

1a. edición, Junio 1996

• SECRETARIA DE GOBERNACION
• CENTRO NACIONAL DE PREVENCION DE
DESASTRES
AV DELFIN MADRIGAL No. 665, COL. PEDREGAL SANTO
DOMINGO, DELEGACION COYOACAN, C.P. 04360,
MEXICO, D F.
TELEFONOS: 606 98 37, 606 97 39, 606 99 82
FAX: 606 16 08

• Autores: YAMASHITA ARCHITECTS & ENGINEERS
INC. OYO CORPORATION,
Revisado por: Miguel A. Santoyo.

Derechos reservados conforme a la ley
IMPRESO EN MEXICO. *PRINTED IN MEXICO*

Distribución Nacional e Internacional: Centro Nacional de
Prevención de Desastres

EL CONTENIDO DE ESTE DOCUMENTO ES
EXCLUSIVA RESPONSABILIDAD DE LOS AUTORES

SECRETARIA DE GOBERNACION

Lic. Emilio Chuayffet Chemor
Secretario de Gobernación

Lic. Juan Ramiro Robledo Ruiz
Subsecretario de Protección Civil y de Prevención
y Readaptación Social

CENTRO NACIONAL DE PREVENCION DE DESASTRES

Dr. Roberto Meli
Director General

Ing. Masao Nozawa
Director del Equipo Asesor Japonés

Dr. Mario Ordaz
Coordinador de Investigación

M. en I. Roberto Quaas
Coordinador de Instrumentación

Lic. Ricardo Cícero Betancourt
Coordinador de Difusión

SISTEMA NACIONAL DE PROTECCION CIVIL

SISTEMA NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL
CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES

ESTUDIOS DEL SUBSUELO EN EL VALLE DE MÉXICO.

YAMASHITA ARCHITECTS & ENGINEERS INC, OYO CORPORATION

Informe preparado para el CENAPRED

Revisado por
Miguel A. Santoyo

Área de Riesgos Geológicos

Febrero de 1996

CUADERNOS DE INVESTIGACION

P R E S E N T A C I O N

La Coordinación de Investigación del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) realiza estudios sobre las características de los fenómenos naturales y de las actividades humanas que son fuentes potenciales de desastres, así como sobre las técnicas y medidas que conducen a la reducción de las consecuencias de dichos fenómenos.

Las actividades enfocan la problemática de los Riesgos Geológicos (Sismos y Volcanes), de los Riesgos Hidrometeorológicos (Inundaciones, Huracanes, Sequías, Erosión) y de los Riesgos Químicos (Incendios, Explosiones, Contaminación por Desechos Industriales).

Los resultados de los estudios se publican en Informes Técnicos que se distribuyen a las instituciones y los especialistas relacionados con cada tema específico.

En adición a dichos Informes Técnicos de carácter muy especializado, el CENAPRED ha emprendido la publicación de esta serie, llamada CUADERNOS DE INVESTIGACION, con el fin de dar a conocer a un público más amplio aquellos estudios que se consideran de interés más general o que contienen información que conviene quede publicada en una edición más formal que la de los Informes Técnicos.

Los catálogos de Informes Técnicos y de Cuadernos de Investigación, así como las publicaciones específicas pueden obtenerse solicitándolos por escrito a la Coordinación de Investigación del CENAPRED, o pueden consultarse directamente en su Unidad de Información.

CONTENIDO

CONTENIDO.	.....
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	.....
CAPÍTULO 2. PERFORACIÓN Y MUESTREO.	.....
CAPÍTULO 3. DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES DE ONDAS P Y S EN POZOS.	.....
3.1 INSTRUMENTO Y PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN	.....
3.2 ANÁLISIS DE DATOS	.....
3.3 RESULTADOS	.....
CAPÍTULO 4. PROSPECCIÓN GRAVIMÉTRICA.	.....
4.1 MÉTODO DE MEDICIÓN	.....
4.2 ESTIMACIÓN DE LA ALTITUD DE LOS PUNTOS DE MEDICIÓN	.....
4.3 MÉTODO DE ANÁLISIS.	.....
4.4 RESULTADOS	.....
APÉNDICE A. RESULTADOS DE LOS SONDEOS	.....
APÉNDICE B. RESULTADOS DE MEDICIONES DE VELOCIDADES DE ONDAS P Y S.	.....
APÉNDICE C. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE MECÁNICA DE SUELOS	.....
C.1 INSTRUMENTOS DE PRUEBAS	.....
C.2 METODOLOGÍA	.....
C.2.1 PRUEBA DE COLUMNA RESONANTE	.....
C.2.2 PRUEBA DE TORSIÓN DINÁMICA	.....
C.2.3 PROCESAMIENTO DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS	.....
C.2.3.1 COLUMNA RESONANTE	.....
C.2.3.2 TORSIÓN DINÁMICA	.....
C.4 RESULTADOS	.....

APÉNDICE D. MAPAS TOPOGRÁFICOS Y DE ANOMALÍAS

GRAVIMÉTRICAS

AGRADECIMIENTOS

BIBLIOGRAFÍA.....

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES (CENAPRED), fue construido como resultado del convenio de cooperación entre los gobiernos de México y Japón, a través de la AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DEL JAPÓN (JICA), en conmemoración de los 100 años de cooperación comercial entre ambos países.

En este reporte se presentan los resultados de los estudios realizados para determinar las características dinámicas y estructura del subsuelo en el Valle de México.

En la tabla 1.1 se muestran el tipo de estudios realizados y el tiempo empleado en cada uno de ellos:

Tabla 1.1

ESTUDIO	PERIODO DE REALIZACIÓN
PERFORACIÓN Y MUESTREO	15/OCT/1988-24/NOV/1988
MEDICIÓN DE VELOCIDADES DE ONDAS P Y S	15/OCT/1988-24/NOV/1988
PROSPECCIÓN GRAVIMÉTRICA	12/OCT/1989-16/DIC/1989

CAPÍTULO 2

PERFORACIÓN Y MUESTREO

En algunos sitios destinados para la instalación de acelerógrafos, tanto en superficie como a profundidad, se realizaron perforaciones con el fin de conocer las características estratigráficas y elastodinámicas del subsuelo. En la fig. 2.1 se muestra la localización de los sitios en donde se realizaron las perforaciones y en la tabla 2.1 la profundidad de cada una de ellas.

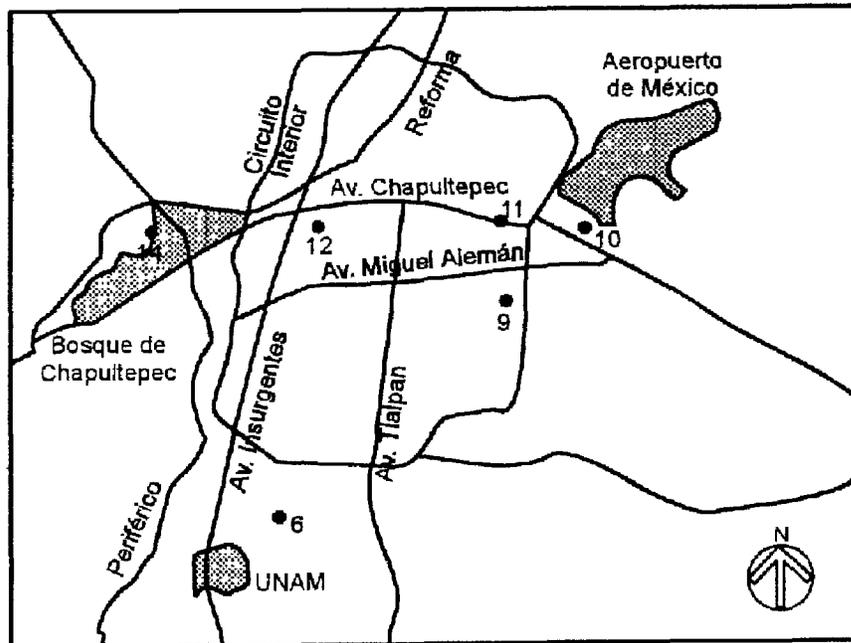


Fig. 2.1 Localización de pozos

Tabla 2.1 Profundidades de los pozos

No. DE POZO	PROFUNDIDAD (m)
6	70
9	90
10	90
11	90
12	200
14	90
TOTAL DE METROS PERFORADOS	630

Para la perforación de los pozos se usó un sistema rotatorio convencional y una barrena tricónica de 90 mm de diámetro; en todos los casos se obtuvo información estratigráfica. Particularmente, en cada uno de los pozos 9 y 11 se obtuvieron cinco muestras, para pruebas de mecánica de suelos, con espaciamiento de 5 m entre 5 y 25 m de profundidad.

CAPÍTULO 3

DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES DE ONDAS P Y S EN POZOS.

3.1 INSTRUMENTO Y PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN

Con el fin de conocer las velocidades de propagación de las ondas P y S para cada estrato y, con base en éstas, calcular sus propiedades elastodinámicas se utilizó, en todos los pozos de la tabla 2.1, un sistema de sonda suspendida que funciona dentro del fluido de perforación emitiendo ondas de compresión y de corte mediante un vibrador electromagnético. Dichas ondas son detectadas por dos juegos de geófonos incorporados dentro del mismo instrumento y aislados del vibrador. La sonda es operada desde el exterior mediante la unidad de control y registro como se muestra en la fig. 3, donde también se muestran sus componentes principales. En la tabla 3.1 se listan sus especificaciones.

Para llevar al cabo las mediciones, se introdujo la sonda hasta la profundidad deseada y se realizaron los siguientes pasos de forma automática:

a) Se excitó el vibrador en el sentido N (Normal) y se registró el movimiento horizontal mediante el geófono dispuesto horizontalmente.

b) Se excitó el vibrador en el sentido R (Inverso) y se registró el movimiento horizontal usando el mismo geófono que en el punto anterior.

c) Se excitó el vibrador en el sentido N (Normal) y se registró el movimiento vertical mediante el geófono dispuesto verticalmente.

Cada tres mediciones se observaron las formas de onda en la pantalla de la unidad de control, con el fin de revisar si la relación señal-ruido era aceptable. En los casos en que no fue así, se repitió el proceso (a-c) hasta obtener un resultado adecuado. Una vez verificada la calidad del registro, se grabaron las formas de onda. Las mediciones se realizaron, como se mencionó anteriormente, en los pozos 6,9,10,11,12 y 14 a cada metro hasta la profundidad indicada.

