes son bastante cortos (del orden de 0.1 seg), lo cual es característico de suelos rocosos y de temblores originados a cortas distancias focales.

7. CONCLUSIONES

Los resultados de los estudios acerca de la corrección de la línea base de los acelerogramas digitizados y de los espectros, se pueden resumir en lo siguiente:

1. Es conveniente efectuar una revisión de los datos digitizados, a través del procedimiento empleado en este trabajo o algún otro, ya que aunque la digitización se realice cuidadosamente no se puede garantizar la ausencia de errores humanos y mecánicos en la lectura.
2. El método empleado para ajustar la línea base de los registros de los temblores, representa ventajas sobre otros que han sido propuestos para sismos de larga duración con periodos predominantes largos, como los de la zona blanda del Valle de México.
3. El hecho de que en algunas gráficas de desplazamientos

aparezcan ondas con periodos mayores de 16 seg, hace pensar que el filtro que se emplea debe perfeccionarse en futuros trabajos de este tipo.

4. Se presenta un catálogo de los acelerogramas corregidos de las gráficas de velocidad y desplazamiento; del análisis de los espectros de respuesta correspondiente a la zona de alta compresibilidad del suelo se concluyó que el espectro de diseño del Reglamento para Construcciones en el Distrito Federal en vigor desde 1962, tiene un decaimiento (proporcional a T^{-1}) demasiado lento en la zona de periodos mayores de 2.5 seg, siendo tal vez más apropiada una relación proporcional a $T^{-3/2}$, por ser menos conservadora que la anterior.

8. REFERENCIAS

1. Newmark, N M y Rosenblueth, E. Fundamentals of Earthquake Engineering, Prentice Hall Inc., Nueva York (1971)
2. Trifunac, M D y Hudson, E. D, "Laboratory evaluation and instrument corrections of strong-motion accelerographs" Earthquake Engineering Research Laboratory, EERL 70-04, California Institute of Technology, Pasadena (1970)
3. Trifunac, M D, "Low frequency digitization error and a new method for zero baseline correction of strong-motion accelerograms", Earthquake Engineering Research Laboratory, EERL 70-07, California Institute of Technology, Pasadena (1970)
4. Chávez, M, Rascón, O A y Alonso, L. "Un nuevo método para corrección de la línea base de registros de temblores", III Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Acapulco, Gro (nov 1971)
5. Bustamante, J I y Prince, J, "Corrección de los acelerogramas de cuatro macrosismos registrados en la Ciudad de México", Boletín de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, 1, 2 (oct 1963), 61-82
6. Amin, M y Ang, A H S, "A nonstationary stochastic model for strong-motion earthquakes", Structural Research Series, 306, Universidad de Illinois, Urbana (1966)
7. Schiff, A y Bogdanof, J L, "Analysis of current methods of interpreting strong-motion accelerograms", Bull, Seismological

Society of America, 57 (1967), 857-74

8. Shet, R, "Effect of inelastic action on the response of simple structures to earthquake motions", Tesis de Maestría, Universidad de Illinois (1959)
9. Brady, A G, "Studies of response to earthquake ground motion", Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena (1966).
10. Berg, G V y Housner, G W, "Integrated velocity and displacement of strong earthquake ground motion", Bull, Seismological Society of America, 51 (1961), 175-89
11. Hudson, D E, Nigam, N C y Trifunac, M D, "Analysis of strong-motion accelerograph records", IV World Conference on Earthquake Engineering, Santiago de Chile (1969)
12. Boyce, W H, "Integration of accelerogramas", Bull Seismological Society of American, 60 (1970), 261-63
13. Rascón, O A, Introducción a la estadística descriptiva, Vol II, Texto programado, Ed UNAM (1970)
14. Martínez, B, Frontana, B Shima, E, Rascón, O A y Palencia, V J, "Prospección sísmica en el área donde se planea instalar una mesa vibradora", Ingeniería Sísmica, 9 (ene-abr, 1973) pp 11-37
15. Bustamante, J I, "Los espectros de sismos mexicanos y el reglamento propuesto para el Distrito Federal", Primer Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Guadalajara (1965)
16. Nigam, N C y Jennings, P C, "Digital calculation of response spectra from strong-motion earthquake records", Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena (1968)
17. Rascón, O A, "Modelo estocástico para simular registros de temblores en terreno duro", Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería, UNAM (1968)
18. Rascón, O A, "Análisis dinámico de estructuras que descansan sobre apoyos independientes", Tesis profesional, Facultad de Ingeniería, UNAM (1963)

19. Marsal, R y Mazari, M, "El subsuelo de la ciudad de México", Instituto de Ingeniería, UNAM (1959)
20. Rascón, O A, Chávez, M, Alonso, L y Palencia, V, "Registros y espectros de temblores en las ciudades de México y Acapulco, 1961-1968. Informe 385 (feb 1977), Instituto de Ingeniería, UNAM

TABLA 1. DATOS SISMOLOGICOS DE LOS SISMOS PROCESADOS*

Fecha	Situación del epifoco, en grados		Profundidad del foco, en km	Magnitud (Richter)
	N	W		
10 dic 1961	19.700	99.100	33	5.0
11 may 1962	16.617	99.450	**	6.7
19 may 1962	17.300	99.433	**	6.5
30 nov 1962	17.300	99.433	**	5.5
6 jul 1964	18.033	100.767	100	6.7
23 ago 1965	15.383	96.117	**	6.9
1° nov 1965	16.533	99.717	**	5.0
9 dic 1965	16.550	100.150	35	6.8
20 abr 1967	16.533	99.717	**	5.0
7 jun 1967	16.517	100.383	**	5.4
2 feb 1968	16.367	99.400	**	5.6
1° jul 1968	17.500	100.367	**	5.8
2 ago 1968	16.367	97.800	**	6.5

* Figueroa, A J, "Catálogo de sismos ocurridos en la República Mexicana." Informe 272, Instituto de Ingeniería, UNAM (ago 1970)

** No hay datos

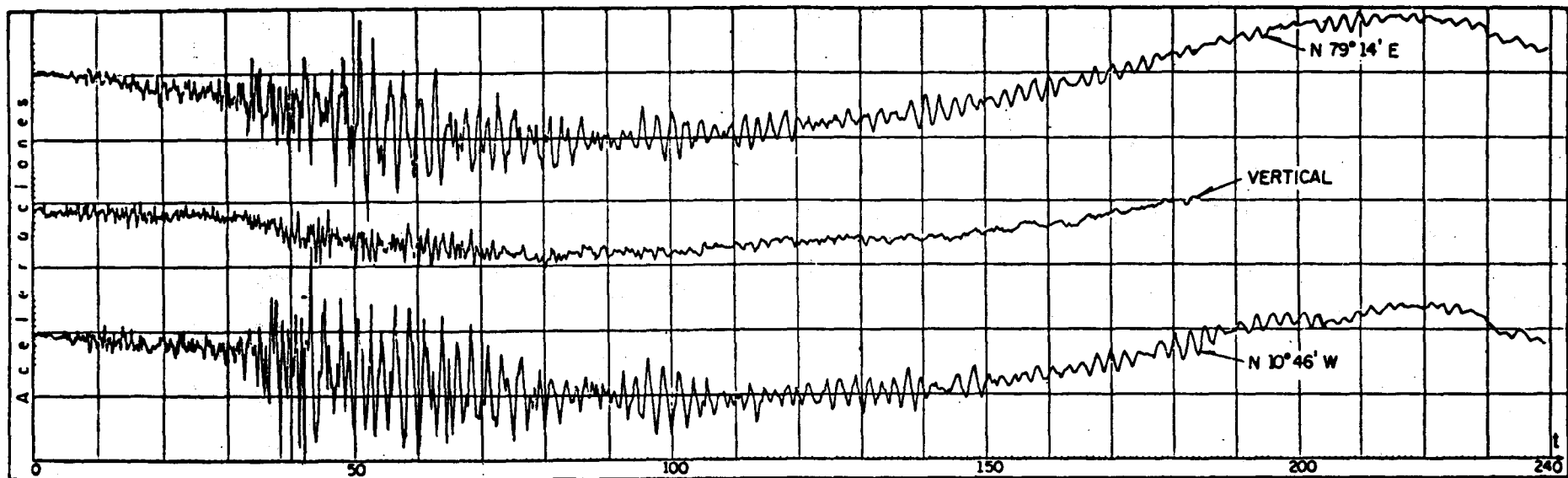


Fig 1 . Acelerogramas originales del sismo registrado el 11-V-1962 en la ALAMEDA CENTRAL, Méx, D.F.