3.2 ANÁLISIS DE DATOS

La velocidad de propagación de ondas P y S se pueden expresar como:

$$V_p = \frac{L}{\Delta T_p} \quad (3.1)$$

$$V_s = \frac{L}{\Delta T_s} \quad (3.2)$$

Donde:

V_p velocidad de ondas P

V_s velocidad de ondas S

L distancia entre geófonos

ΔT_p tiempo de viaje de las ondas P, entre geófonos

ΔT_s tiempo de viaje de las ondas S, entre geófonos

Por medio de los registros de las formas de onda es posible conocer los tiempos de viaje entre geófonos, tanto de las ondas P (ΔT_p) como de las S (ΔT_s). Para las ondas P, se utilizan los registros obtenidos con los geófonos verticales y para las ondas S los registros obtenidos con los geófonos horizontales. En este último caso, si se cambia el sentido de la excitación, se invierte la fase de las ondas; aprovechando esta característica, los tiempos de viaje entre los geófonos se calculan utilizando los registros obtenidos con excitaciones normal e inversa.

Así, los tiempos de viaje entre geófonos se calculan mediante los tiempos de viaje entre la fuente de ondas y los geófonos, esto es, si $t(i)$ es el tiempo de viaje entre la fuente y el geófono superior, $t(i-1)$ el tiempo de viaje entre la fuente y el geófono inferior y $r=1$ m la distancia entre geófonos (fig. 3.1), el tiempo de viaje entre los dos receptores es

$$T_i = t(i) - t(i-1) \quad (3.3)$$

Suponiendo que la fuente se encontrara en la superficie, cerca de la boca del pozo, el tiempo de viaje entre la fuente y el receptor a una profundidad D_j se calcula mediante la suma:

$$T_j = \sum_{i=1}^j \Delta T_i \quad (3.4)$$

Para obtener la velocidad promedio del paquete de estratos estudiado, se elaboraron curvas de camino-tiempo con base en los resultados de las mediciones realizadas y la expresión anterior. Las curvas de camino-tiempo se construyeron graficando T_j vs D_j , cuya pendiente resulta ser la velocidad promedio a la profundidad D_j .

Por otra parte, las constantes elásticas pueden obtenerse a partir de las velocidades de propagación de ondas P y S mediante:

$$\nu = \frac{\frac{\alpha^2}{2\beta^2} - 1}{\left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^2 - 1} \quad (3.5)$$

donde ν es la relación de Poisson, α es la velocidad de propagación de las ondas P y β es la velocidad de propagación de las ondas S;

$$G = \beta^2 \rho \quad (3.6)$$

donde G es el módulo de rigidez al cortante, β la velocidad de propagación de las ondas S y ρ la densidad de masa;

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (3.7)$$

donde E es el módulo de Young y G y ν ya han sido descritos.

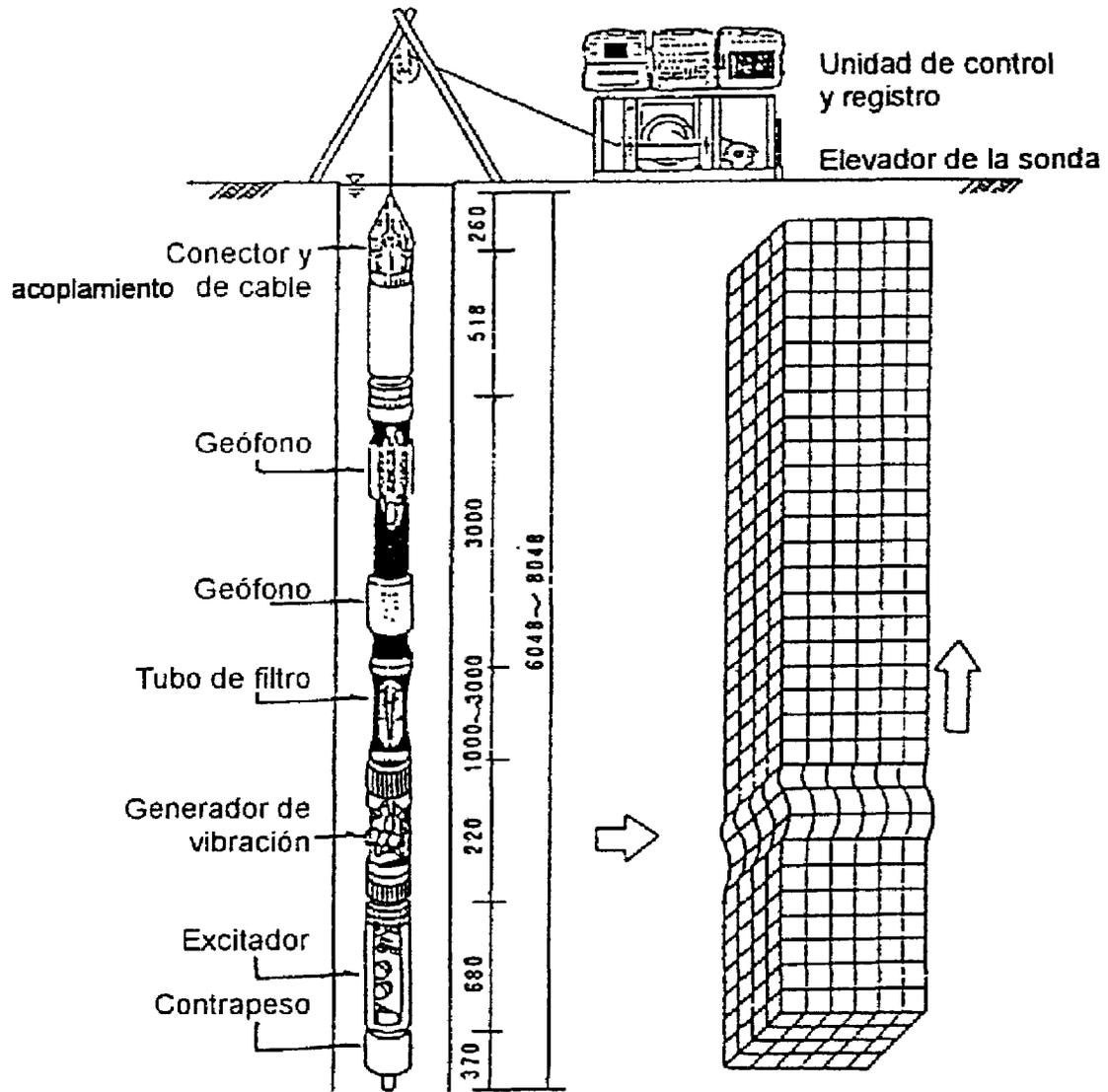
Los valores de densidad de masa se definieron a partir de información de pozos ya existentes y de las pruebas de mecánica de suelos.

Tabla 3.1 Especificaciones de la sonda para el estudio de velocidades en pozos

1-1 Amplificador	
Impedancia de entrada	600 Ω
Ganancia	5~5,000 (10 pasos)
Filtro	
Rango inferior	100, 200, 400, 800, Hz: 24 dB /oct.
Rango superior	500, 1K, 2K, 5 KHz: 24 dB /oct.
Convertidor A/D	12 bits
Capacidad de memoria	12 bits X 1,024 palabras/ch
1-2 Unidad de control	
(1) Control A/D	
Rango de registro	10. 20. 50. 100 mseg.
Intervalo de muestreo	10. 20. 50. 100 μ seg.
Número de superposiciones	1. 2. 4. 8. automático, manual
Retardo de inicio de grabación	0~99 msec (1msec step)
(2) Medidor de profundidad	0~999.9 m (0.1m step)
(3) Oscilador	
Potencia	1 ~ 100 mVPP
Frecuencia	500 Hz
2.1 Pantalla CRT	
Pantalla	7.5 pulgadas, de color verde
2.2. Impresora	
Método de impresión	Del tipo de descarga eléctrica
Tamaño del papel para registro	216 X 40m
3. Unidad de suministro de energía	
Voltaje de entrada	110 VAC, 12 VOC
4. Cable de suspensión	
Dimensiones	971L X 530W X 500h
Tipo	Cable trenzado de 7 trenzas
Diámetro	6.35 cm
Carga máxima	120 kgs

DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES DE ONDAS P Y S EN POZOS

5. Sonda	
5-1 Reductor de cabeza. Compartimiento de baterías	
Dimensiones	52 Ø X 517.5 mm
Peso	4.6 kgs
Baterías	UM-3 X 8 unidades (+ 6v)
Componente de movimiento	Opción para movimiento vertical u horizontal
5-2 Receptor	
Componentes	Un componente vertical y uno horizontal: 28 Hz 0.11V/kine
Forma de recepción	Tipo suspensión
Distancia entre los receptores	1.0 m
Impedancia de entrada y salida	600 Ω
Amplificación	450
Frecuencia	200 - 5 KHz (-3dB)
Dimensiones y peso	52 X 3,000 mm; 9.2 kg
5-3 Tubo de filtro	
Dimensiones	54Ø X 1,000 mm 54Ø X 2,000 mm
Peso	4.2 kg, 6.0 kg
5-4 Generador de Vibración P-S	
Dimensiones	50Ø X 22 mm
Peso	2.5 kg
Tipo	Selenoide electromagnético
5-5 Excitador	
Tipo	Condensador de sistema de carga y descarga
Capacidad máxima de carga	300V X 330µF
Tiempo de excitación	0.1~1.6 mseg (5 opciones)
Dimensiones y peso	50Ø X 680 mm; 5 kg
5-6 Compartimiento de baterías	
Dimensiones	50Ø X 370 mm
Peso	4.6 kg
Batería integral	UM-3 X 4 unidades (+6V)



Esquema del instrumento

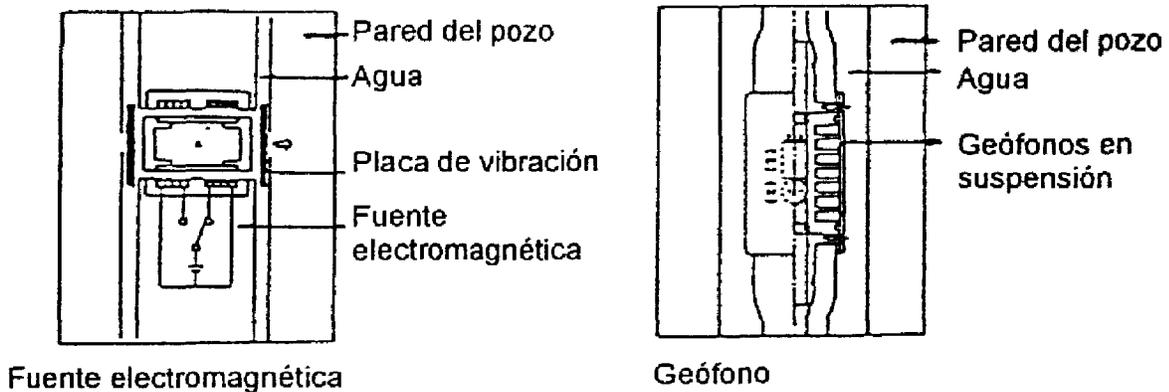


Fig. 3.1 Sistema de medición de velocidades de ondas P y S

DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES DE ONDAS P Y S EN POZOS

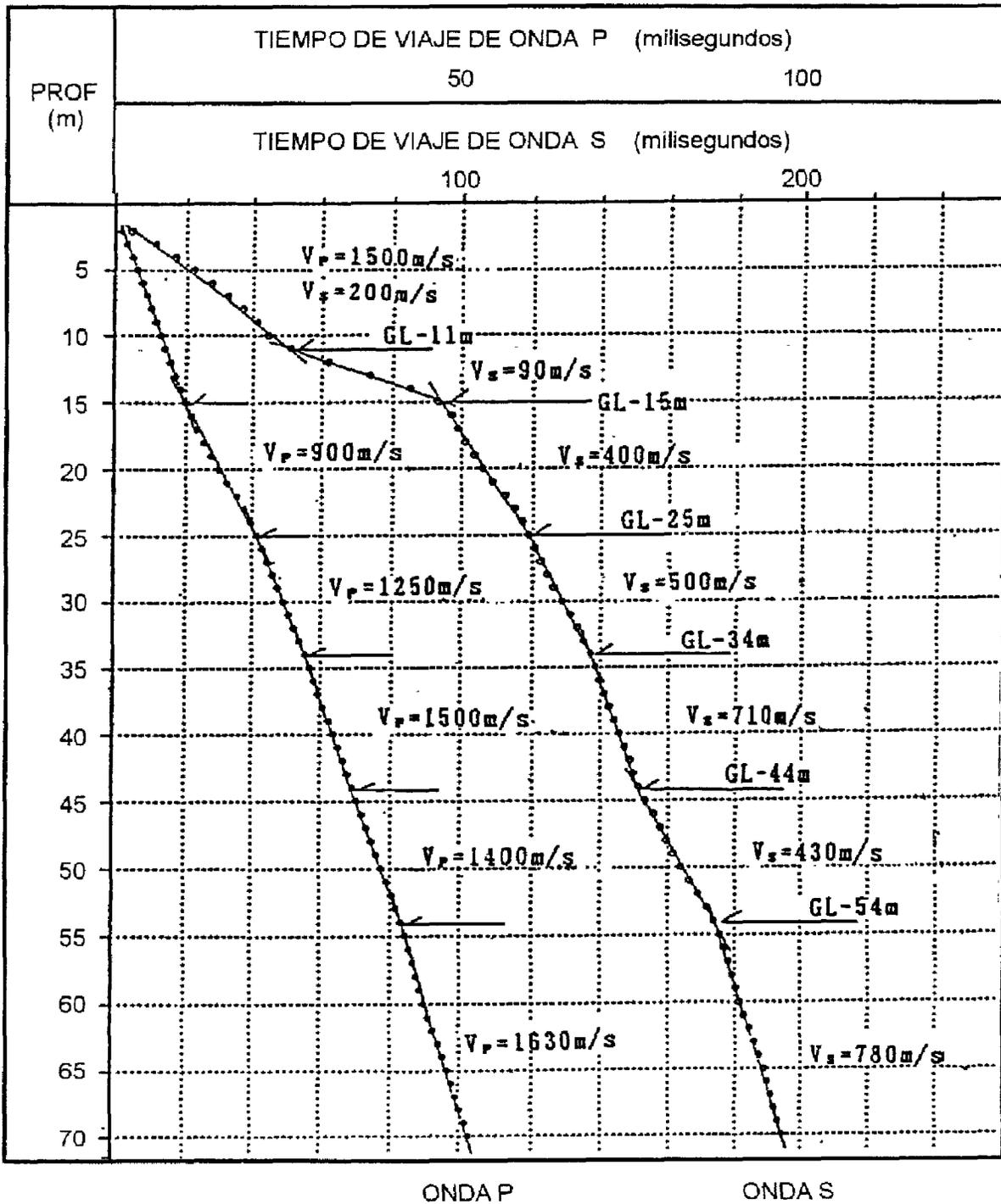