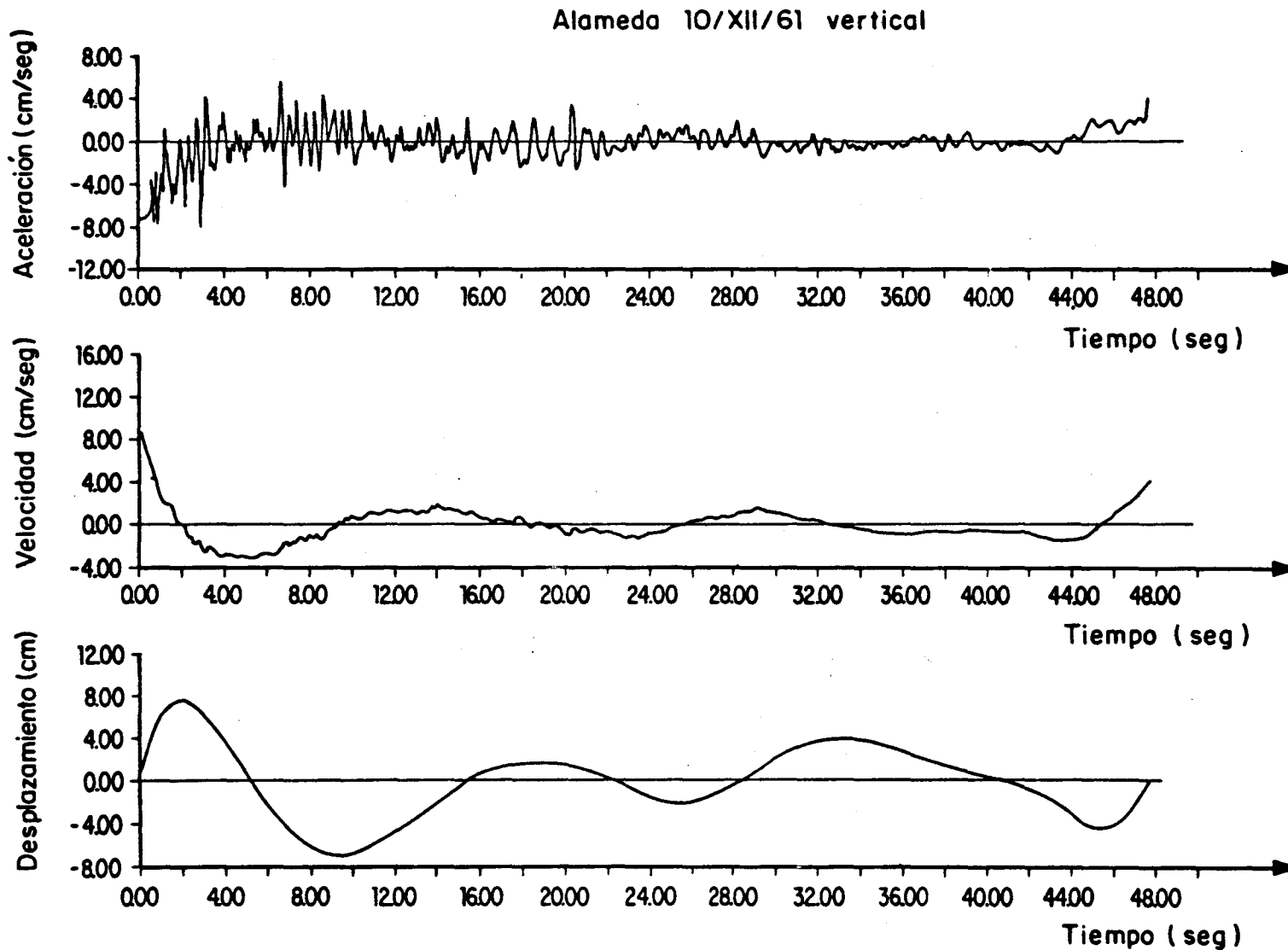


Fig 2 Acelerograma que requiere corrección adicional en sus extremos

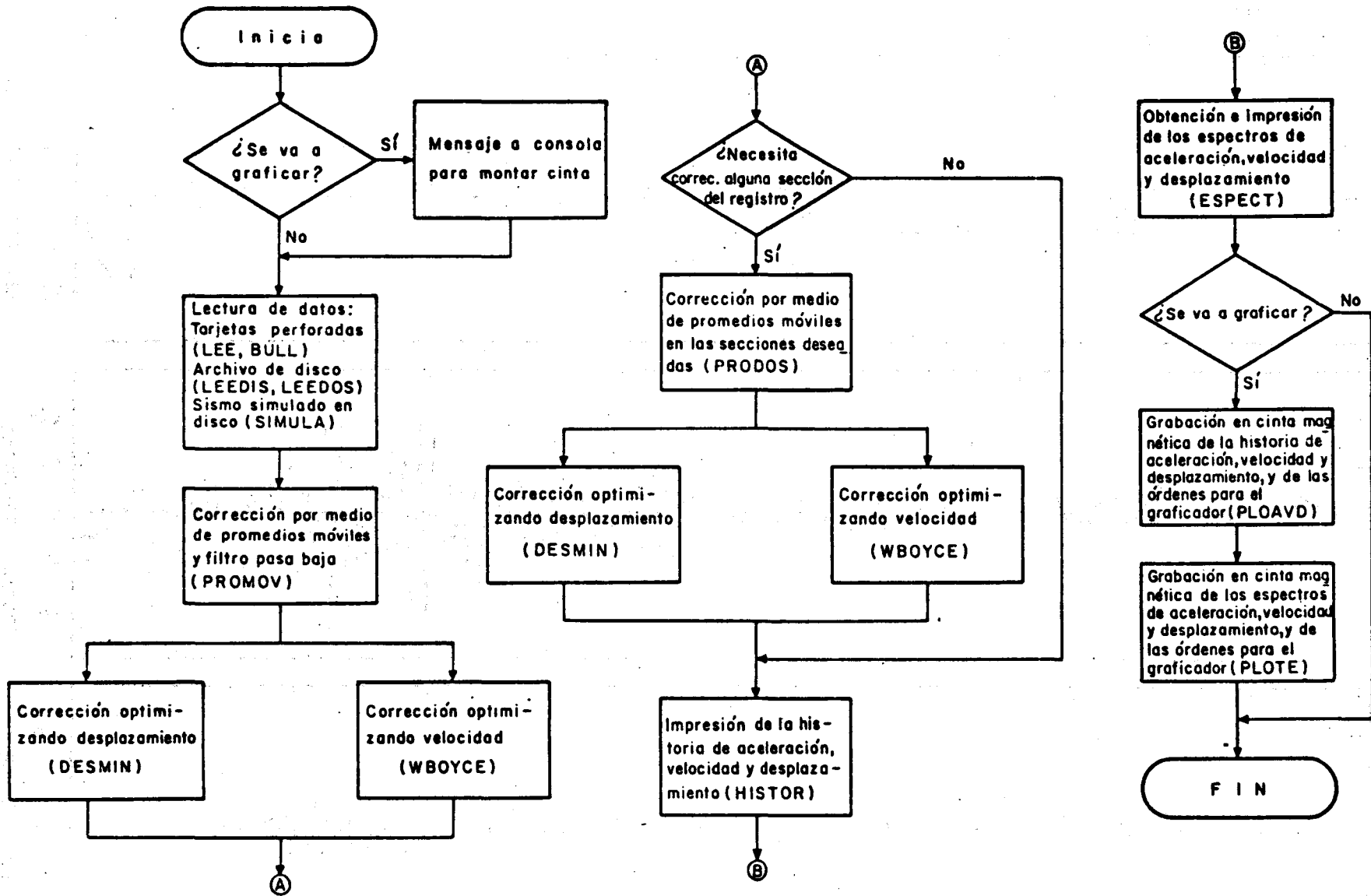


Fig 3 Diagrama de flujo del programa para computadora

COMPONENTE N 10° 46' W

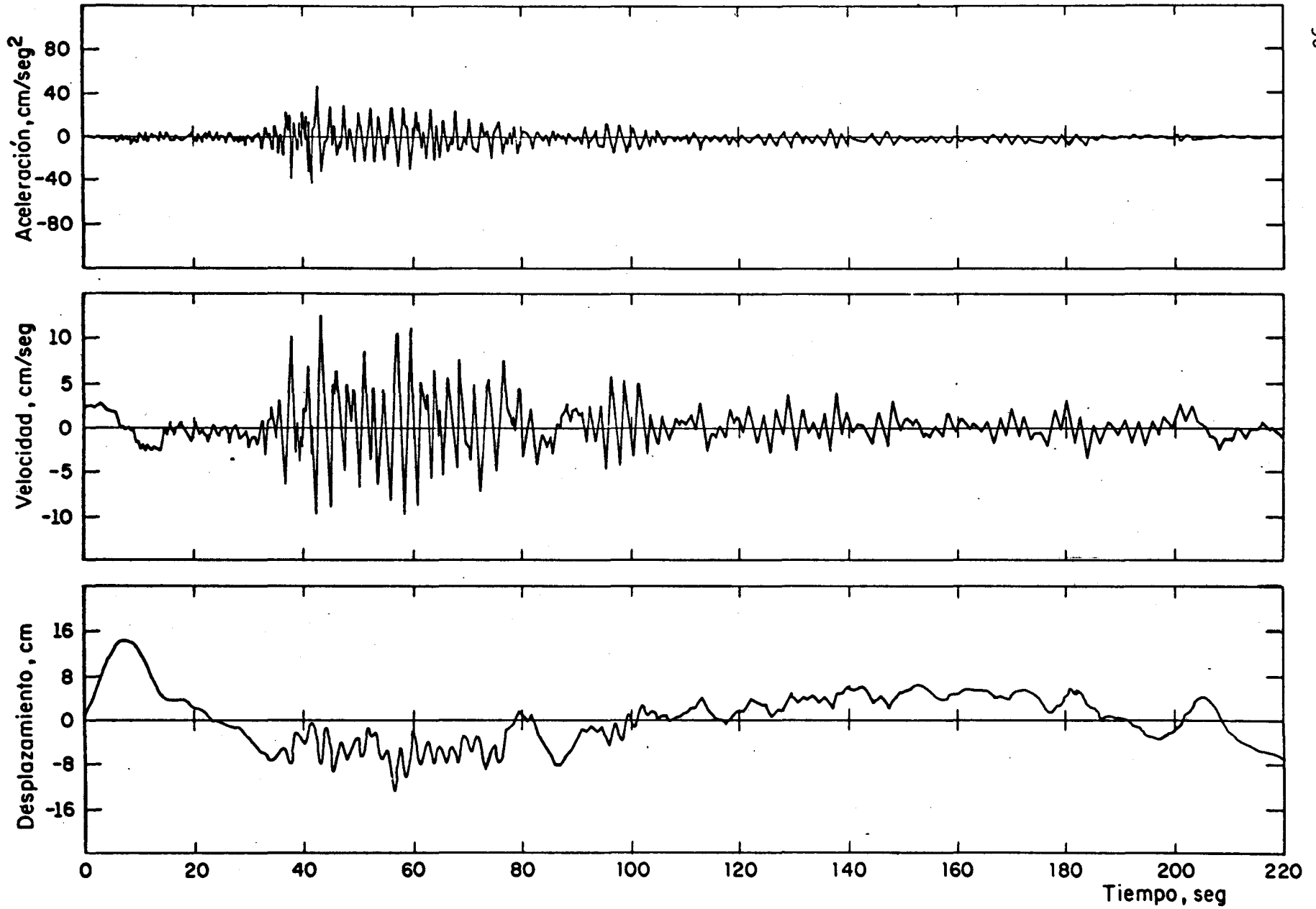


Fig 4 Movimiento del terreno. Alameda Central, 11 de mayo de 1962

COMPONENTE N 79°14' E

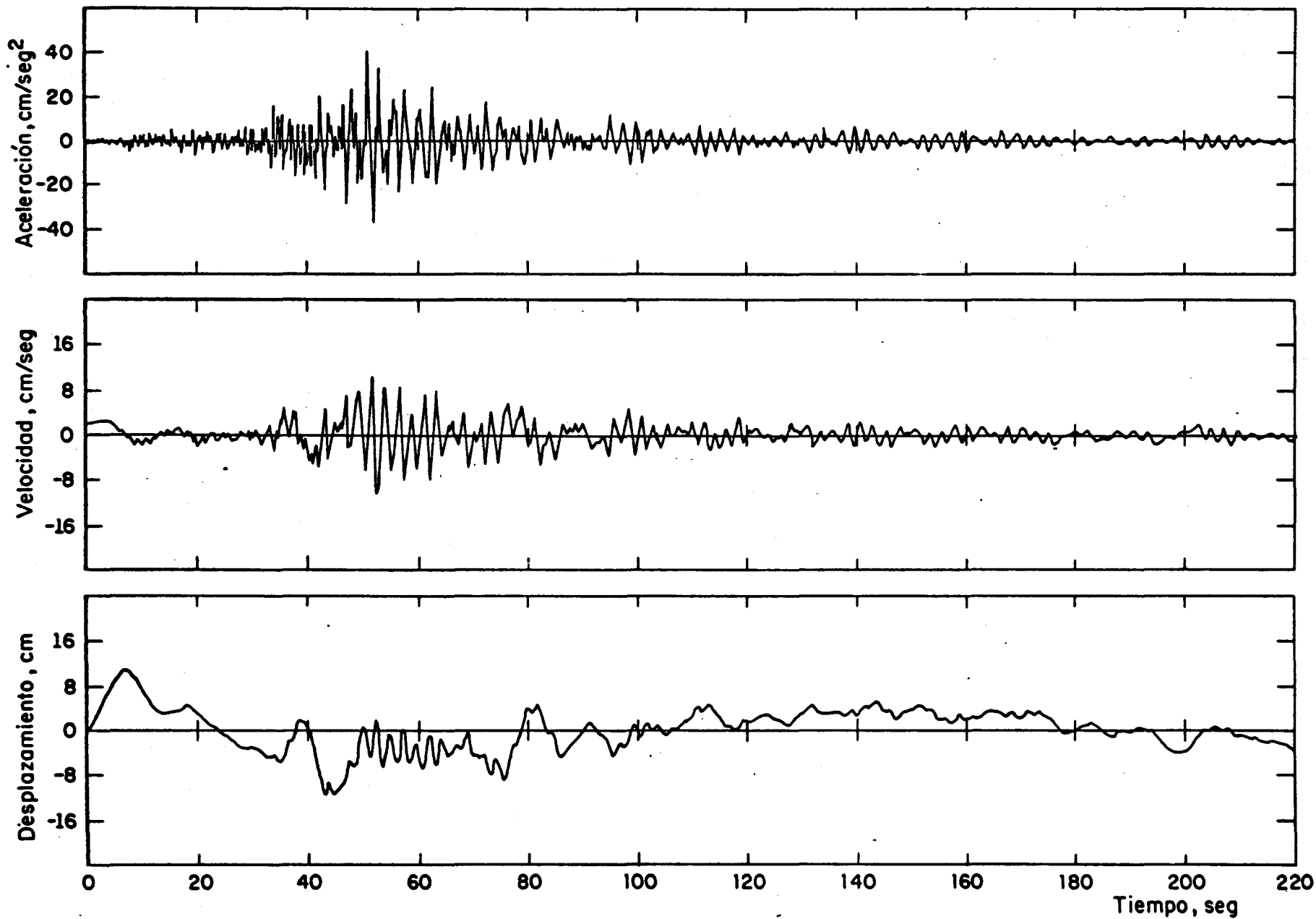


Fig 5 Movimiento del terreno. Alameda Central, 11 de mayo de 1962

COMPONENTE VERTICAL

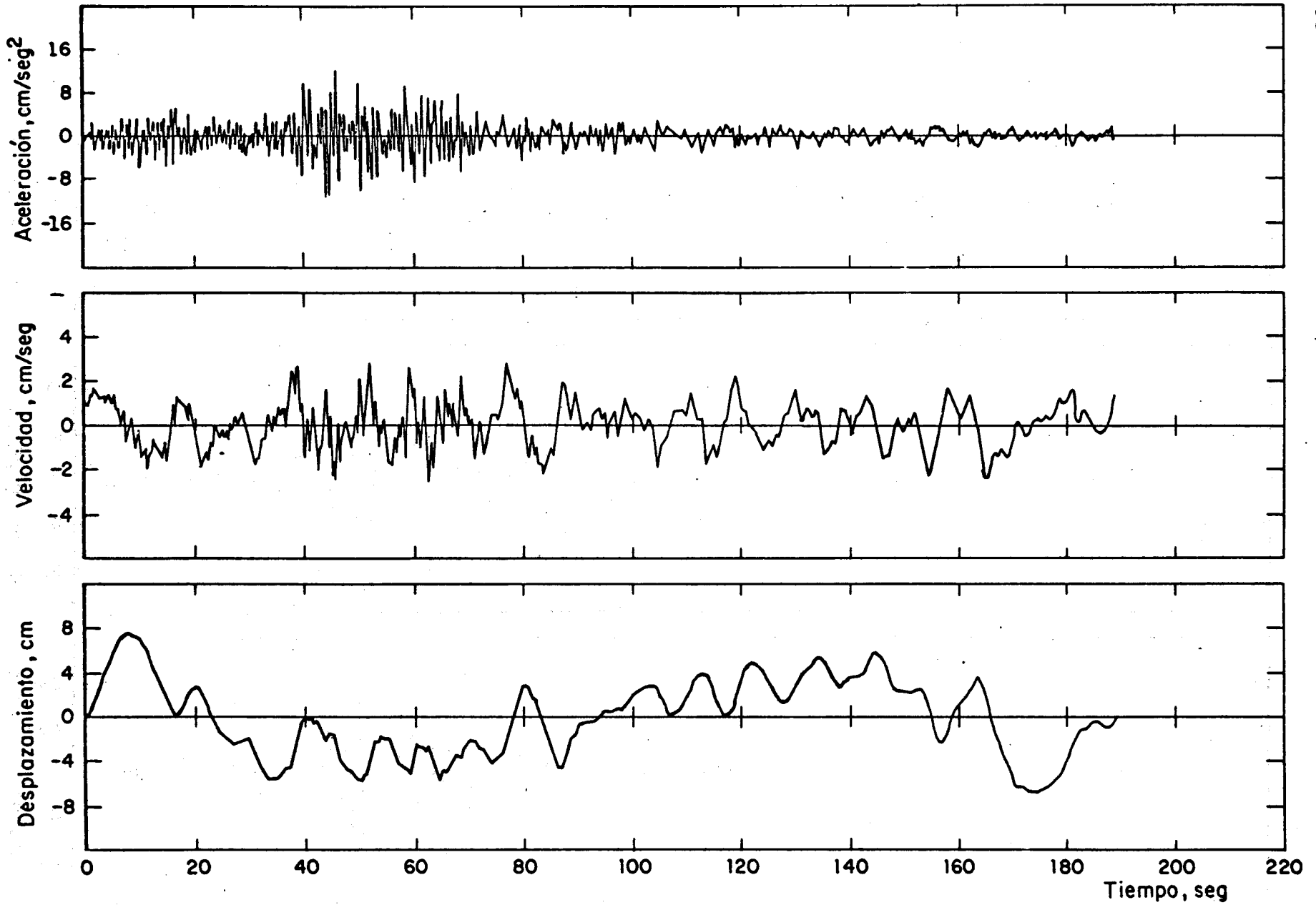