Fig. 3.2 Velocidades de ondas P y S en el pozo no. 6

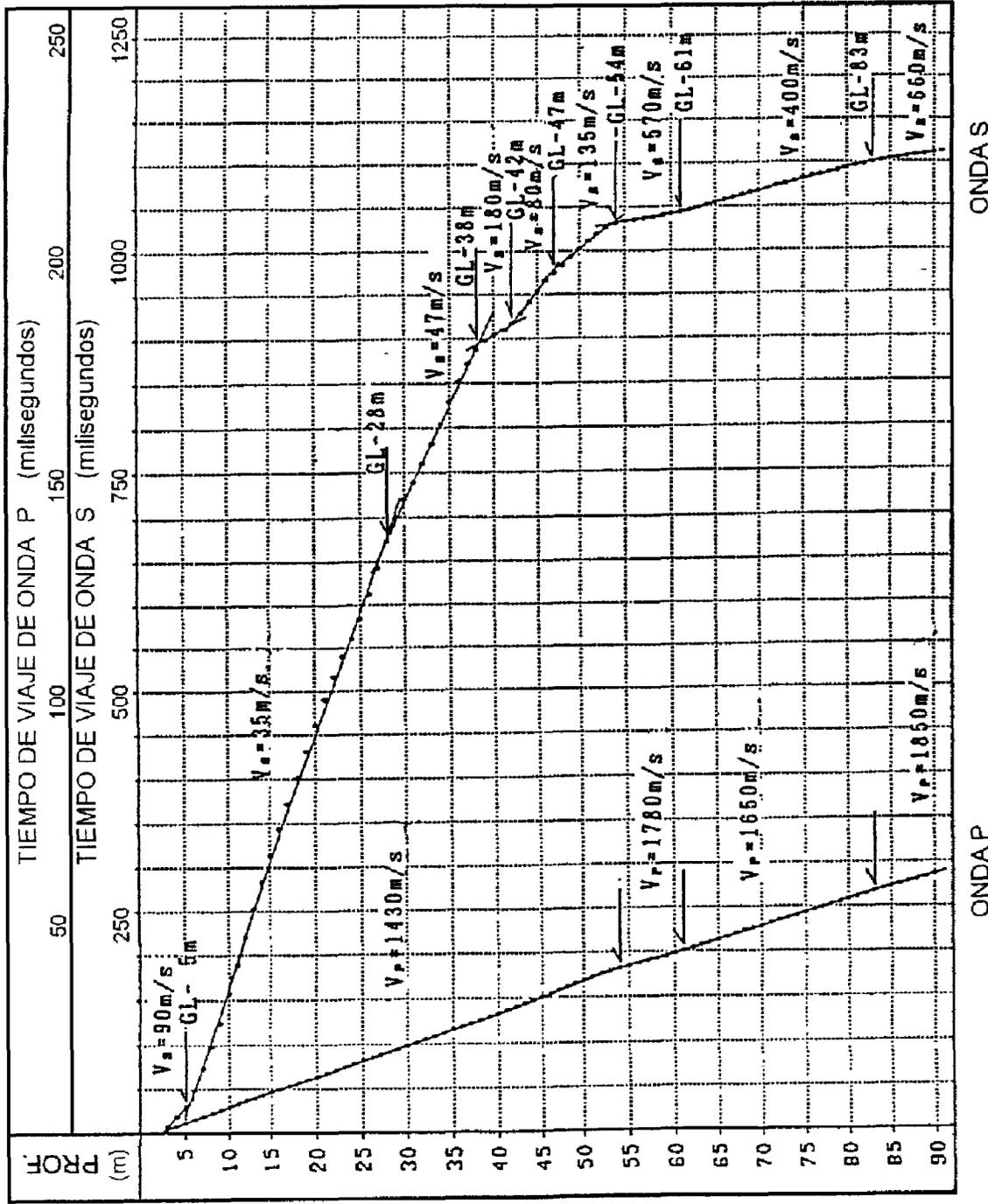


Fig. 3.3 Velocidades de ondas P y S en el pozo no. 9

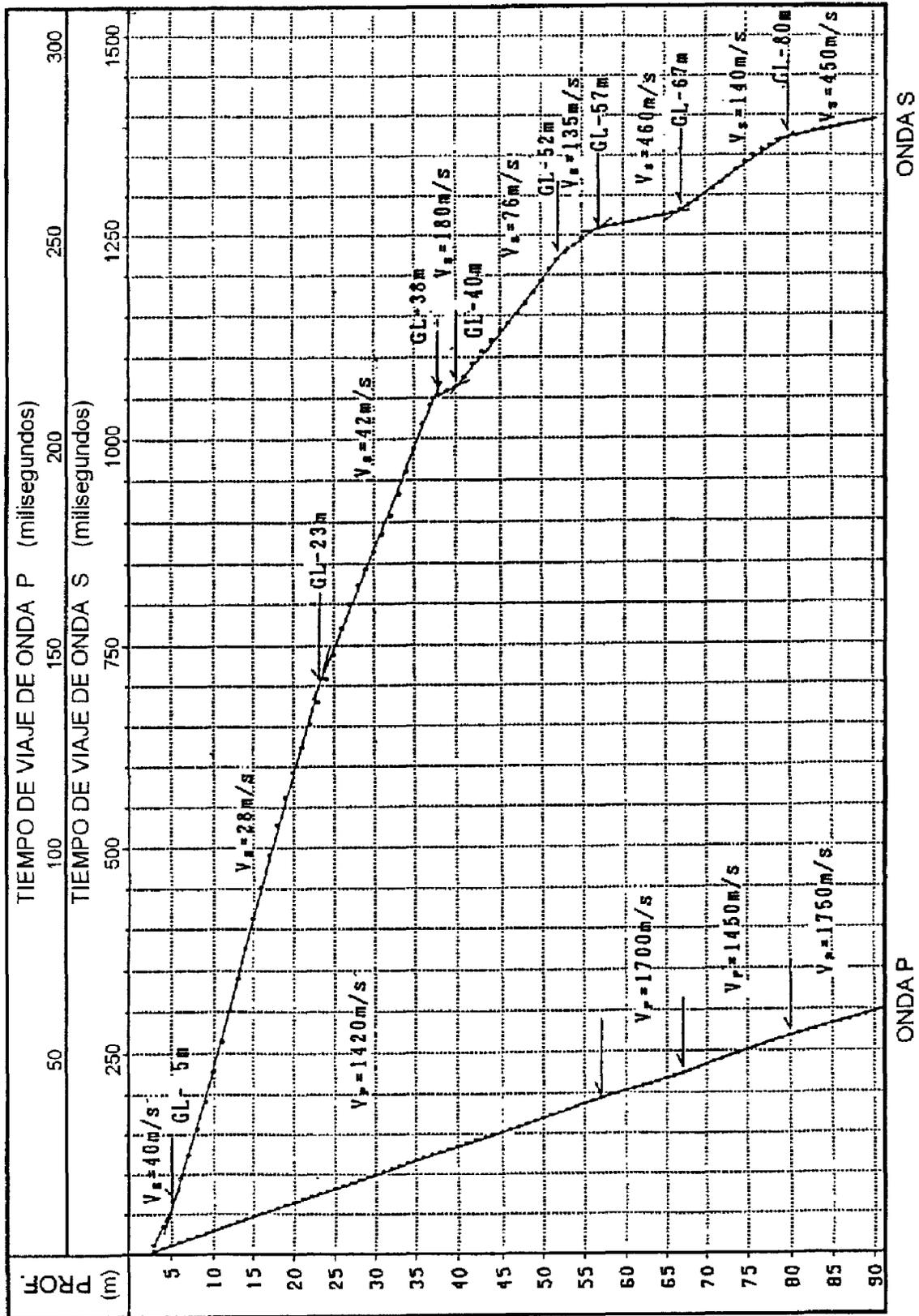
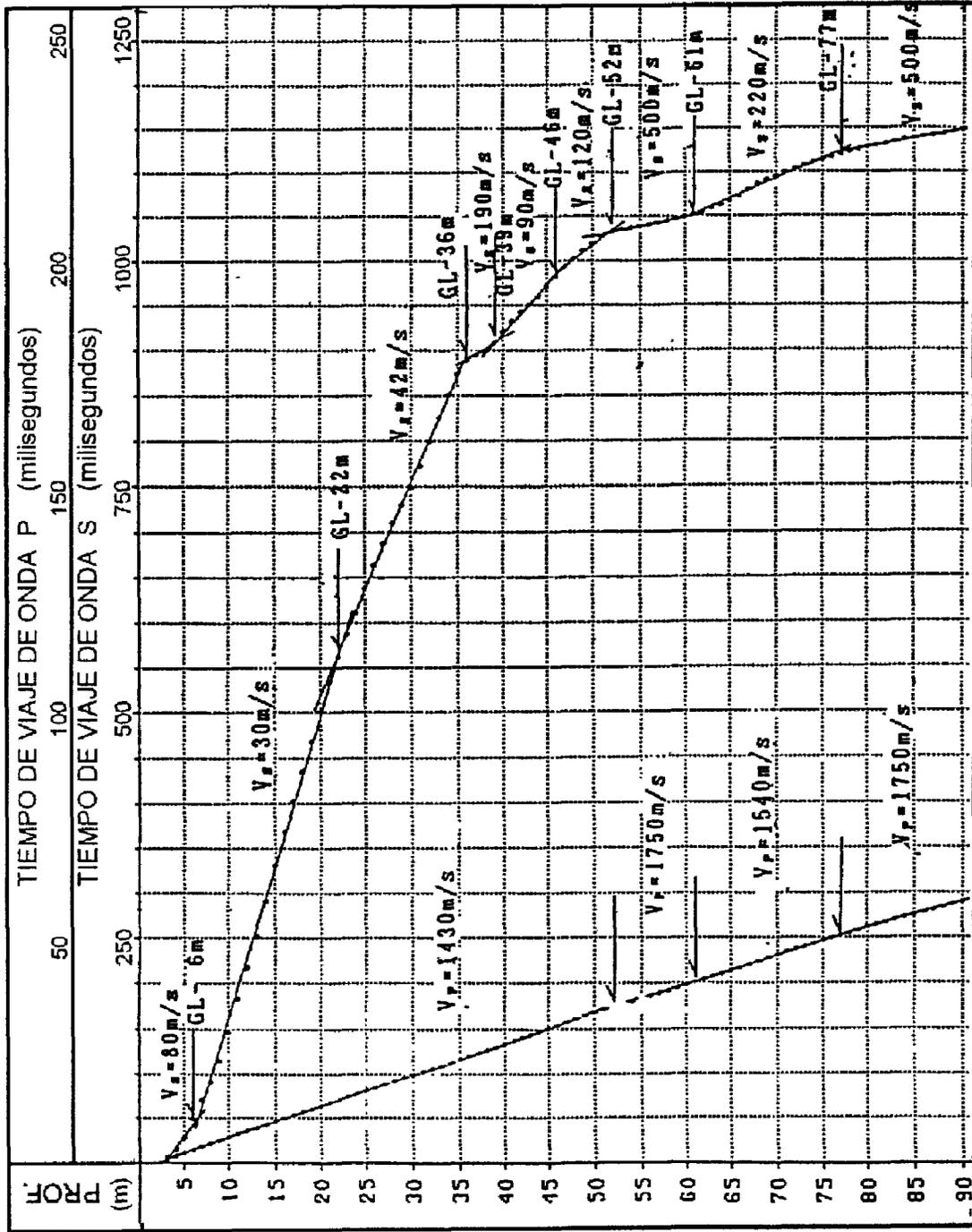