Fig 6 Movimiento del terreno. Alameda Central, 11 de mayo de 1962

COMPONENTE N-S

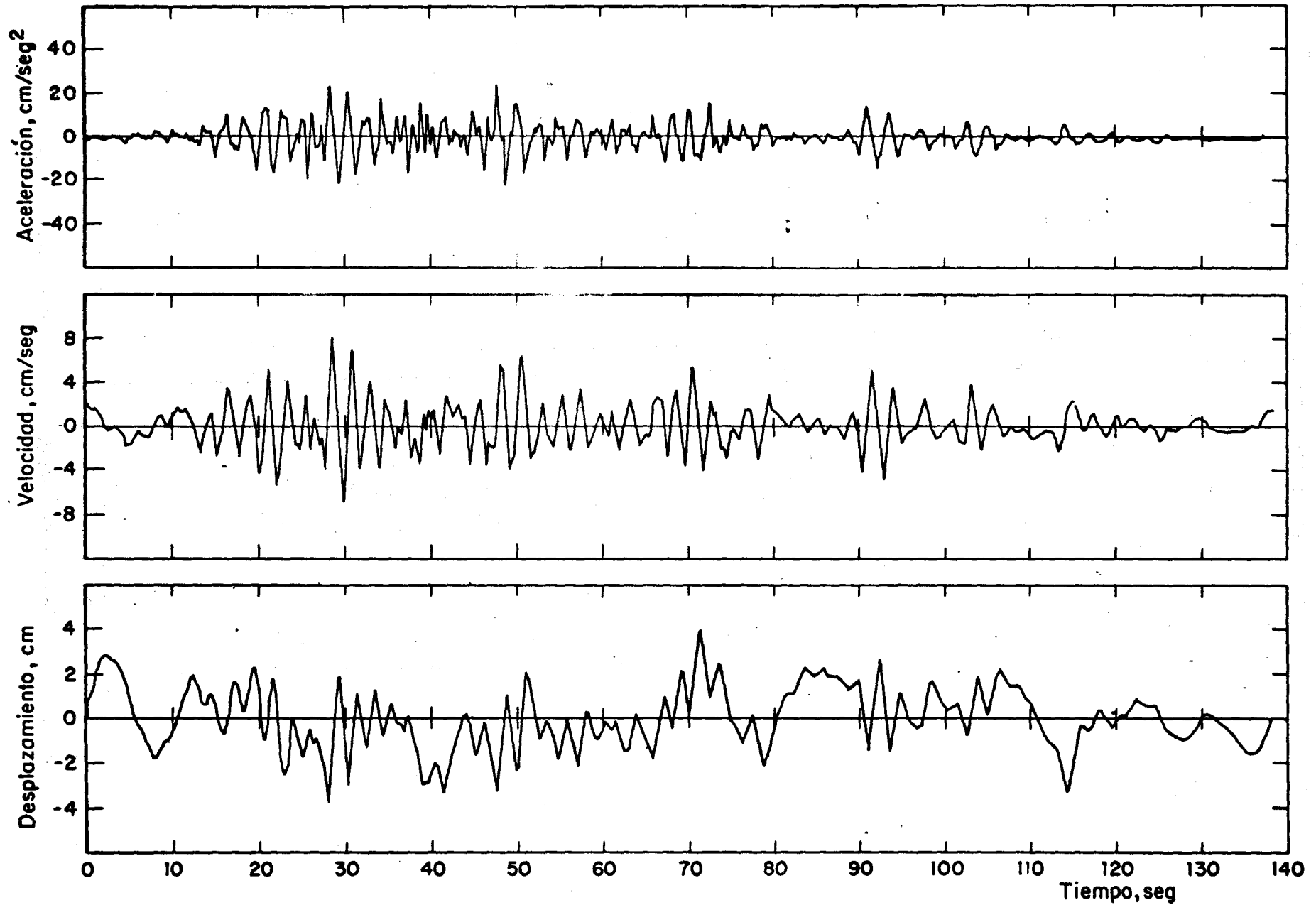


Fig 7 Movimiento del terreno. Cimentación edificio Atizapán, 6 de julio de 1964

COMPONENTE E - W

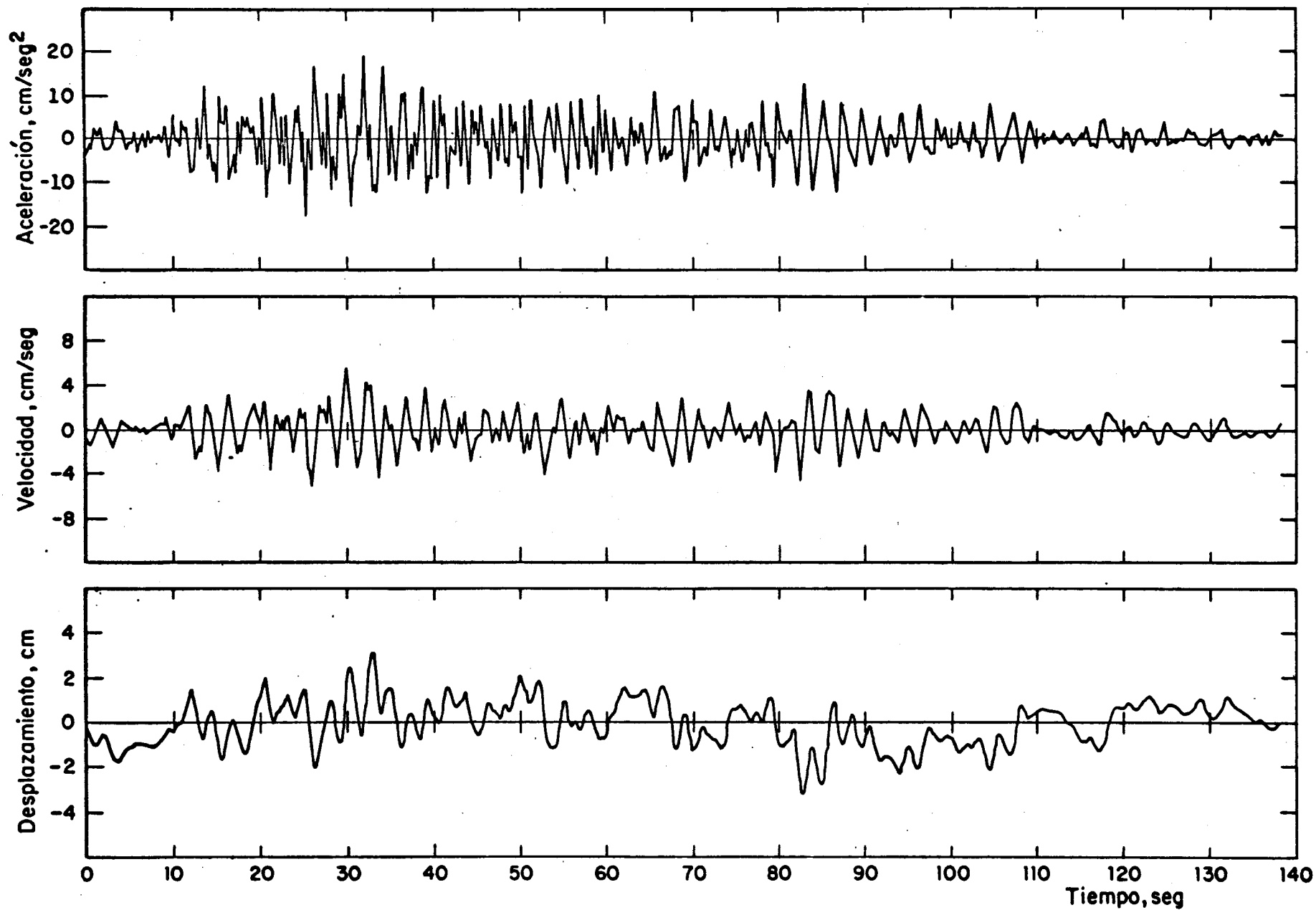


Fig 8 Movimiento del terreno. Cimentación edificio Atizapán, 6 de julio de 1964

COMPONENTE VERTICAL

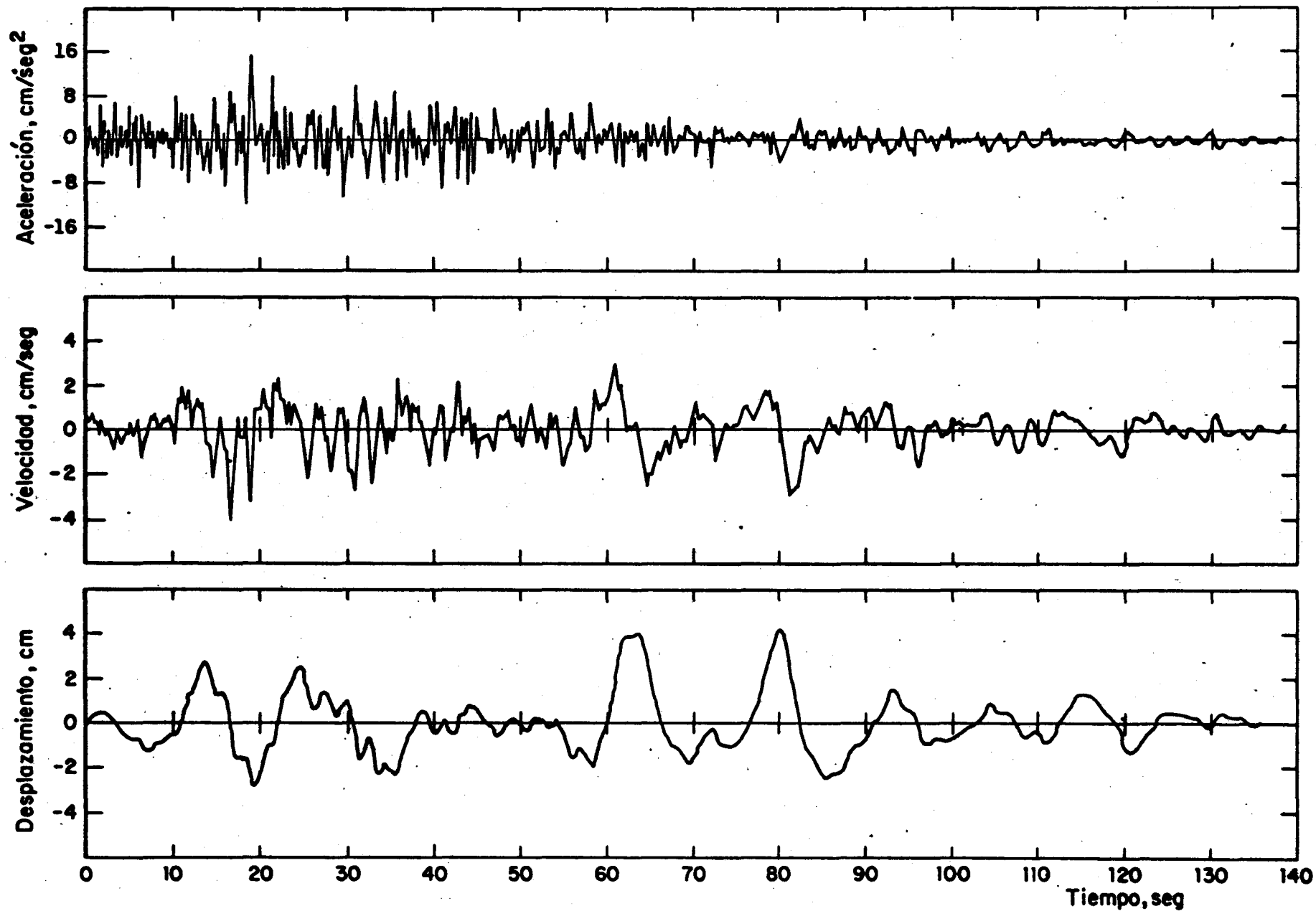


Fig 9 Movimiento del terreno. Cimentación edificio Atizapán, 6 de julio de 1964

COMPONENTE N-S

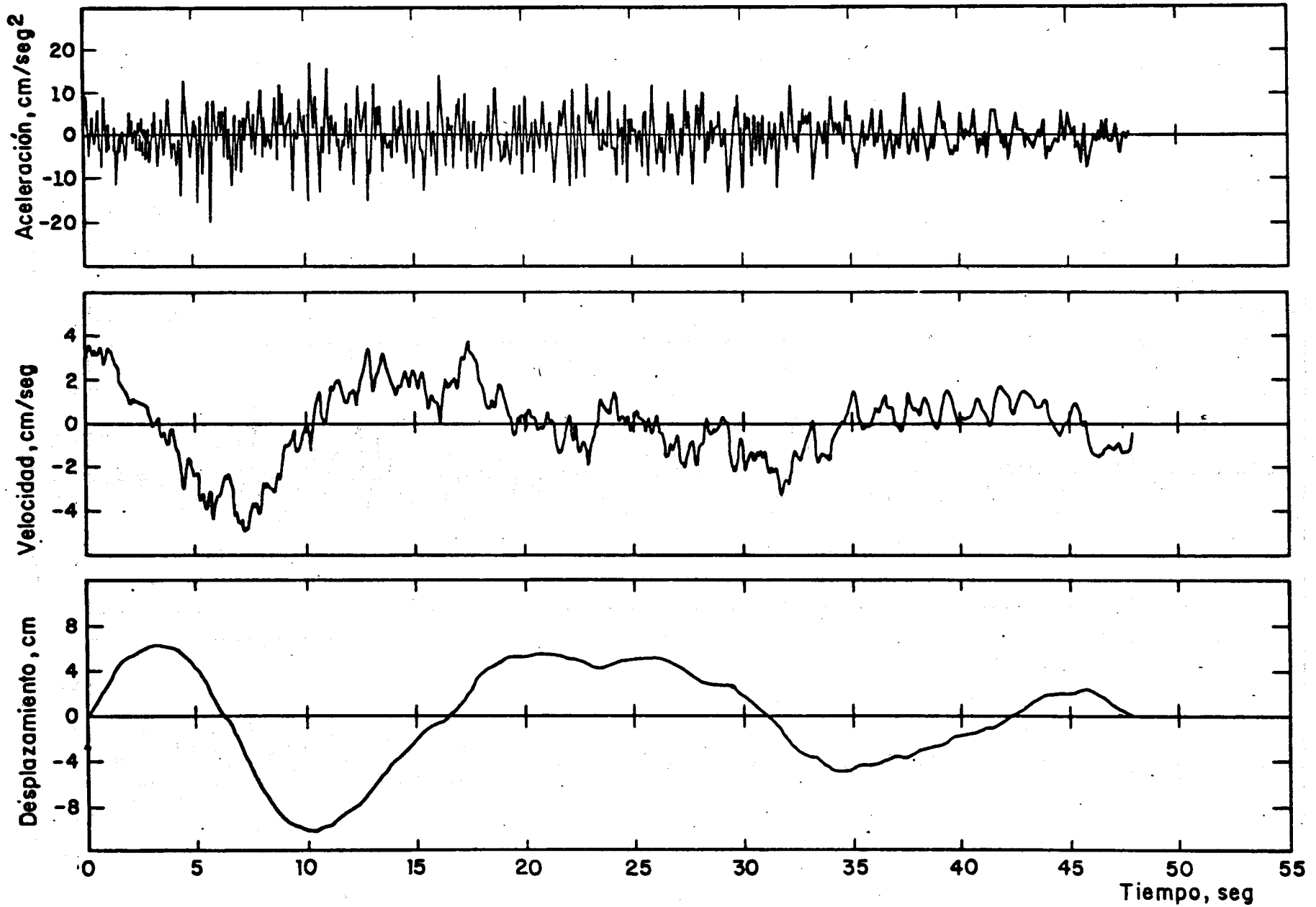