Fig. 3.4 Velocidades de ondas P y S en el pozo no. 10



ONDA S

ONDA P

Fig. 3.5 Velocidades de ondas P y S en el pozo no. 11

DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES DE ONDAS P Y S EN POZOS

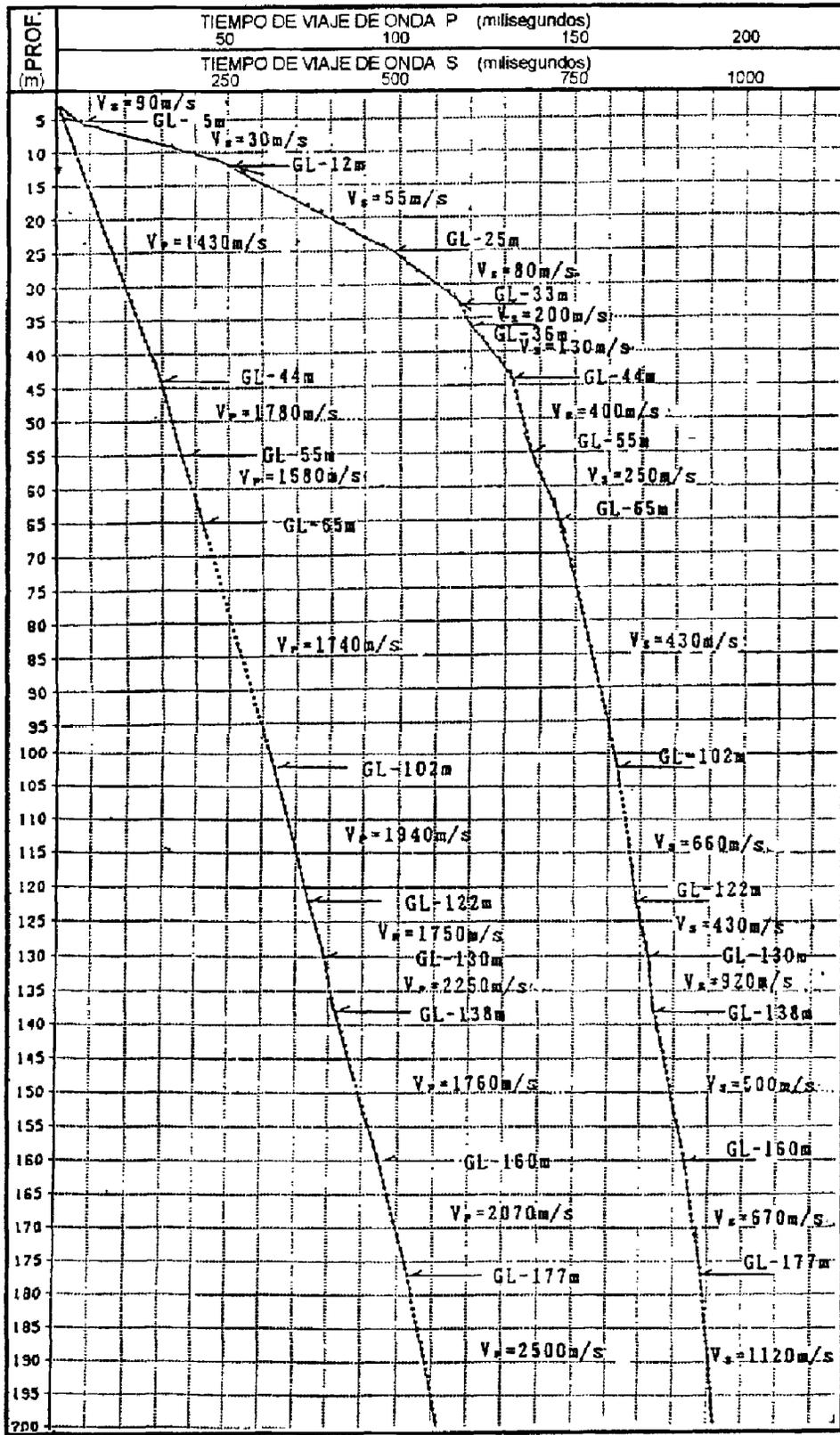


Fig. 3.6 Velocidades de ondas P y S en el pozo no. 12

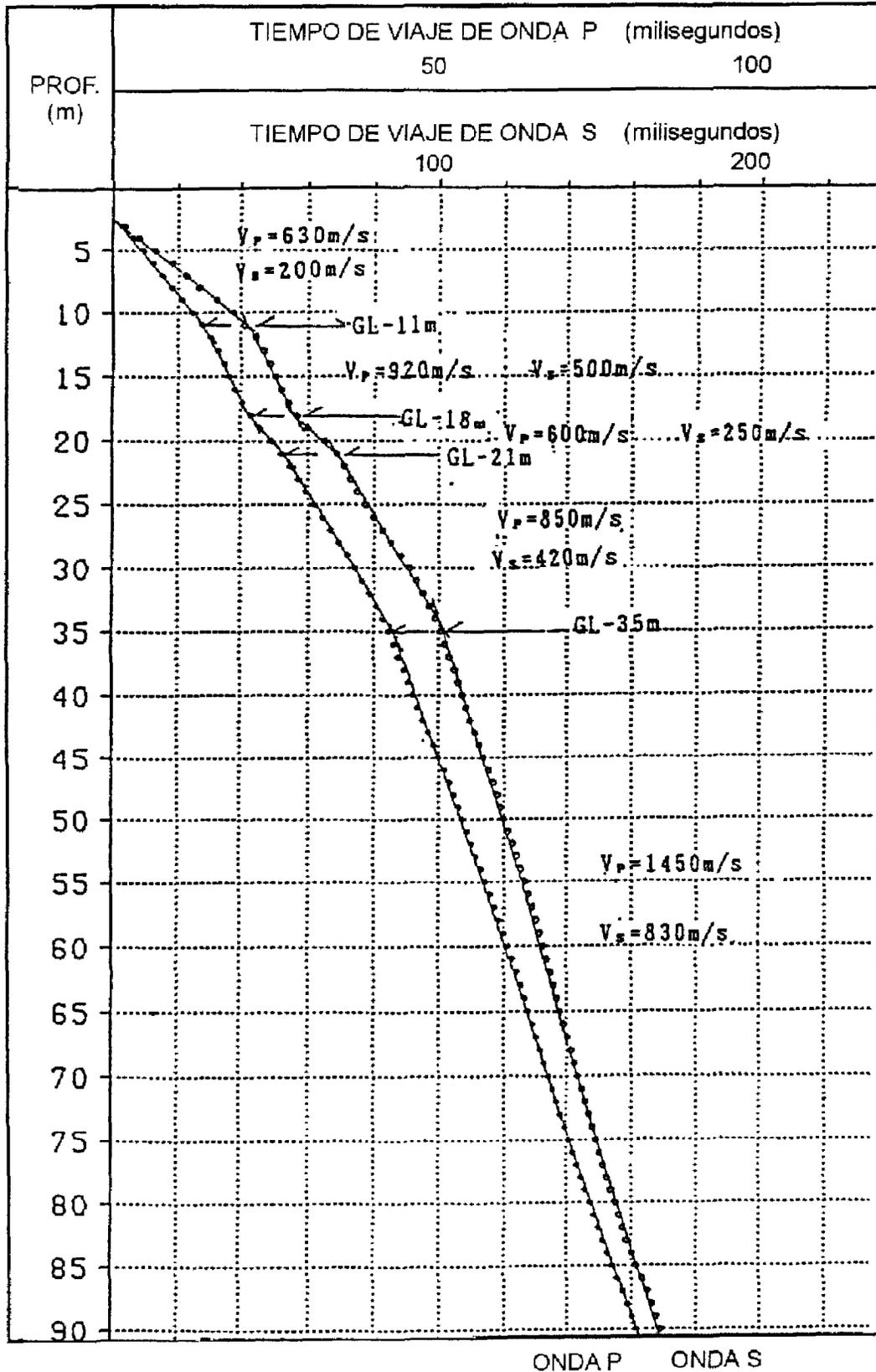


Fig. 3.7 Velocidades de ondas P y S en el pozo no. 14

3.3 RESULTADOS

Las curvas de camino-tiempo para ondas P y S, obtenidas como resultado de las mediciones, se muestran en las figs. 3.2 a 3.7 y las historias de tiempo para ondas P y S se anexan al final de este reporte. Así mismo, las velocidades se listan en las tablas 3.2 a 3.7. En las figs. 3.8 a 3.13 se muestran los valores de densidad de masa, las constantes elásticas calculadas para cada estrato y los resultados de las pruebas de mecánica de suelos.

Por otra parte, se realizaron dos secciones estratigráficas con el objeto de conocer la distribución de velocidades de ondas S en distintas direcciones. En la fig. 3.14 se indican, en planta, las direcciones de las secciones A-A' y B-A', y en las figs. 3.15 y 3.16 se muestran las secciones estratigráficas correspondientes junto con las velocidades de ondas S.

Como puede observarse en las dos secciones en la zona de depósitos lacustres, el estrato de arcilla de consistencia blanda más superficial, tiene velocidades inferiores a 50 m/s y en la zona de transición donde se encuentran depósitos de arenas y limos, las velocidades de propagación de las ondas S son de más de 400 m/s.

Tabla 3.2 Distribución de velocidades de ondas P y S en el pozo no. 6

ESTRATOS	VELOCIDAD DE ONDA P		ESTRATOS	VELOCIDAD DE ONDA S	
	PROF. (m)	VELOCIDAD m/s		PROF. (m)	VELOCIDAD m/s
I	2~11	1500	I	2~11	200
			II	11~15	90
II	15~25	900	III	15~25	400
III	25~34	1250	IV	25~34	500
IV	34~44	1500	V	34~44	710
V	44~54	1400	VI	44~54	430
VI	54~70	1630	VII	54~70	780

Tabla 3.3 Distribución de velocidades de ondas P y S en el pozo no. 9

ESTRATOS	VELOCIDAD DE ONDA P		ESTRATOS	VELOCIDAD DE ONDA S	
	PROF. (m)	VELOCIDAD m/s		PROF. (m)	VELOCIDAD m/s
I	3~54	1430	I	3~5	90
			II	5~28	35
			III	28~38	47
			IV	38~42	180
			V	42~47	80
			VI	47~54	135
II	54~61	1780	VII	54~61	570
III	61~83	1650	VIII	61~83	400
IV	83~90	1850	IX	83~90	660

Tabla 3.4 Distribución de velocidades de ondas P y S en el pozo no. 10

ESTRATOS	VELOCIDAD DE ONDA P		ESTRATOS	VELOCIDAD DE ONDA S	
	PROF. (m)	VELOCIDAD m/s		PROF. (m)	VELOCIDAD m/s
I	3~57	1420	I	3~5	40
			II	5~23	28
			III	23~38	42
			IV	38~40	180
			V	40~52	76
			VI	52~57	135
II	57~67	1700	VII	57~67	460
III	67~80	1450	VIII	67~80	140
IV	80~90	1750	IX	80~90	450

Tabla 3.5 Distribución de velocidades de ondas P y S en el pozo no. 11

ESTRATOS	VELOCIDAD DE ONDA P		ESTRATOS	VELOCIDAD DE ONDA S	
	PROF. (m)	VELOCIDAD m/s		PROF. (m)	VELOCIDAD m/s
I	3~52	1430	I	3~6	80
			II	6~22	30
			III	22~36	42
			IV	36~39	190
			V	39~46	90
			VI	46~52	120
II	52~61	1750	VII	52~61	500
III	61~77	1540	VIII	61~77	220
IV	77~90	1750	IX	77~90	500

DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES DE ONDAS P Y S EN POZOS

Tabla 3.6 Distribución de velocidades de ondas P y S en el pozo no. 12

ESTRATOS	VELOCIDAD DE ONDA P		ESTRATOS	VELOCIDAD DE ONDA S	
	PROF. (m)	VELOCIDAD m/s		PROF. (m)	VELOCIDAD m/s
I	3~44	1430	I	3~5	90
			II	5~12	30
			III	12~25	55
			IV	25~33	80
			V	33~36	200
			VI	36~44	130
II	44~55	1780	VII	44~55	400
III	55~65	1580	VIII	55~65	250
IV	65~102	1750	IX	65~102	430
V	102~122	1940	X	102~122	660
VI	122~130	1750	XI	122~130	430
VII	130~138	2250	XII	130~138	920
VIII	138~160	1760	XIII	138~160	500
IX	160~177	2070	XIV	160~177	670
X	177~200	2500	XV	177~200	1120

Tabla 3.7 Distribución de velocidades de ondas P y S en el pozo no. 14

ESTRATOS	VELOCIDAD DE ONDA P		ESTRATOS	VELOCIDAD DE ONDA S	
	PROF. (m)	VELOCIDAD m/s		PROF. (m)	VELOCIDAD m/s
I	3 ~11	630	I	3 ~11	200
II	11~18	920	II	11~18	500
III	18~21	600	III	18~21	250
IV	21~35	850	IV	21~35	420
V	35~90	1450	V	35~90	830