Fig 10 Movimiento del terreno. Ciudad Universitaria, 6 de julio de 1964

COMPONENTE E-W

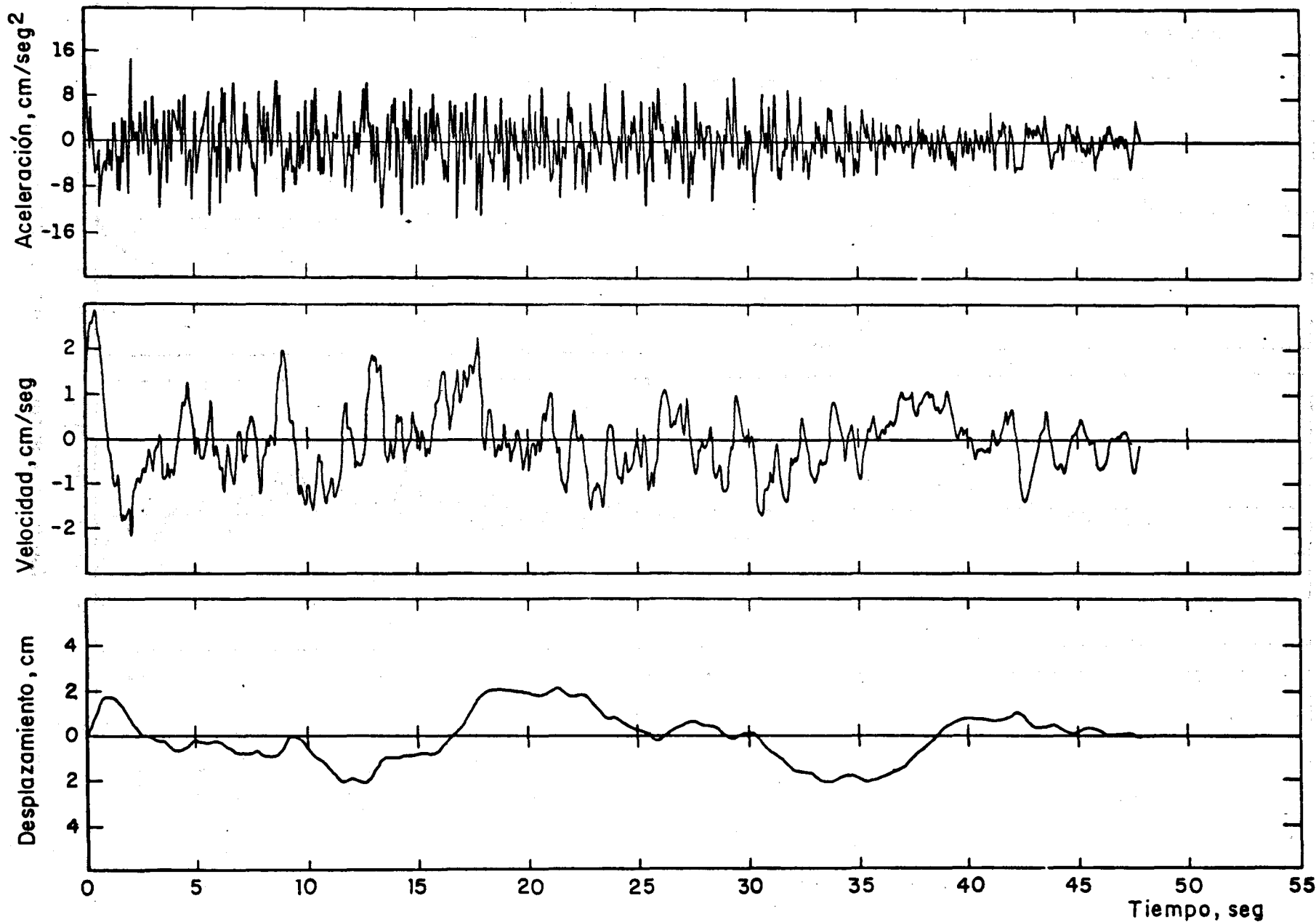


Fig 11 Movimiento del terreno. Ciudad Universitaria, 6 de julio de 1964

COMPONENTE VERTICAL

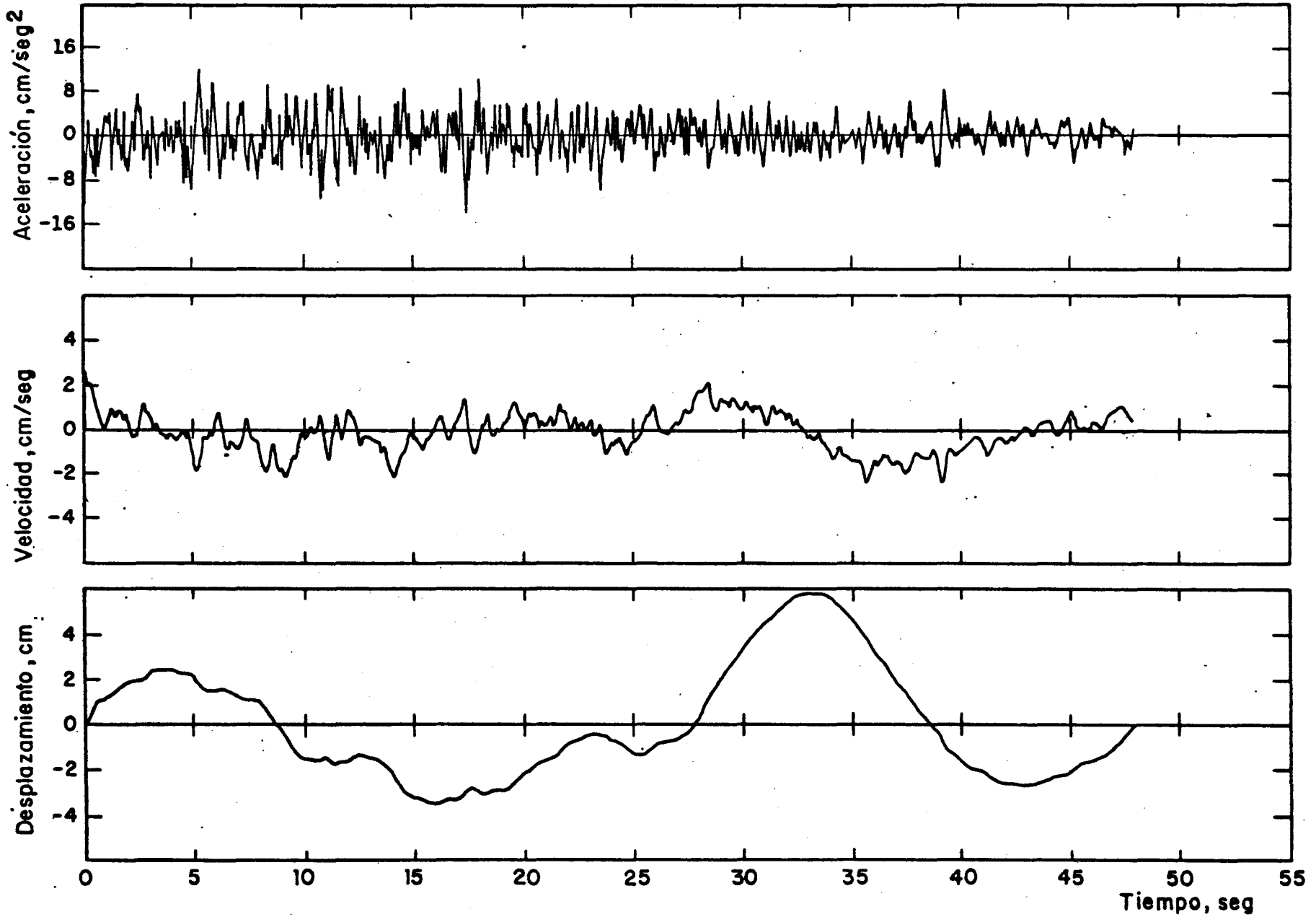


Fig 12 Movimiento del terreno. Ciudad Universitaria, 6 de julio de 1964

COMPONENTE N-S

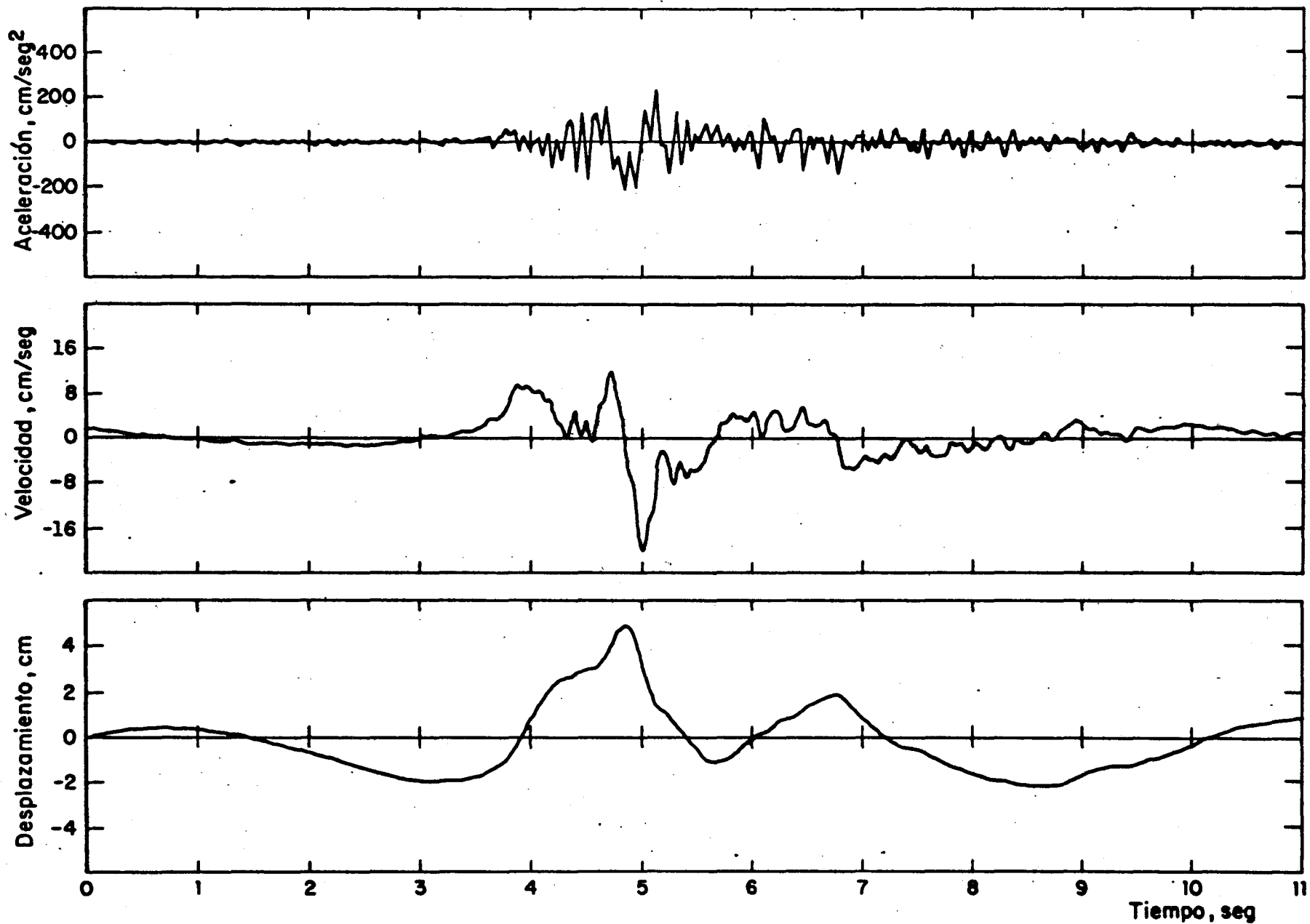


Fig 13 Movimiento del terreno. Acapulco, 9 de diciembre de 1965

COMPONENTE E-W

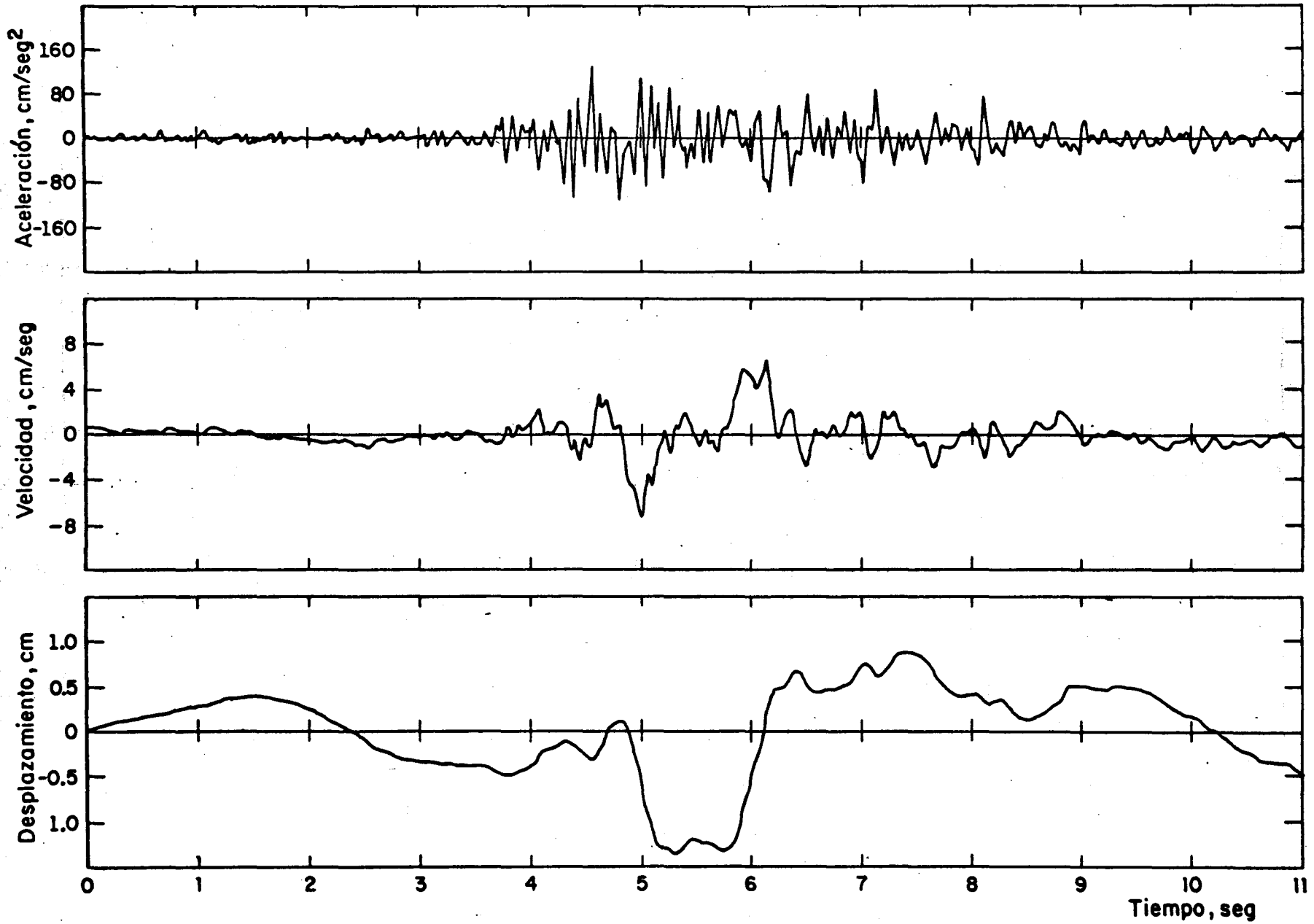


Fig 14 Movimiento del terreno. Acapulco, 9 de diciembre de 1965

COMPONENTE VERTICAL

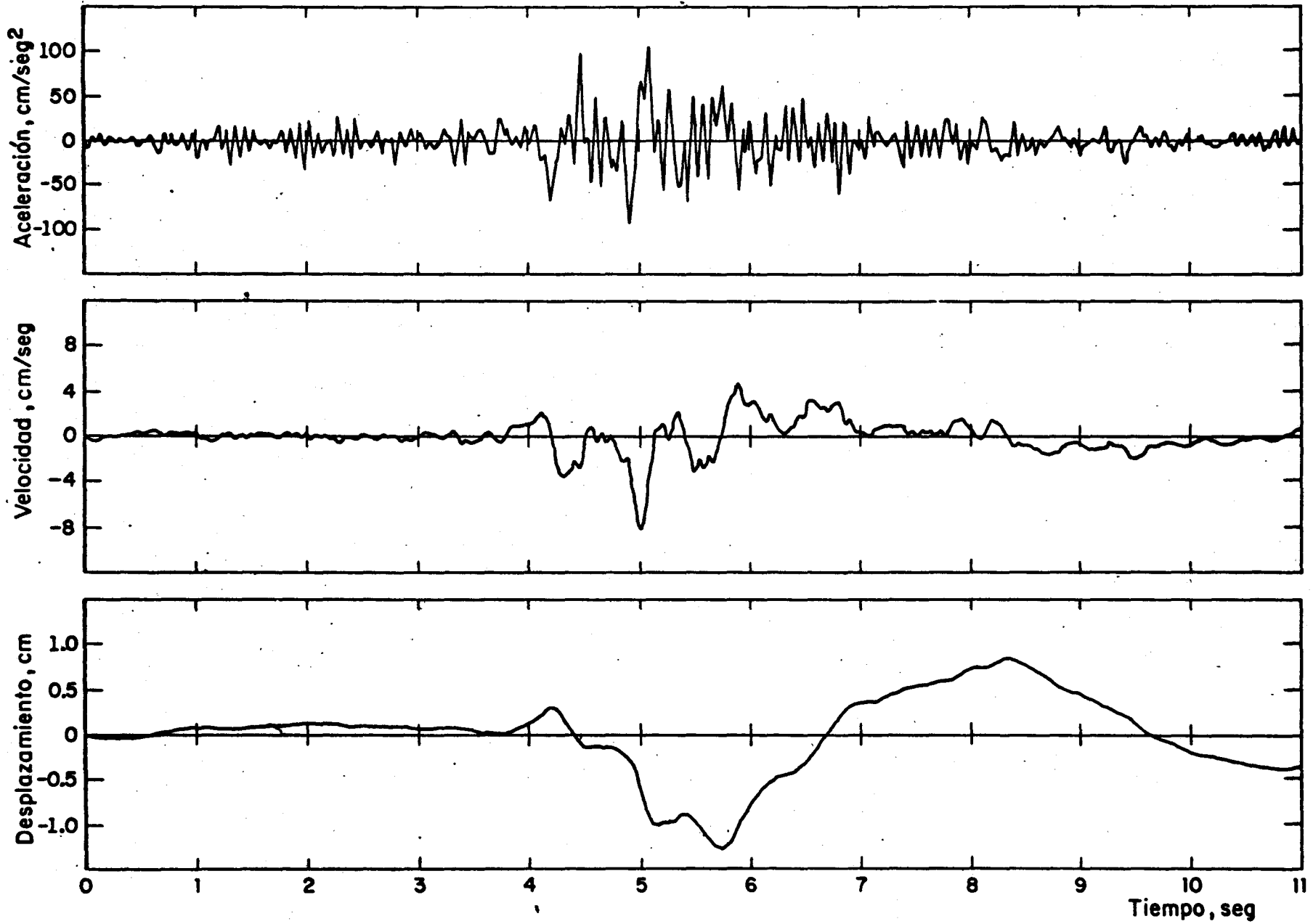


Fig 15 Movimiento del terreno. Acapulco, 9 de diciembre de 1965

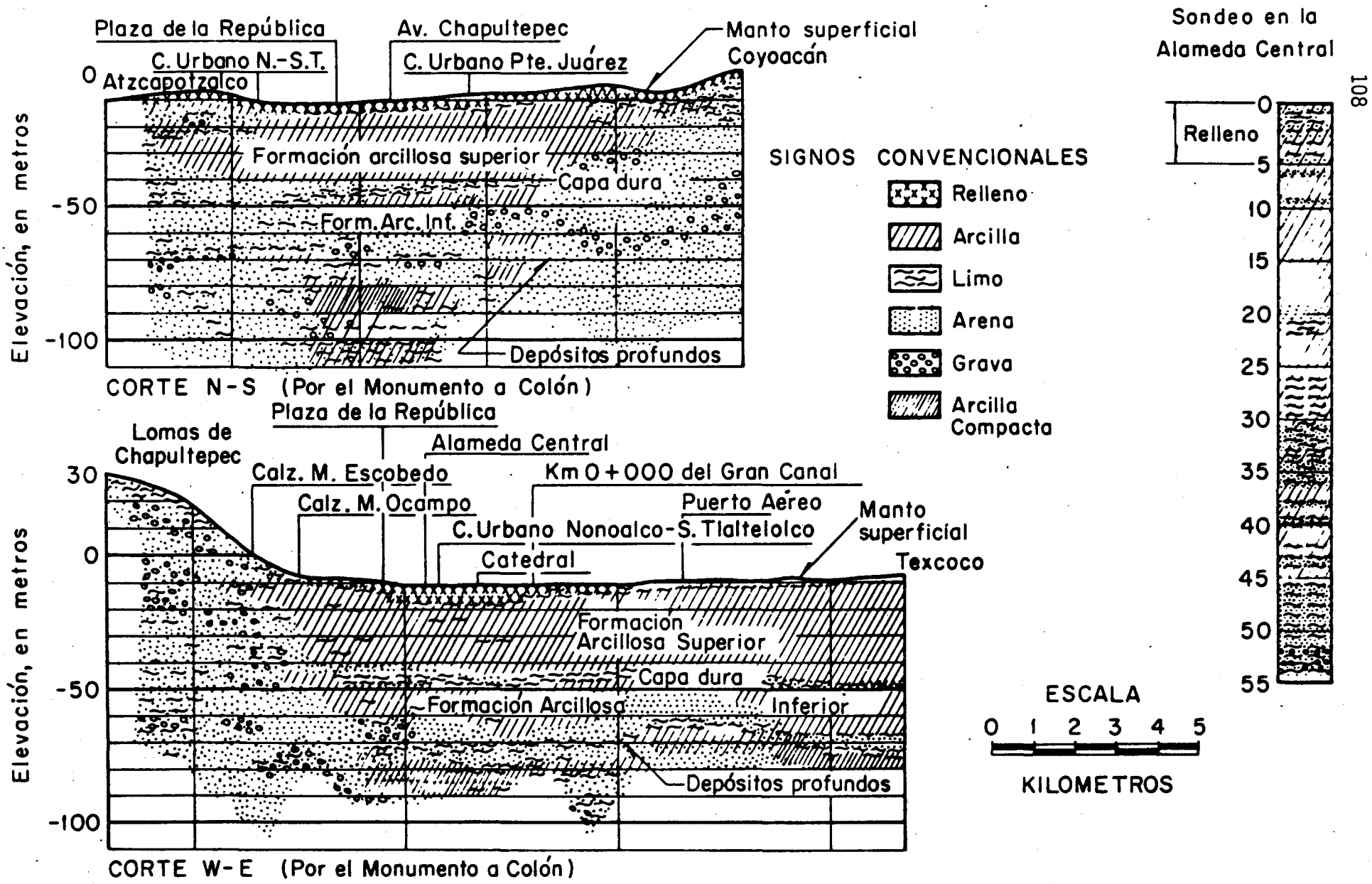


Fig 16 Corte estratigráfico. Alameda Central

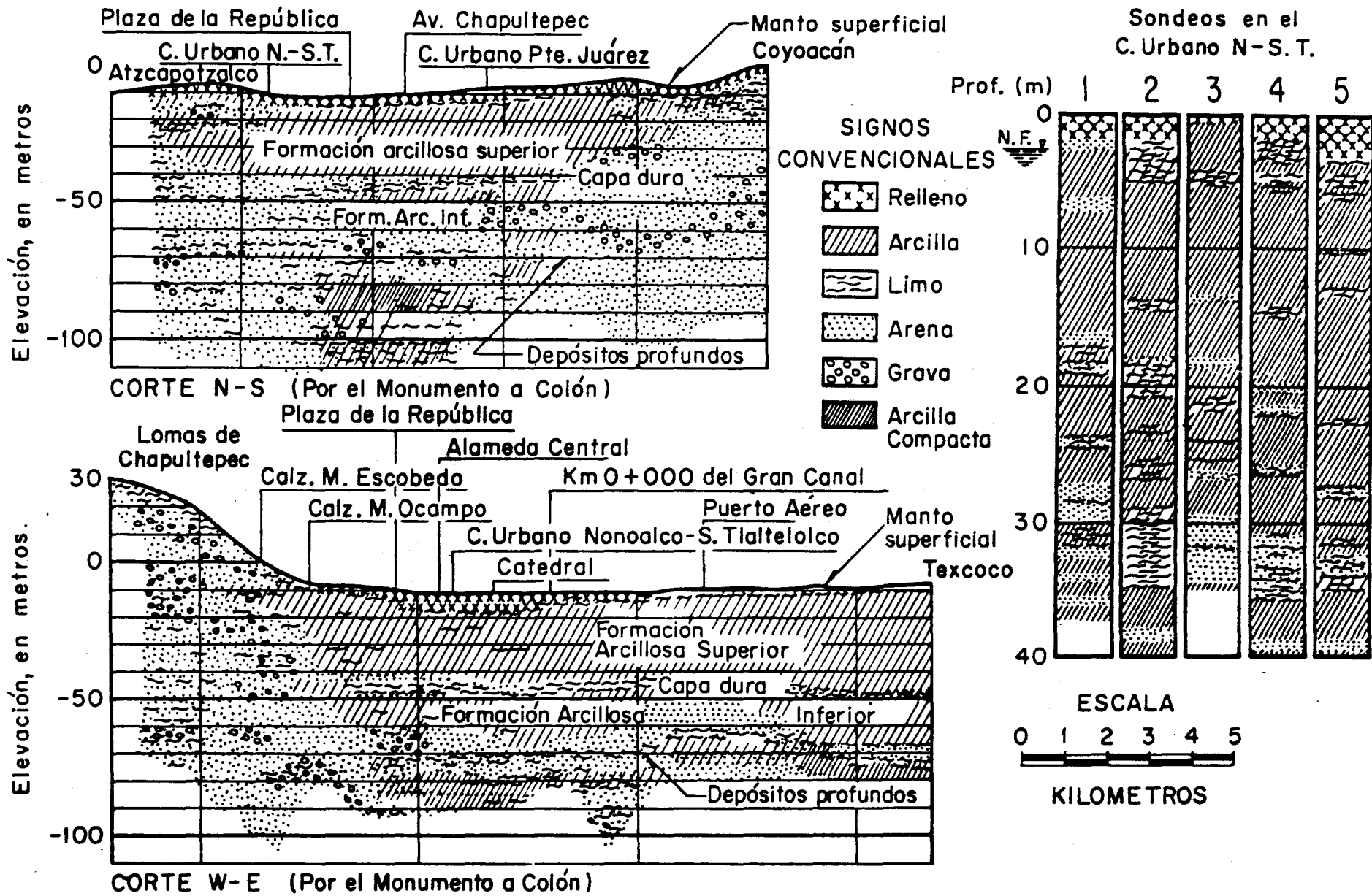


Fig 17 Cortes estratigráficos. Nonoalco-S. Tlaltelolco (según ref 19)

Profundidad, en m

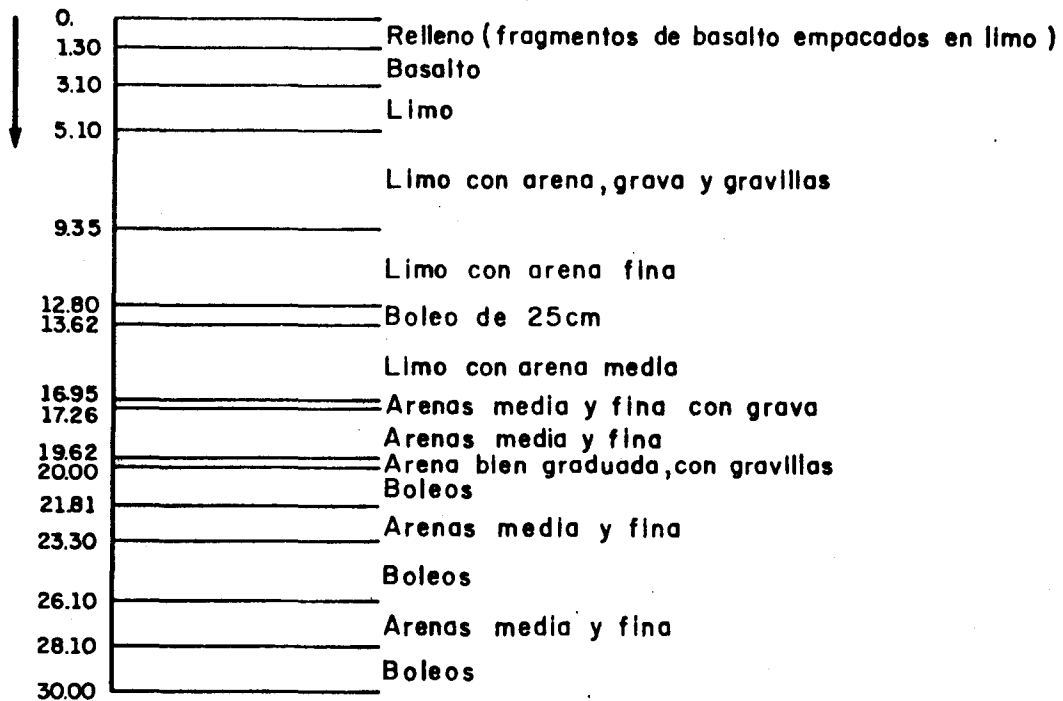


Fig 18 Detalle del corte geológico obtenido del muestreo de un barreno de 12 cm de diámetro en la Ciudad Universitaria