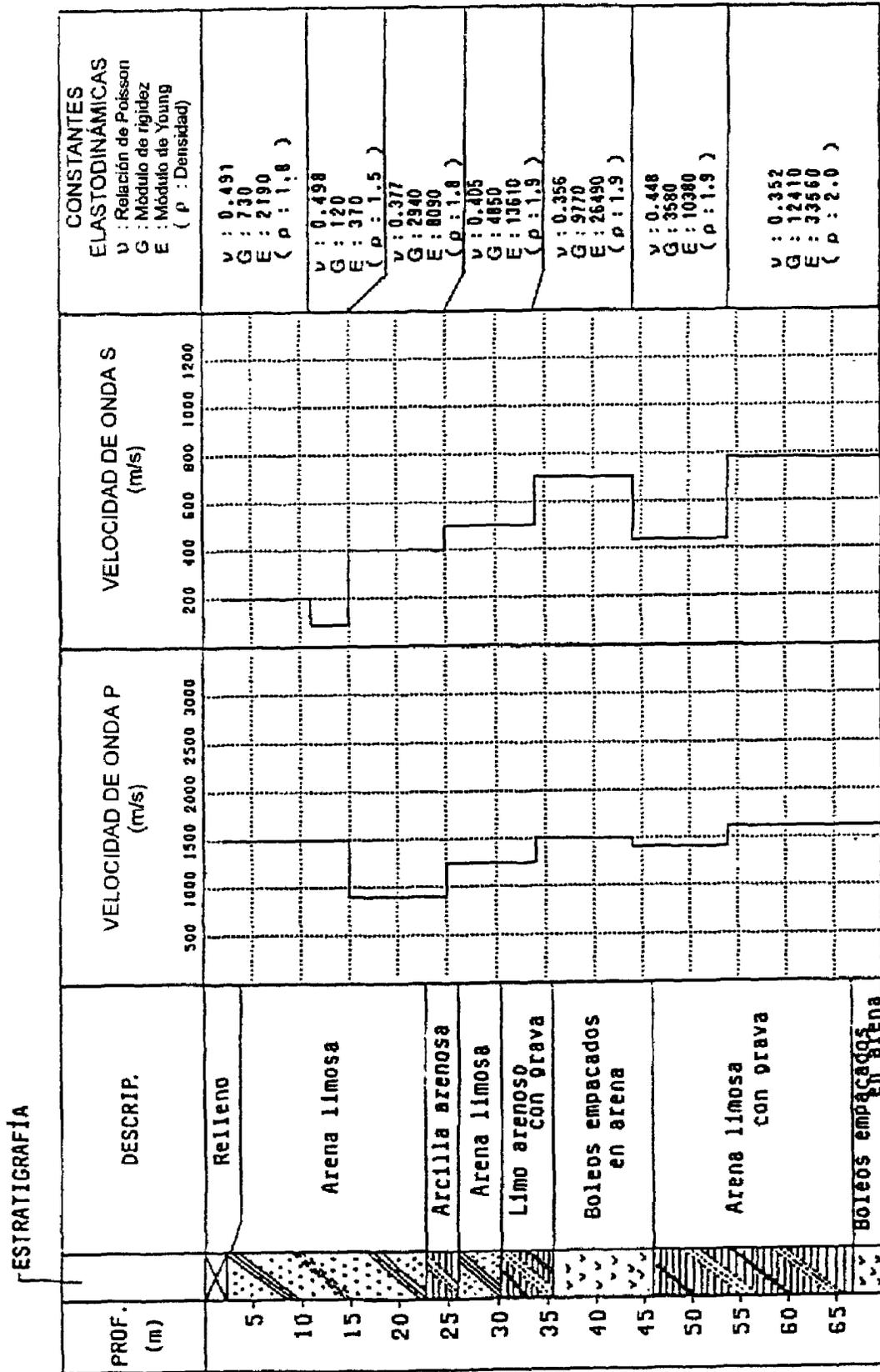


Fig. 3.8 Estratigrafía general y perfiles de velocidades para el pozo no. 6

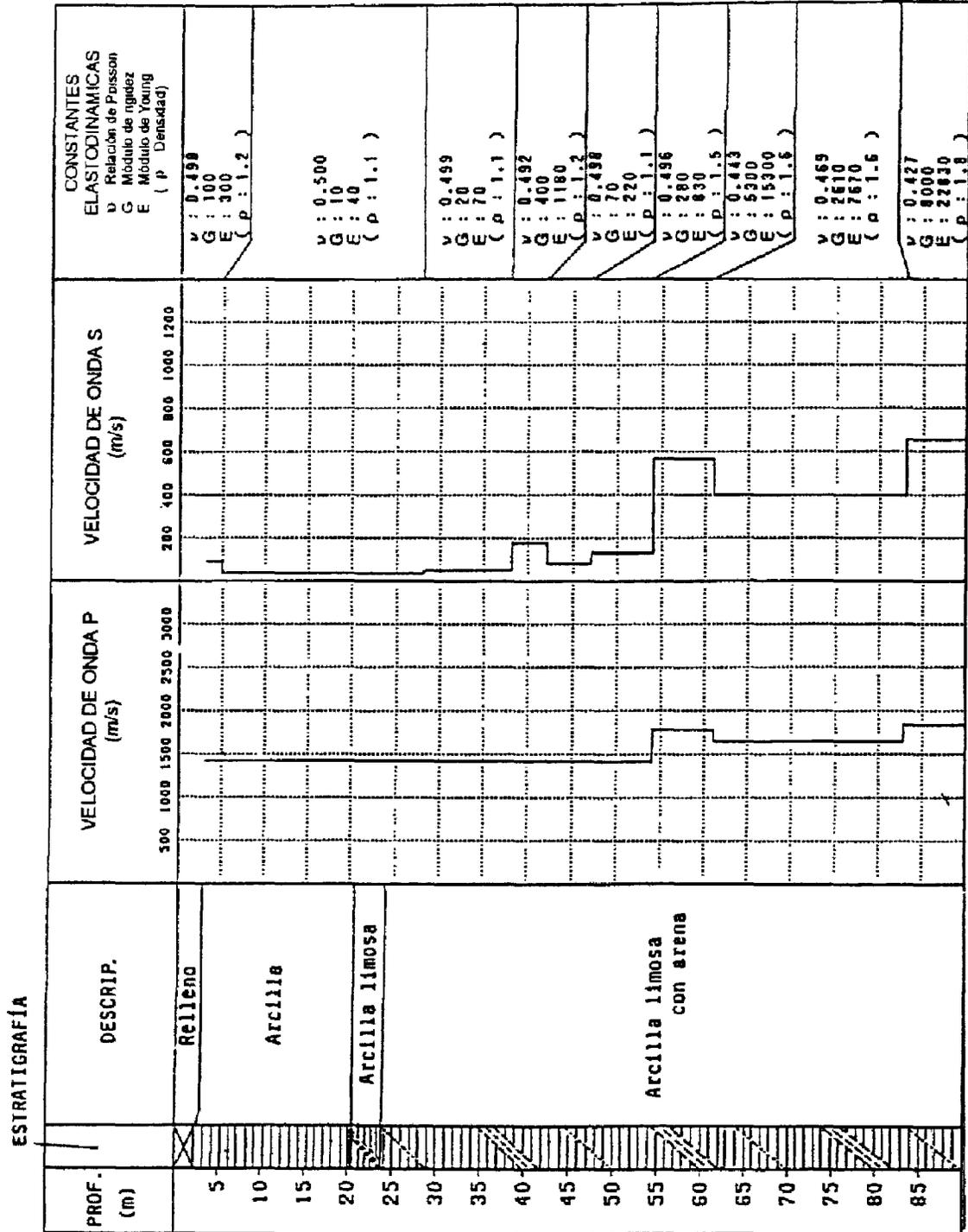


Fig. 3.9 Estratigrafía general y perfiles de velocidades para el pozo no. 9

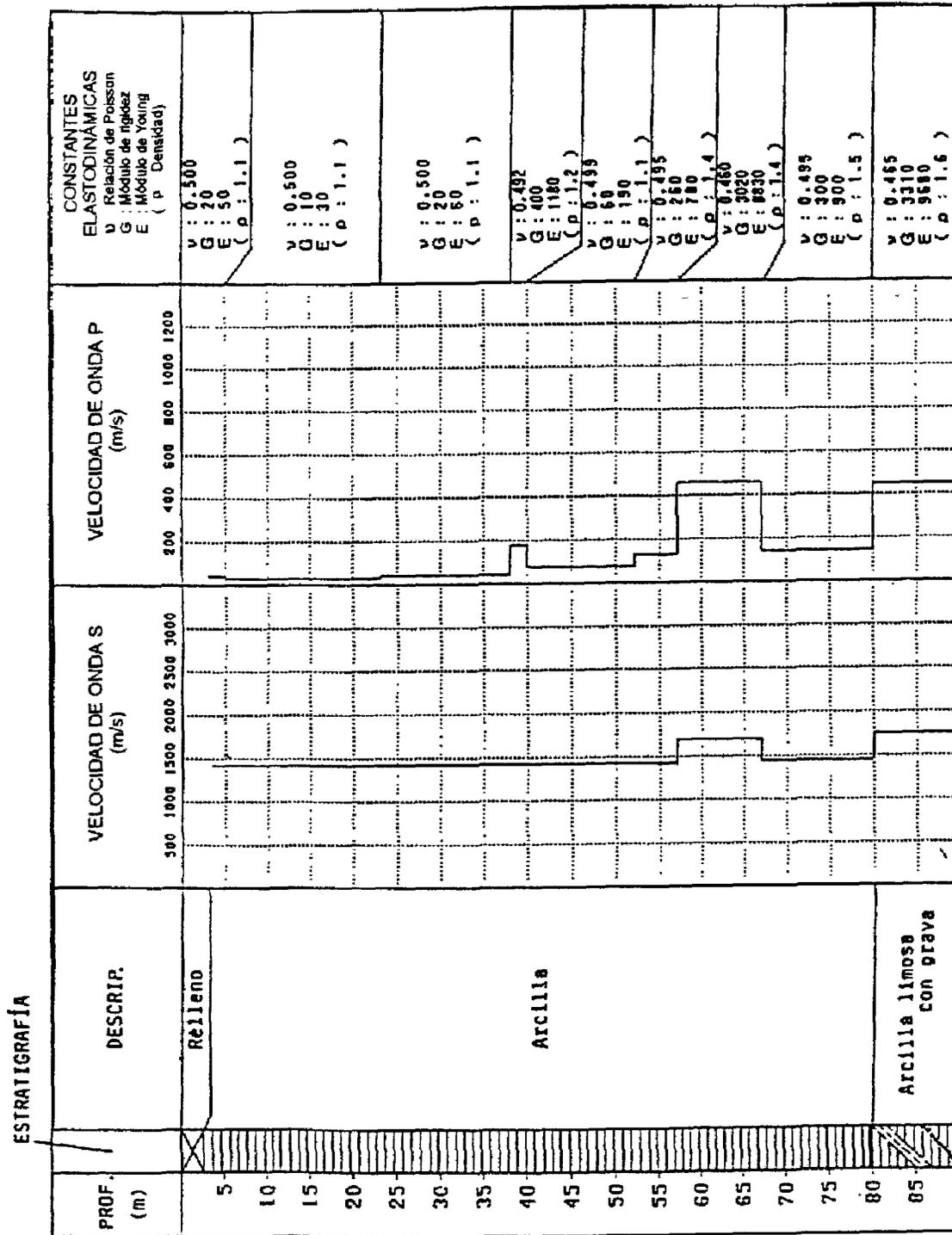


Fig. 3.10 Estratigrafía general y perfiles de velocidades para el pozo no. 10