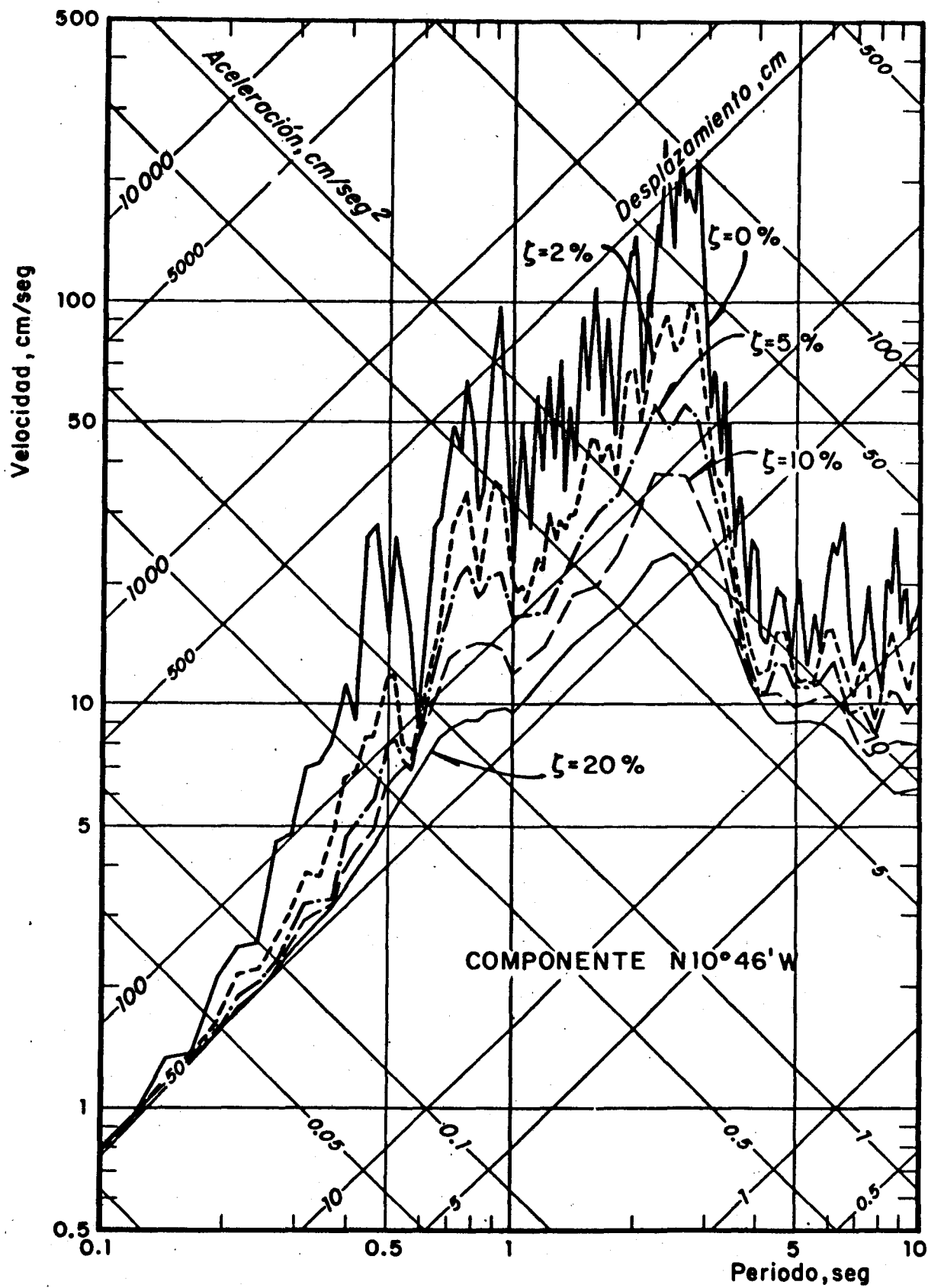


Fig 19 Espectros de respuesta. Alameda Central, 11 de mayo de 1962

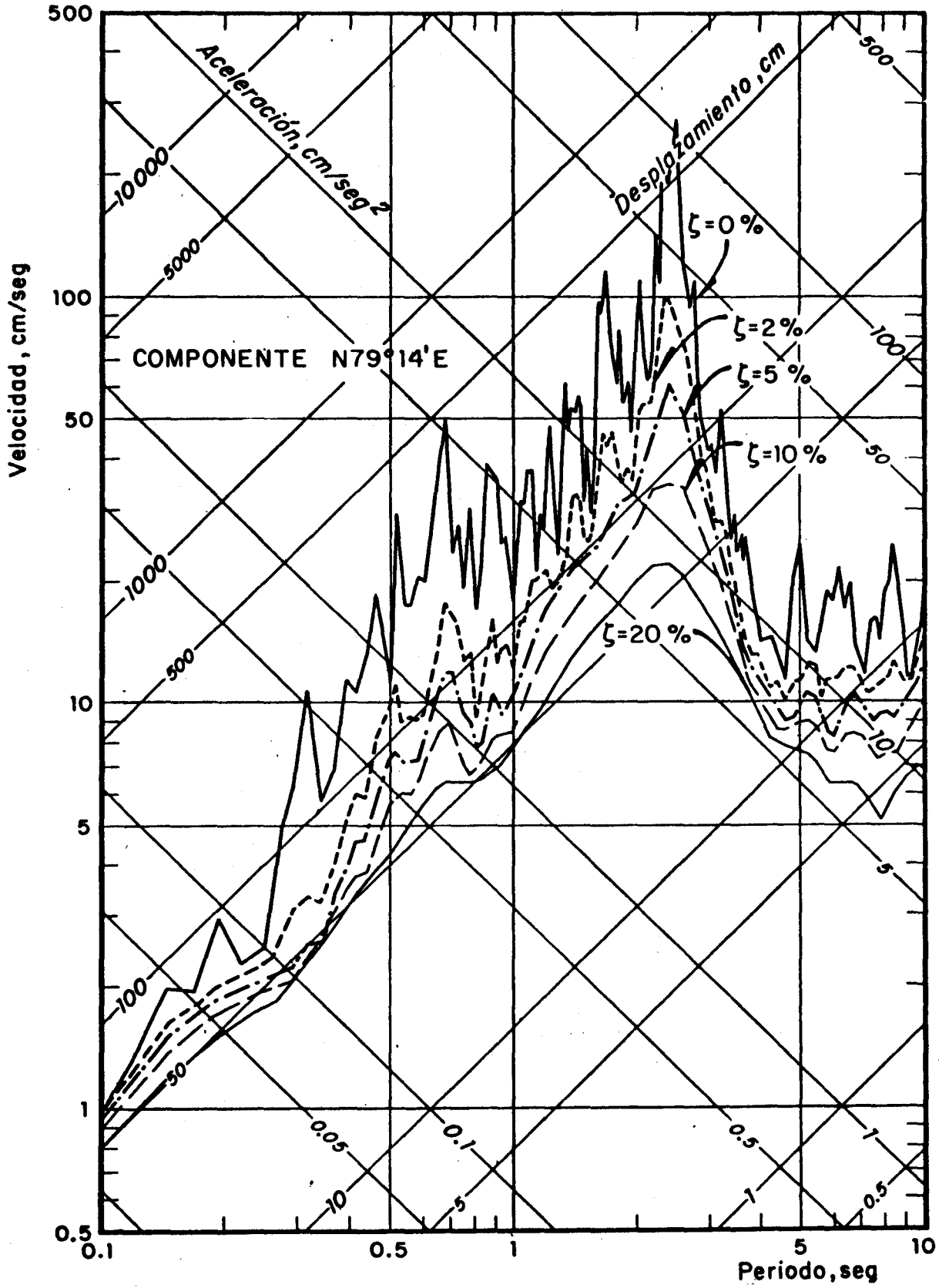


Fig 20 Espectros de respuesta. Alameda Central, 11 de mayo de 1962

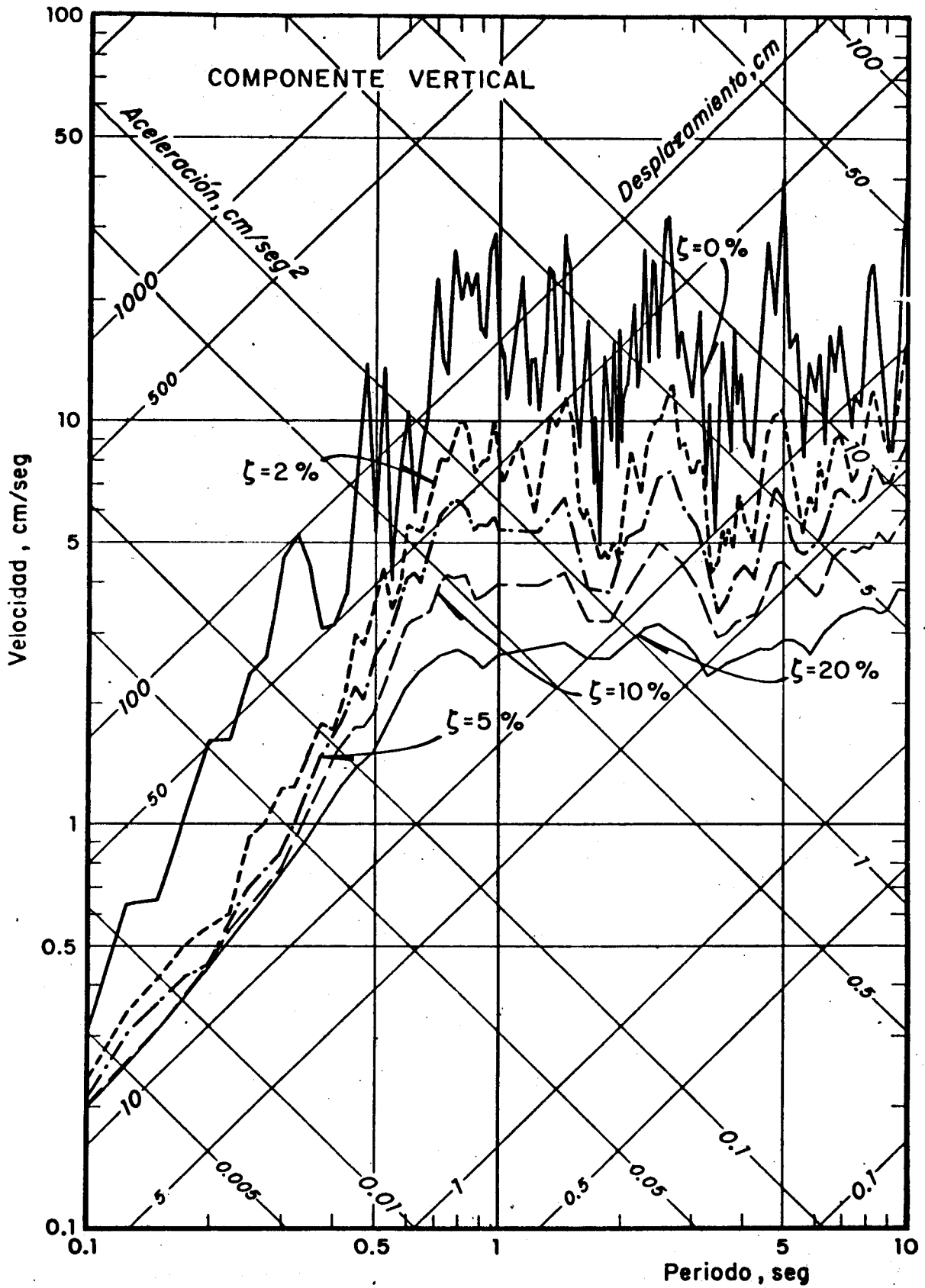


Fig 21 Espectros de respuesta. Alameda Central, 11 de mayo de 1962

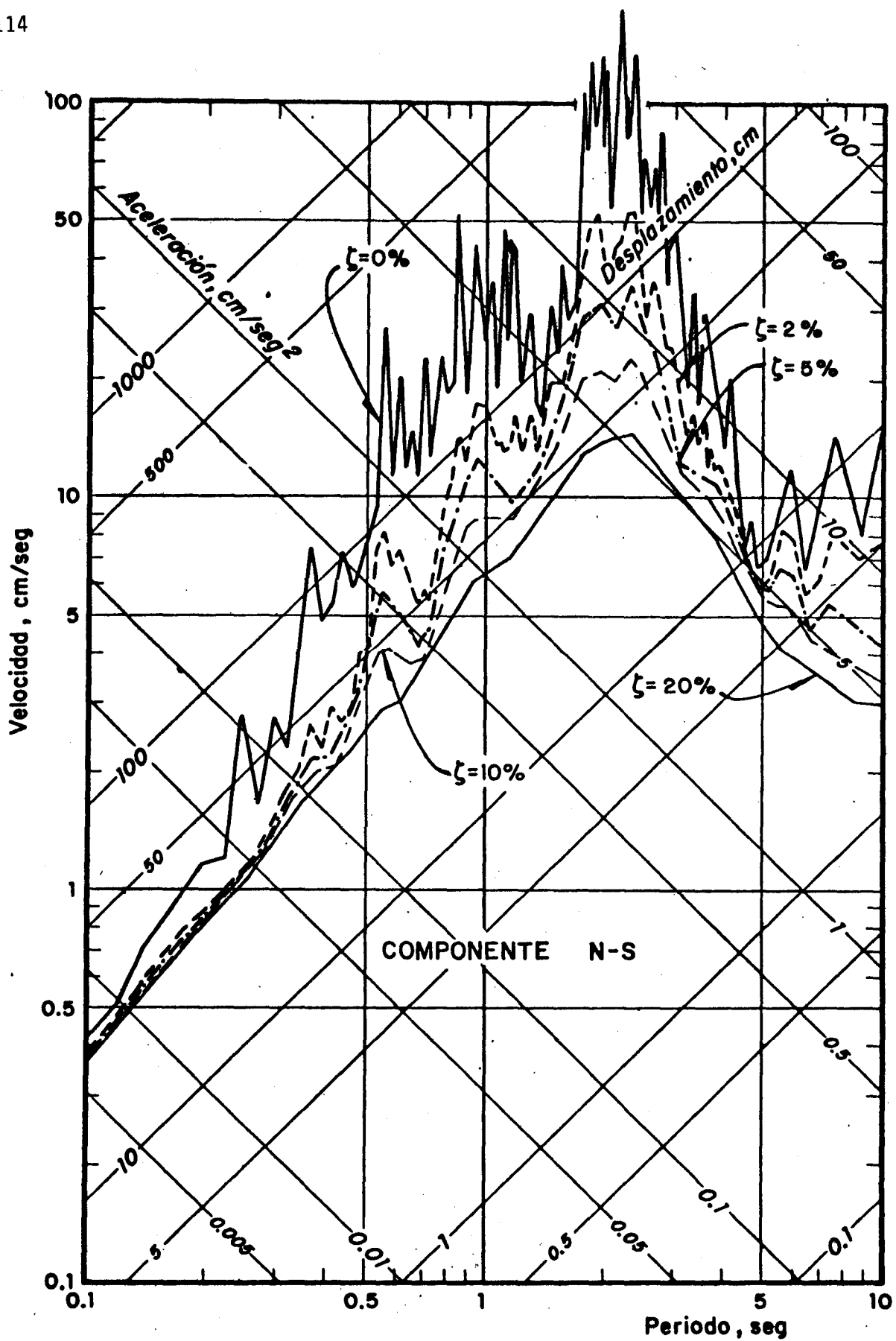


Fig 22 Espectros de respuesta. Cimentación Edificio Atizapán, 6 de julio de 1964

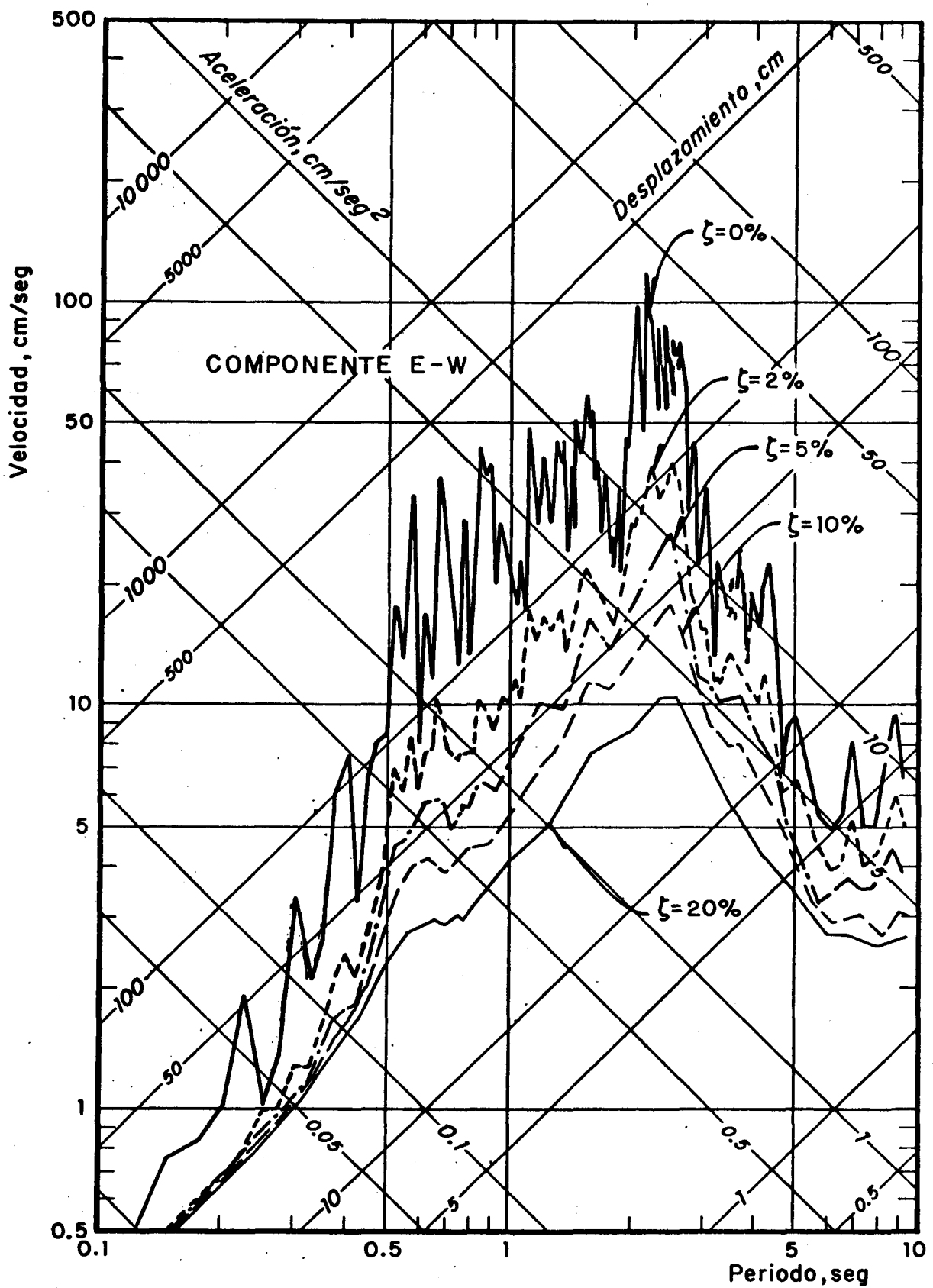


Fig 23 Espectros de respuesta. Cimentación Edificio Atizapán, 6 de julio de 1964

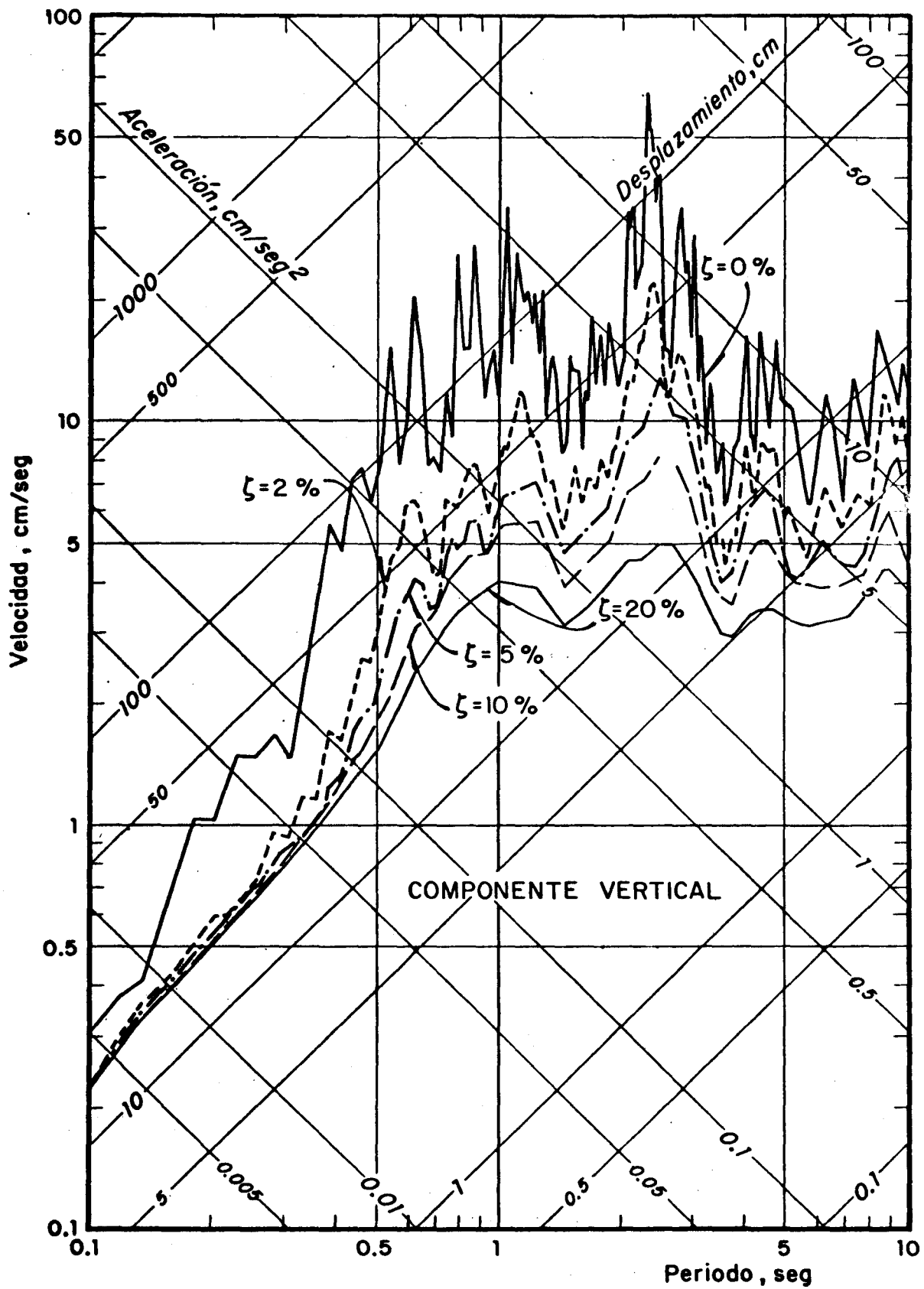


Fig 24 Espectros de respuesta. Cimentación Edificio Atizapán, 6 de julio de 1964

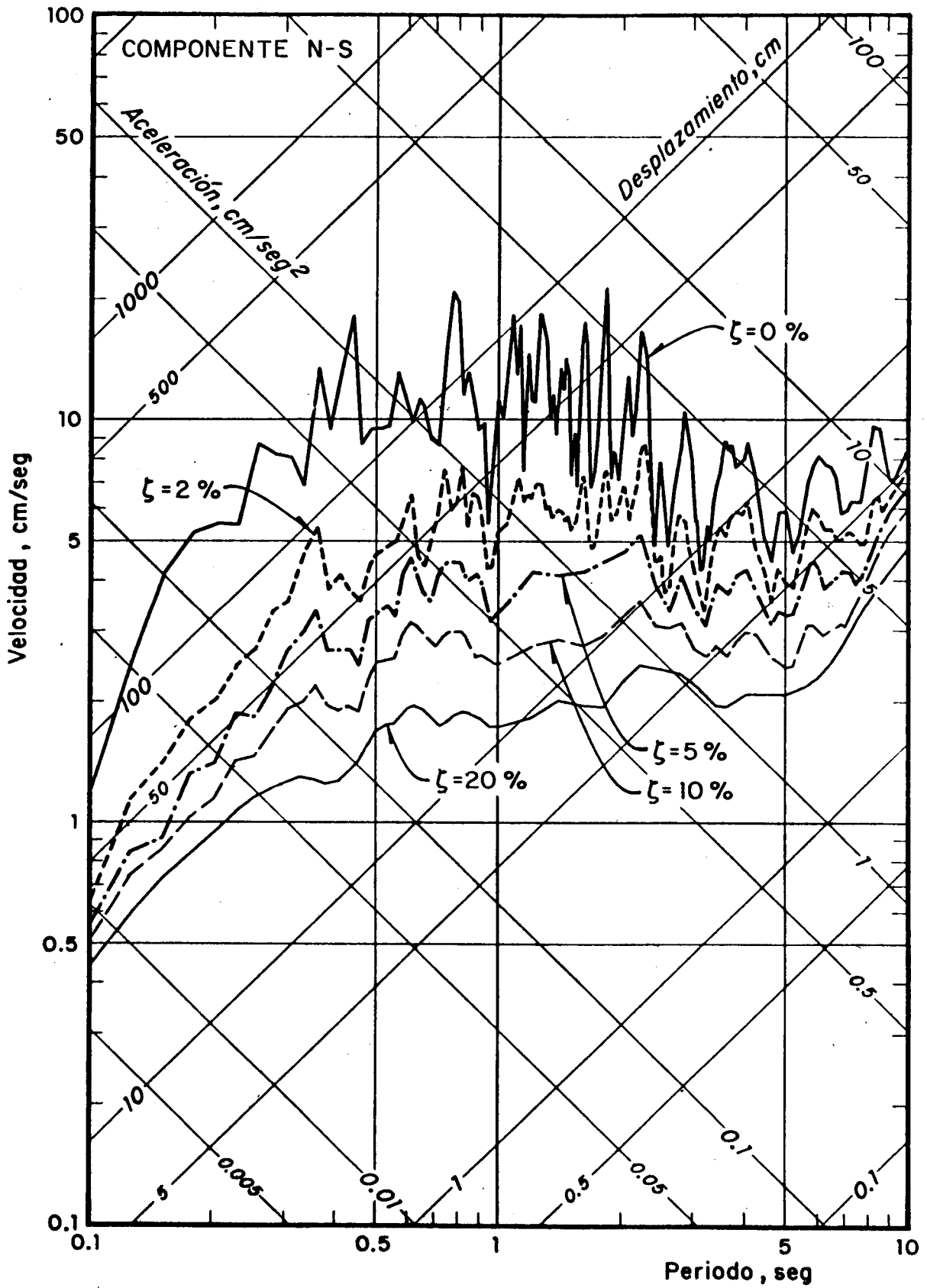


Fig 25 Espectros de respuesta. Ciudad Universitaria, 6 de julio de 1964

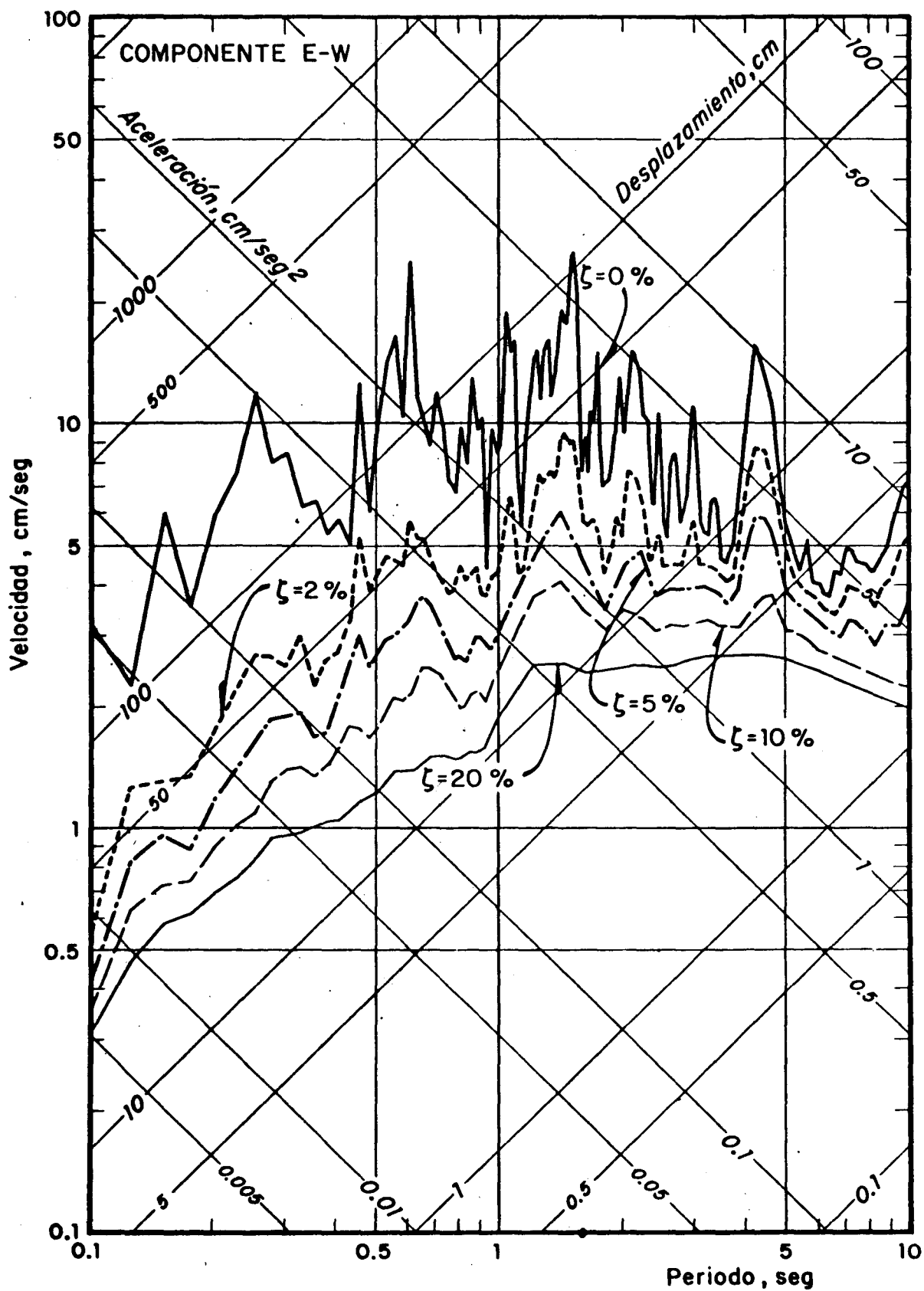


Fig 26 Espectros de respuesta. Ciudad Universitaria,
6 de julio de 1964

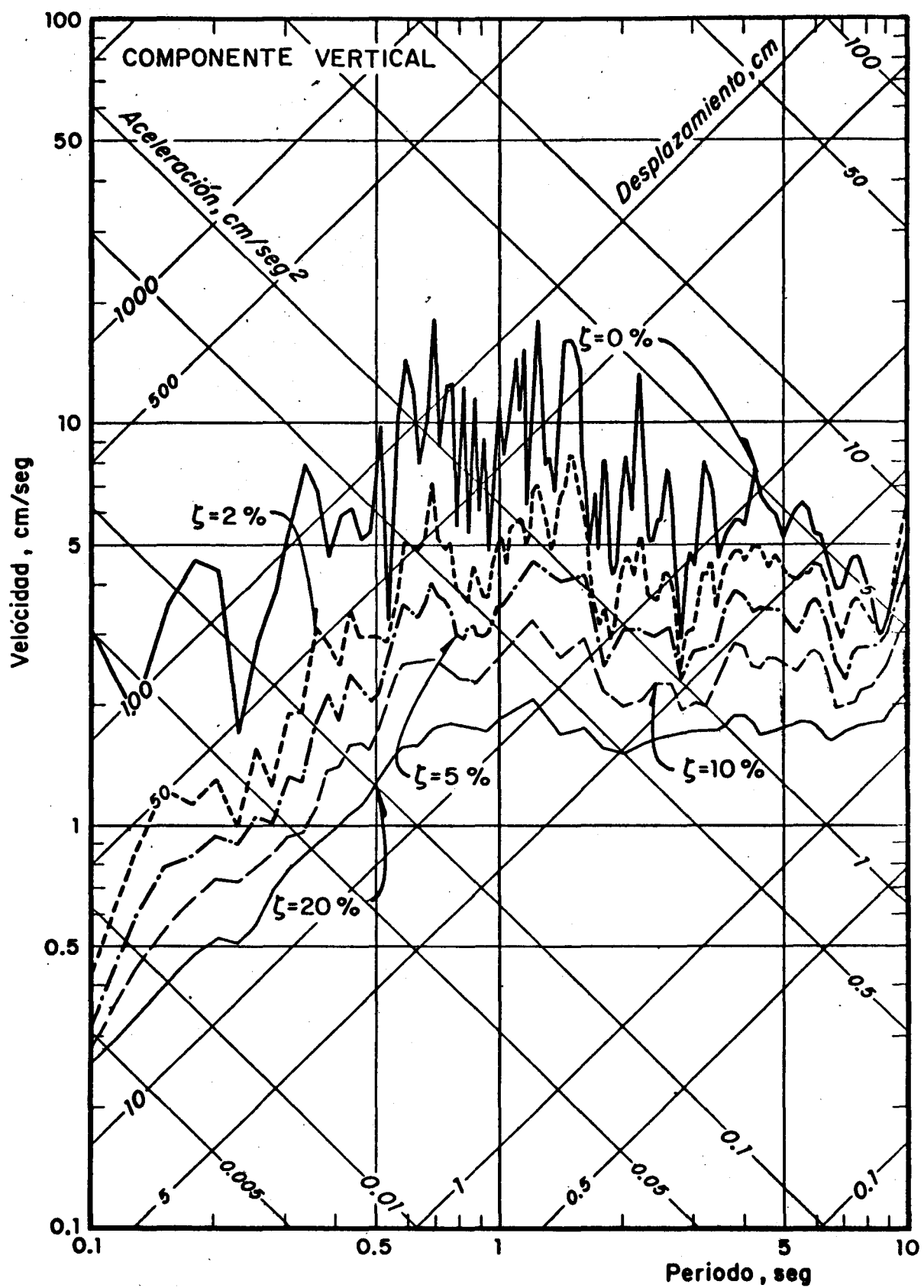