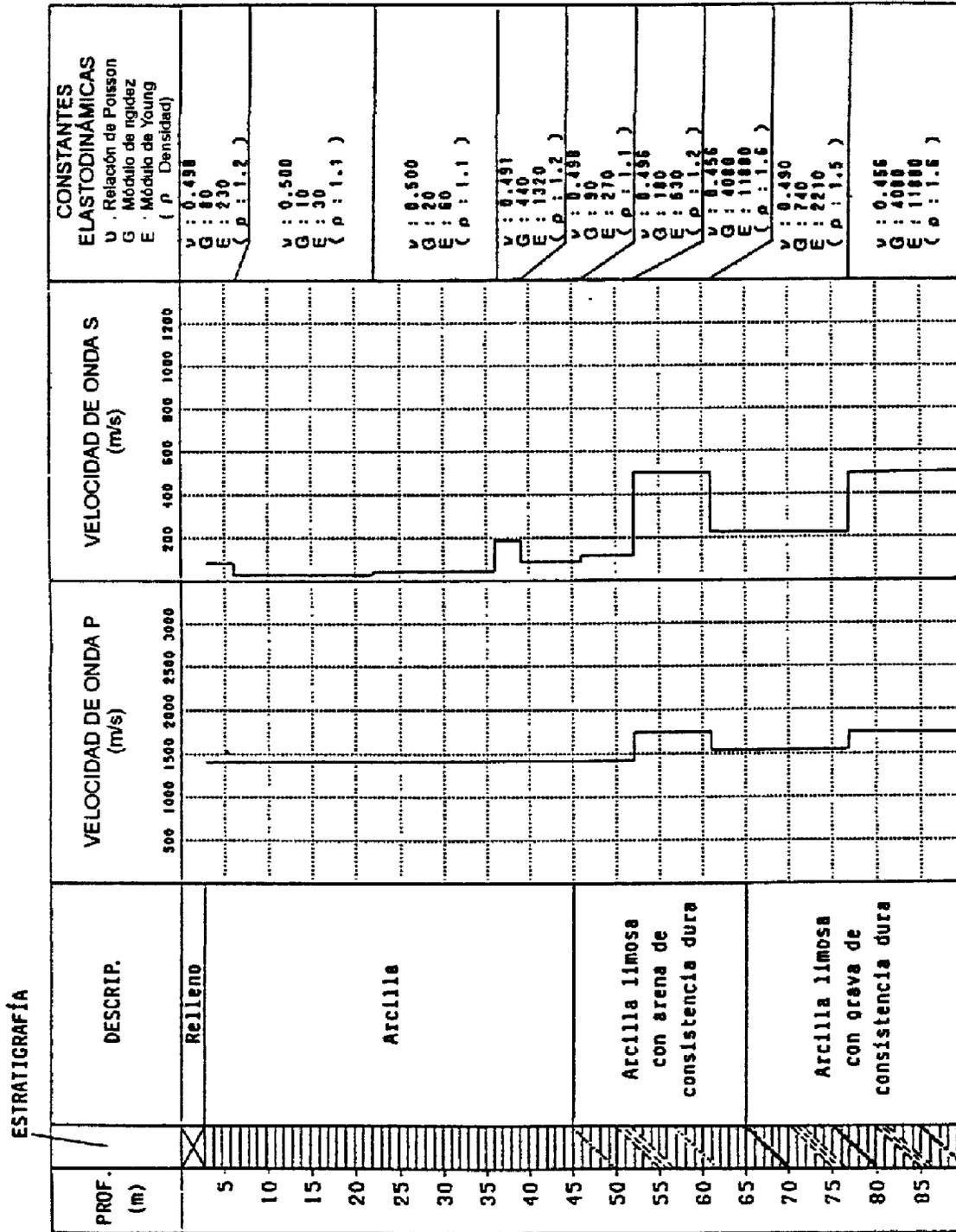


Fig. 3.11 Estratigrafía general y perfiles de velocidades para el pozo no. 11

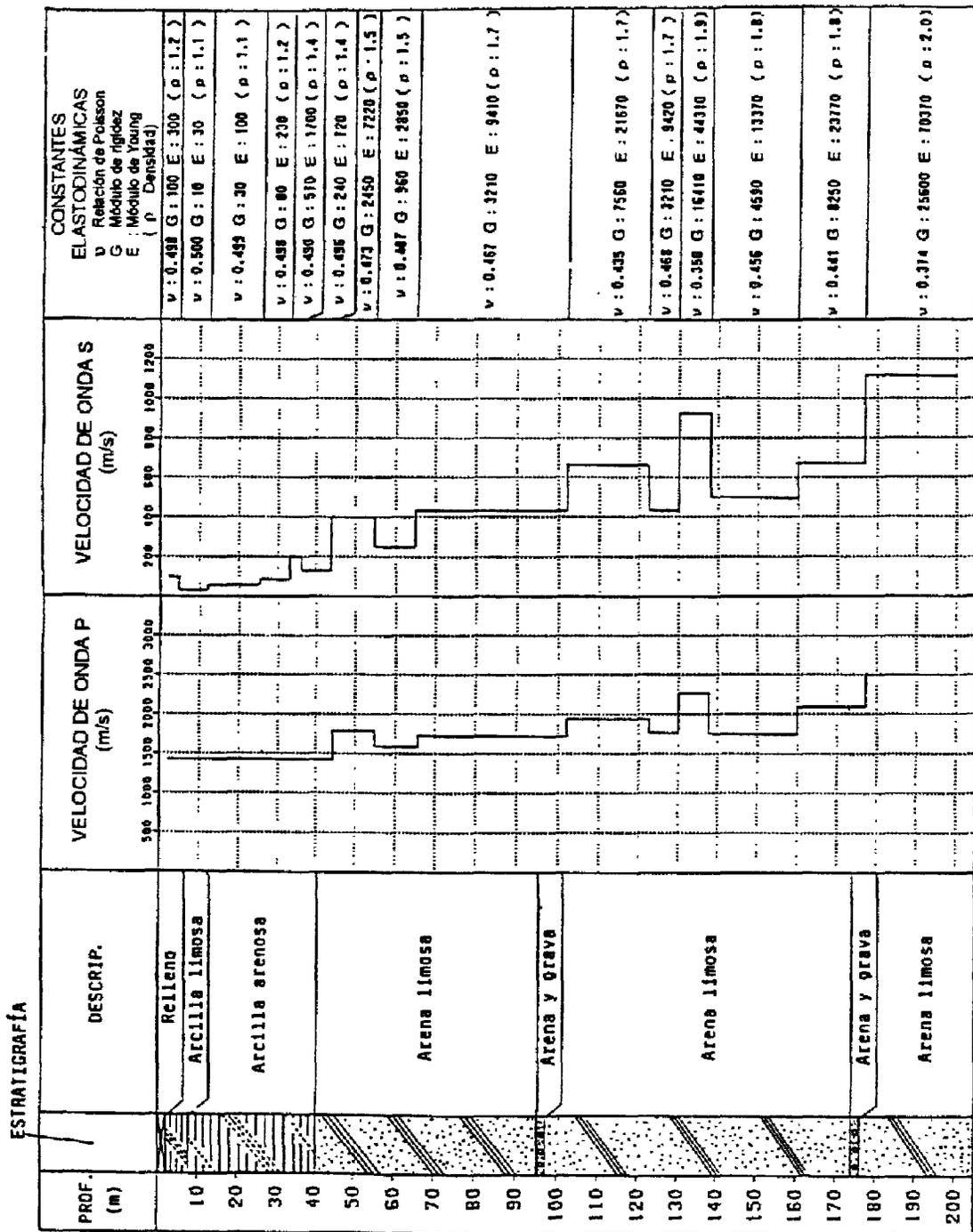


Fig. 3.12 Estratigrafía general y perfiles de velocidades para el pozo no. 12

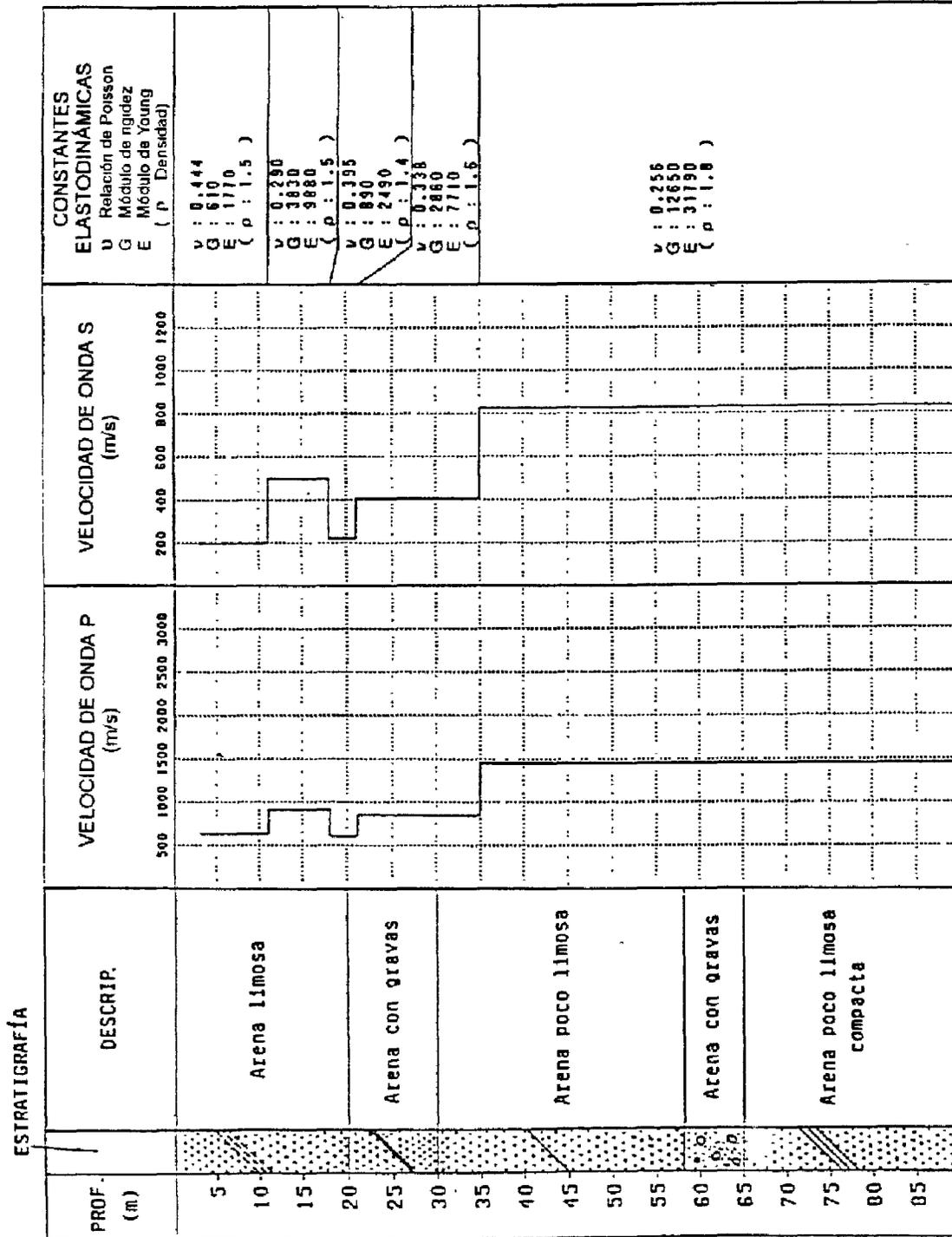


Fig. 3.13 Estratigrafía general y perfiles de velocidades para el pozo no. 14