Fig 27 Espectros de respuesta. Ciudad Universitaria, 6 de julio de 1964

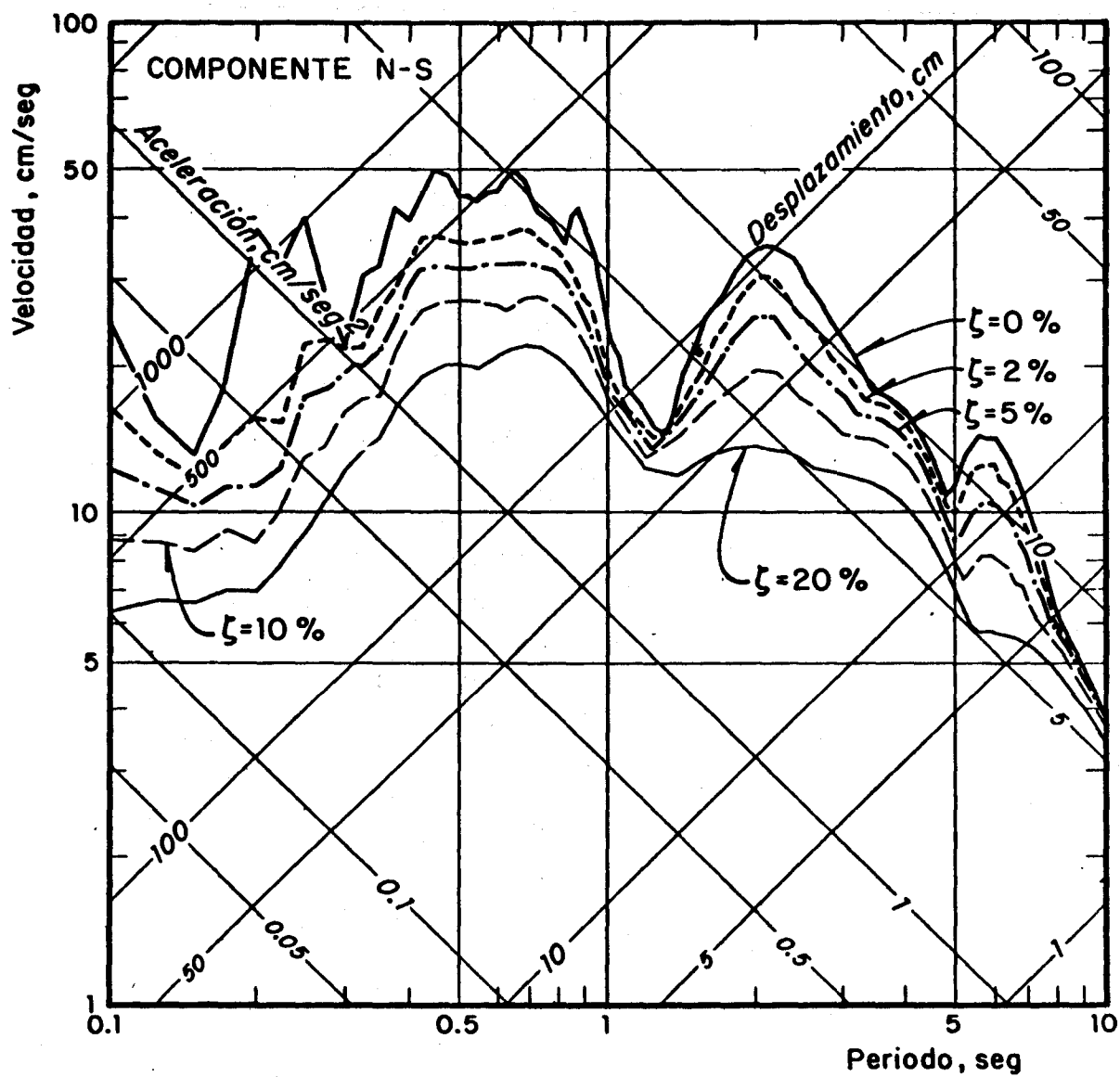


Fig 28 Espectros de respuesta. Acapulco, 9 de diciembre de 1965

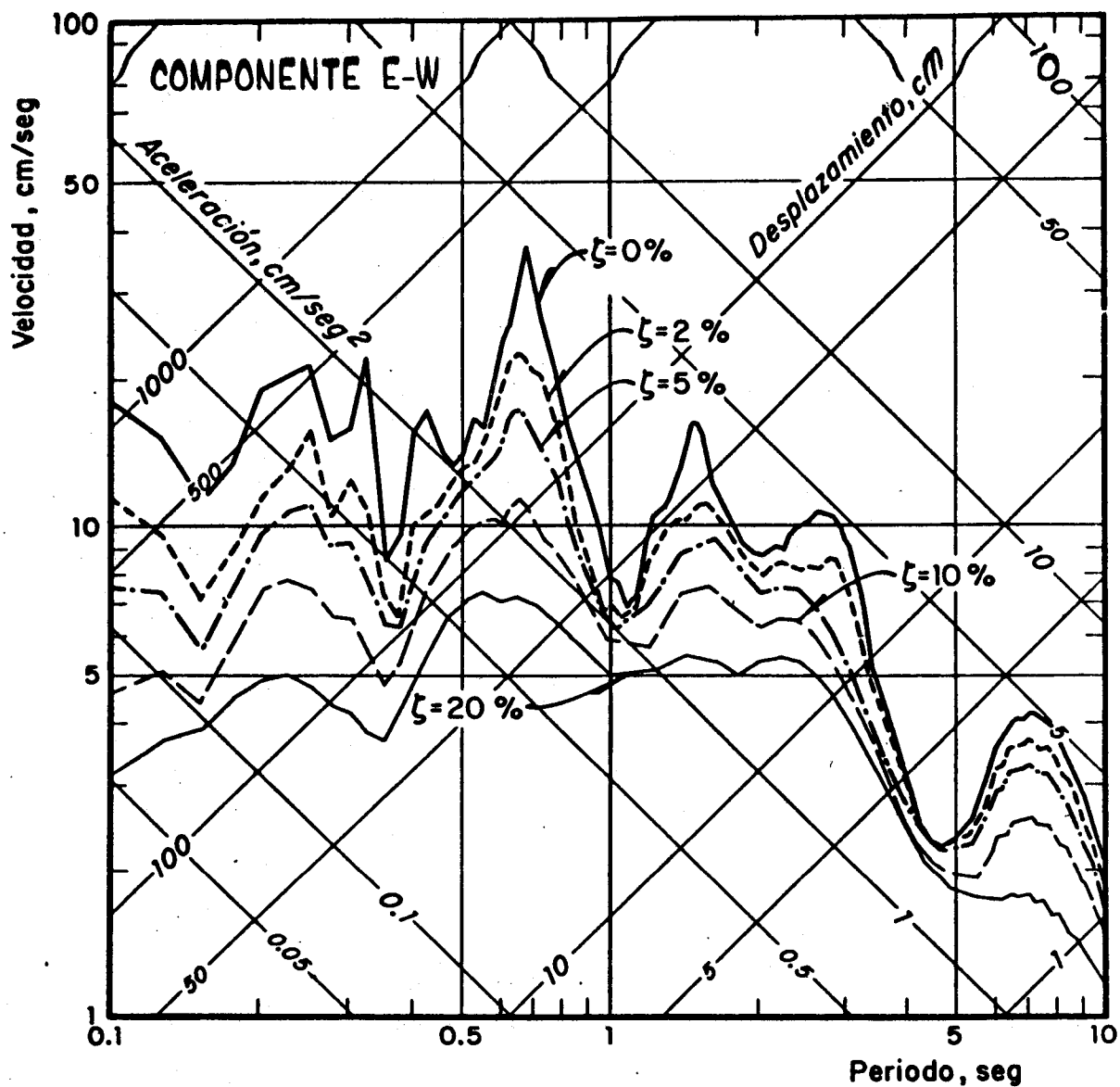


Fig 29 Espectros de respuesta. Acapulco, 9 de diciembre de 1965

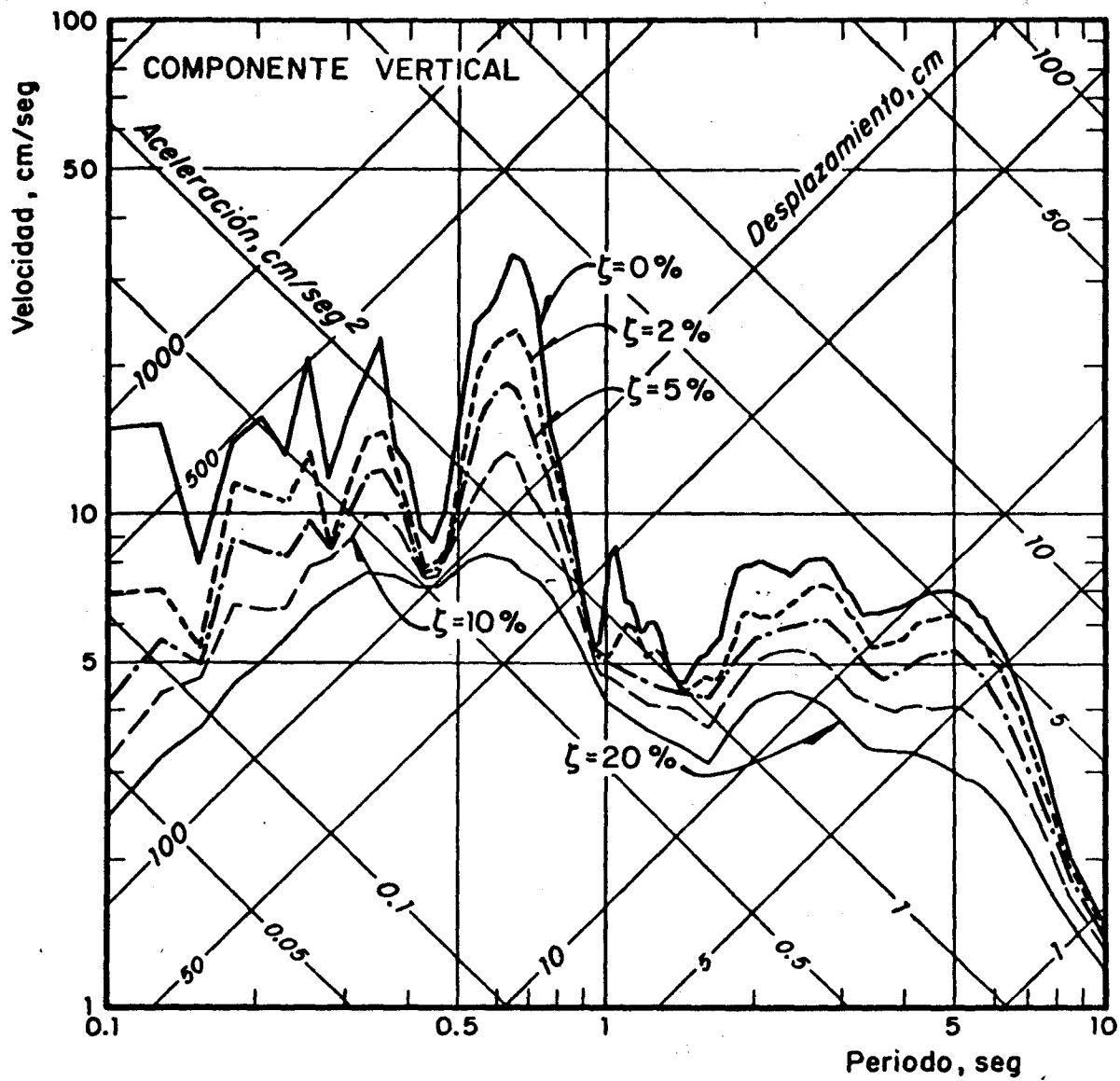


Fig 30 Espectros de respuesta. Acapulco, 9 de diciembre de 1965

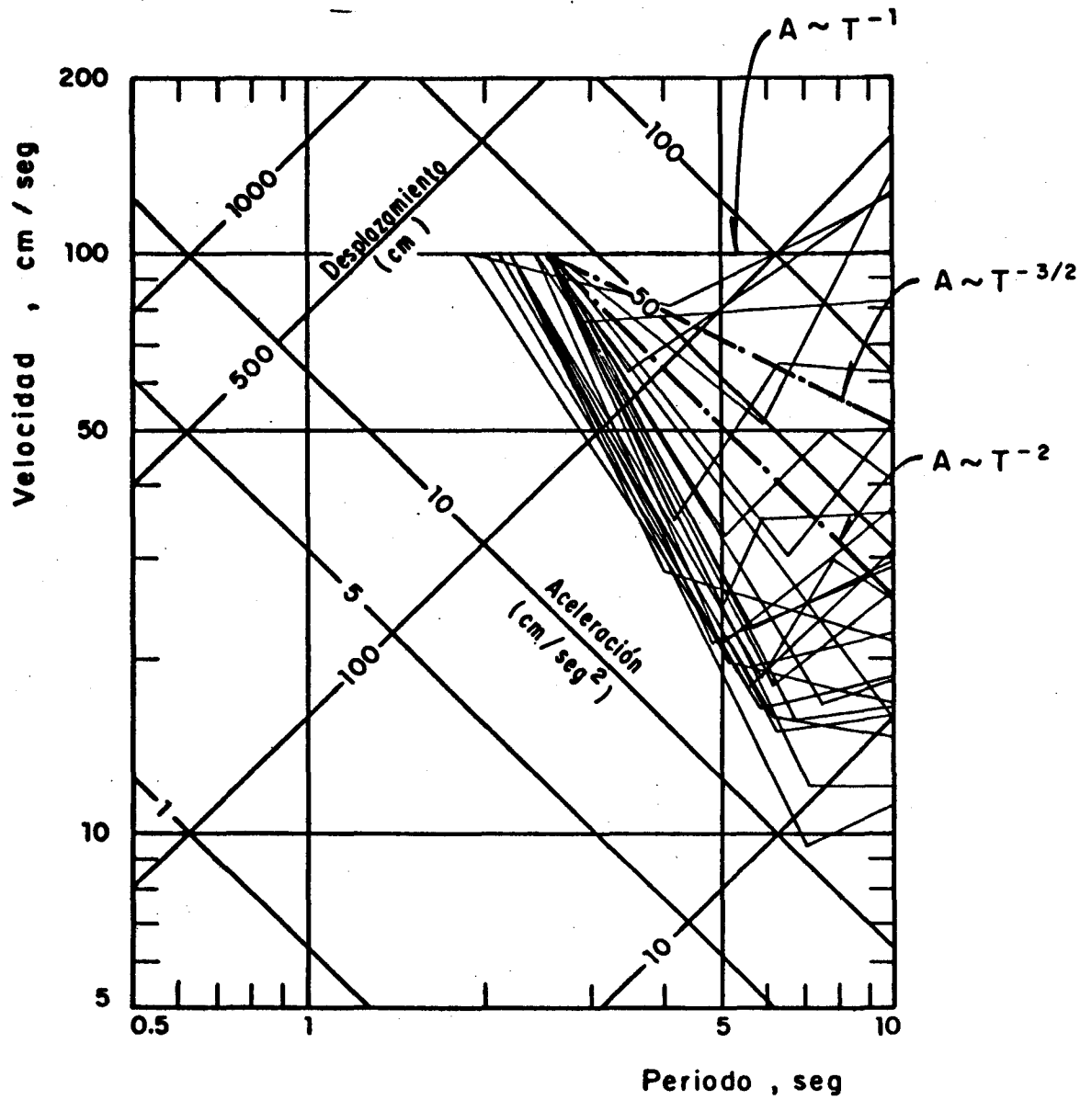


Fig 31 Envolventes de los espectros correspondientes a suelo blando