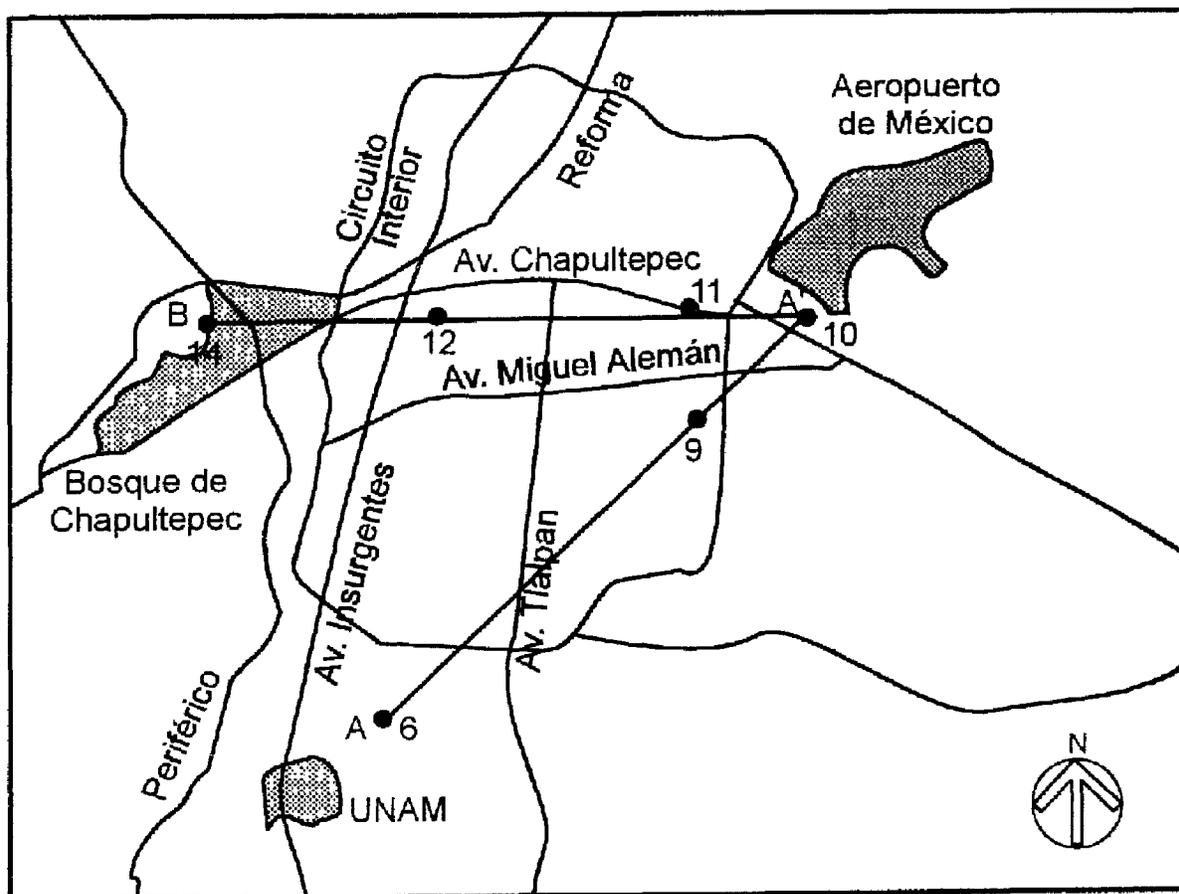


Fig. 3.14 Secciones A-A' y B-A'

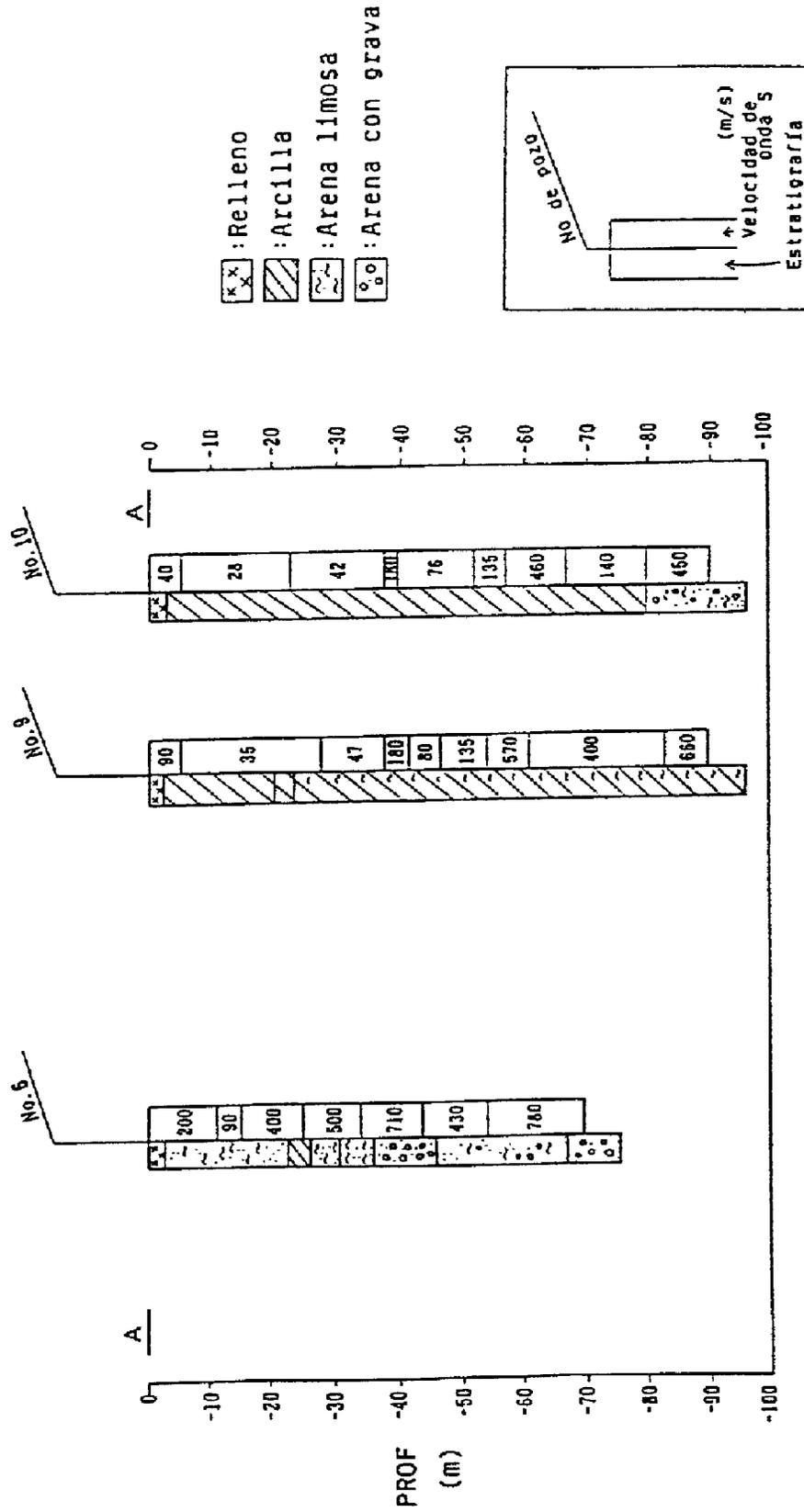


Fig. 3.15 Sección A-A. Se muestran las velocidades medidas con sonda suspendida junto con la estratigrafía

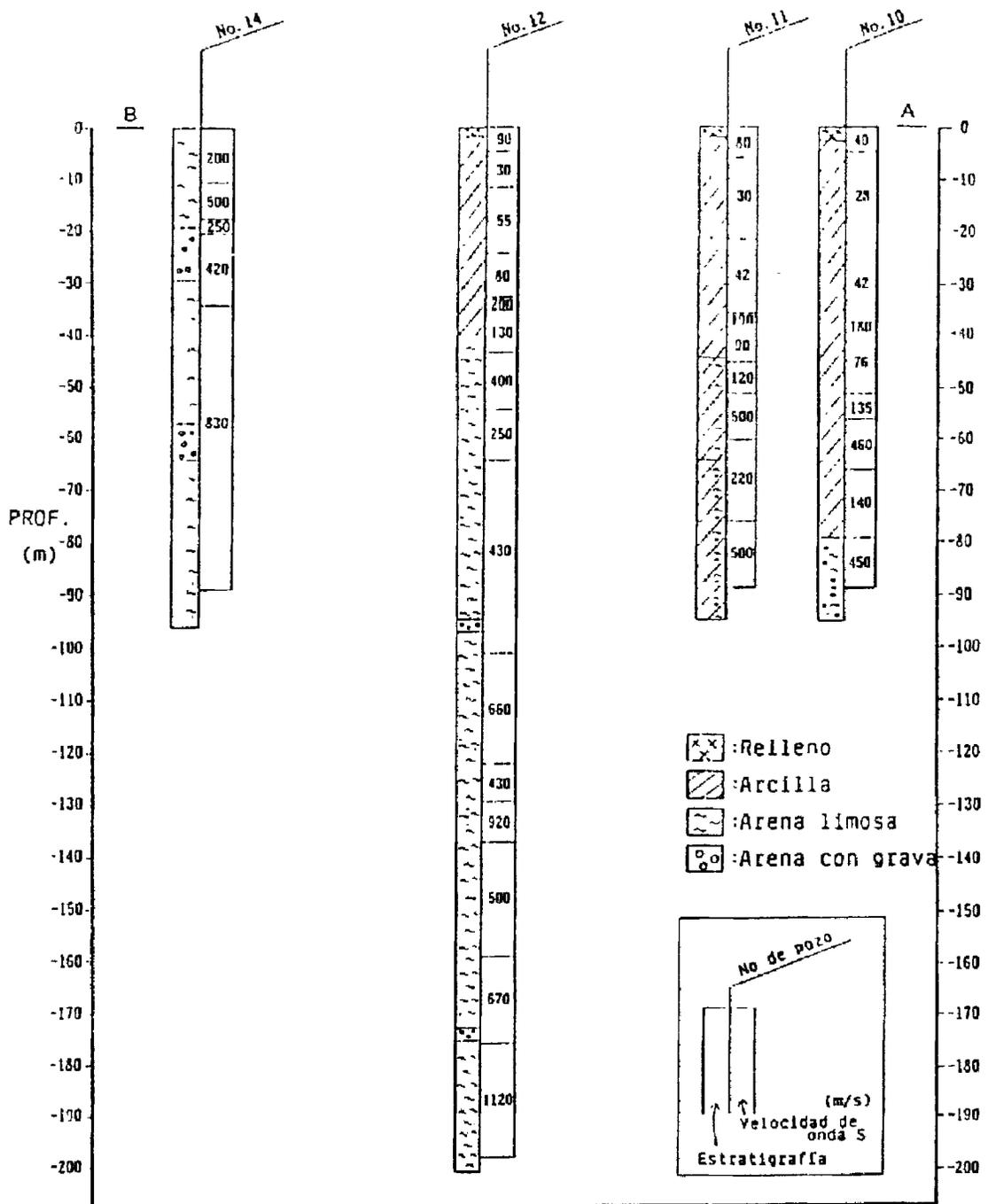


Fig. 3.16 Sección B-A. Se muestran las velocidades medidas con sonda suspendida junto con la estratigrafía