

## REFRACCION SISMICA PARA GRANDES EDIFICACIONES

Por: JOSE E. ARCE HELBERG \*  
GEOFISICO DE EXPLORACIONES

### R E S U M E N

En años recientes el autor ha realizado una serie de estudios del subsuelo somero con objetivos geotécnicos. Aunque en todos los casos se investigaron terrenos donde se proyectaban construcciones de gran magnitud, los objetivos fueron, por lo general, diferentes en uno y otro. Empleando el método de Refracción Sísmica con equipo portátil de canales múltiples se consiguen los datos fundamentales de velocidades y espesores. Según como se procesen éstos, se obtiene planos y secciones con interpretaciones adecuadas a los objetivos perseguidos.

Los resultados sísmicos son proporcionados como correlaciones de horizontes según compacidad, resistencia al arranque mecánico (rippability), profundidad a la roca firme o a otros medios elásticos críticos. La geometría del subsuelo se representa en planos de curvas isóbatas y/o isópacas con los que se obtiene un adecuado conocimiento de la morfología del basamento. Las distribuciones laterales de horizontes son mejor expuestas en secciones verticales, aunque en ciertos casos se puede preparar planos de velocidades.

Debido a la gran cantidad de información indirecta que se obtiene de estudios de este tipo, su utilidad es alta, en especial durante las primeras fases de un trabajo geotécnico. Cuando el método de Refracción Sísmica se realiza como primera evaluación del subsuelo, permite programar adecuadamente una serie de investigaciones integrales que de otro modo tendrían que modificarse continuamente.

(\*) Consultor independiente.

## 1.— INTRODUCCION

En años recientes hemos empleado el método geofísico sísmico para el estudio del subsuelo en áreas donde se proyectaban construcciones de grandes plantas industriales. Como veremos a continuación, la información geofísica fue siempre de utilidad como conocimiento de base para investigaciones posteriores y para obtener los cuadros geológicos integrales en las áreas críticas y alrededores.

A partir de 1971 se ha notado un creciente interés en los métodos geofísicos en el campo geotécnico. Aunque antes de ese año, esporádicamente, empleábamos técnicas eléctricas y sísmicas en problemas de ingeniería, se trataba mayormente de aplicaciones clásicas en ejes de presas y determinaciones de profundidad al basamento para cálculos de presupuestos de perforación y movimiento de tierras. La mayor importancia que se les ha dado en años recientes, ha permitido también programar levantamientos de campo con gran cantidad de estaciones observadas, lo cual ha llevado a interpretaciones de diversos aspectos de las condiciones elásticas del subsuelo, analizados en función de los objetivos y problemas de cada zona y proyecto. Así, mientras en algunos casos el interés se centraba en la morfología del basamento, en otros recaía en el grado de compactación de las sobrecargas y en otros aún, en la clasificación de los materiales de acuerdo a su resistencia al arranque mecánico.

Aunque en aplicaciones de ingeniería se utiliza también el método de Resistividad Eléctrica, el presente trabajo se ha preparado sólo en base al de Refracción Sísmica, ya que su empleo es más variado y, en general, proporciona más información. En algunos casos se puede, incluso, aproximar valores de constantes elásticas determinadas en condiciones dinámicas y que son, por lo tanto, de validez mayor que las determinaciones estáticas. En toda situación, sin embargo, se requiere un adecuado conocimiento de la litología local y experiencia en la correlación de datos sísmicos interpretados en términos geológicos.

## 2.— INSTRUMENTOS Y EQUIPO

Existe en el mercado mundial varios tipos de aparatos sísmicos que pueden ser utilizados para los estudios de áreas de grandes edificaciones. Sin embargo, para obtener información con suficiente exactitud y alcance en profundidad es necesario contar con equipo de las siguientes características:

- Operatividad con explosivos
- Sistema de registro múltiple simultáneo
- Control de amplificación individual

En todos los estudios cuyos ejemplos se indicarán luego, se utilizó un sismógrafo portátil de refracción de doce canales de registro más traza de disparo. Los sismogramas aparecen en positivos fotográficos de revelado rápido (Polaroid). Los geófonos son verticales, electromagnéticos, de 14 Hz de frecuencia natural, colocados en el terreno a doce intervalos regulares a partir del punto de explosión. Tales intervalos pueden ser de cinco o más metros aunque en nuestro caso se utilizaron, típicamente, 10 ó 20 metros.

Los sismógrafos modernos tienen un circuito de disparo incorporado, eliminando así el problema de falta de coordinación entre el momento de tiro y el período de registro; éste puede ser, a su vez, graduado para permitir análisis de eventos posteriores a las primeras llegadas. Como para las determinaciones de espesores se requiere solamente de los incrementos de tiempo en las primeras llegadas y los intervalos entre geófonos, no es indispensable el uso de fulminantes sísmicos sino sólo los eléctricos de uso regular en minas y canteras. A propósito, luego de probar y usar masivamente varios tipos de fulminantes, podemos indicar que los retardos de los que se venden localmente como instantáneos (retardo 0), son usualmente de 2 á 7 milisegundos; esta diferencia no complica el cálculo del sismograma de refracción.

### 3.- TECNICA DE OPERACION

Para obtener sismogramas de refracción en estudios de ingeniería con los equipos portátiles que existen con este objeto, se utiliza tendidos rectos unilaterales con espaciamientos iguales entre geófonos. En el punto de disparo, escogido cerca de la estación, se abre un hueco en el suelo hasta 30–50 cm. y se entierra en el fondo un pedazo de cartucho de dinamita regular (45% ó 65%) con su fulminante eléctrico de retardo 0. En algunos casos puede requerirse hasta un cartucho completo, dependiendo de la intensidad de la señal sísmica y del nivel de “ruido” local.

A partir del punto de tiro y en línea recta, se dispone los geófonos a distancias tales como para alcanzar, entre el PT y el último detector, una distancia de 4 á 6 veces la profundidad máxima efectiva que se desea determinar. La orientación del tendido debe ser siempre lo más paralela posible a la morfología

superficial y subterránea; como esta es usualmente desconocida, es necesaria una interpretación geomorfológica previa y/o tendidos sísmicos con orientación diversa y un solo punto de tiro.

Como las plantas industriales, a diferencia de los ejes de presa, se construyen en áreas con dimensiones horizontales similares, es adecuado programar un estudio sísmico en redes de puntos que pueden ser establecidas como regulares en principio, aunque algunas variaciones a veces se introduce en un programa a medida que progresa el trabajo de campo. Las dimensiones de una red de estaciones sísmicas deben ser escogidas de acuerdo a la irregularidad morfológica que se espera encontrar en el subsuelo; como ello no es a veces posible, es conveniente iniciar un programa con una red de 100 x 100 metros y aumentar la densidad de estaciones en áreas críticas.

#### 4.- RESULTADOS E INTERPRETACIONES

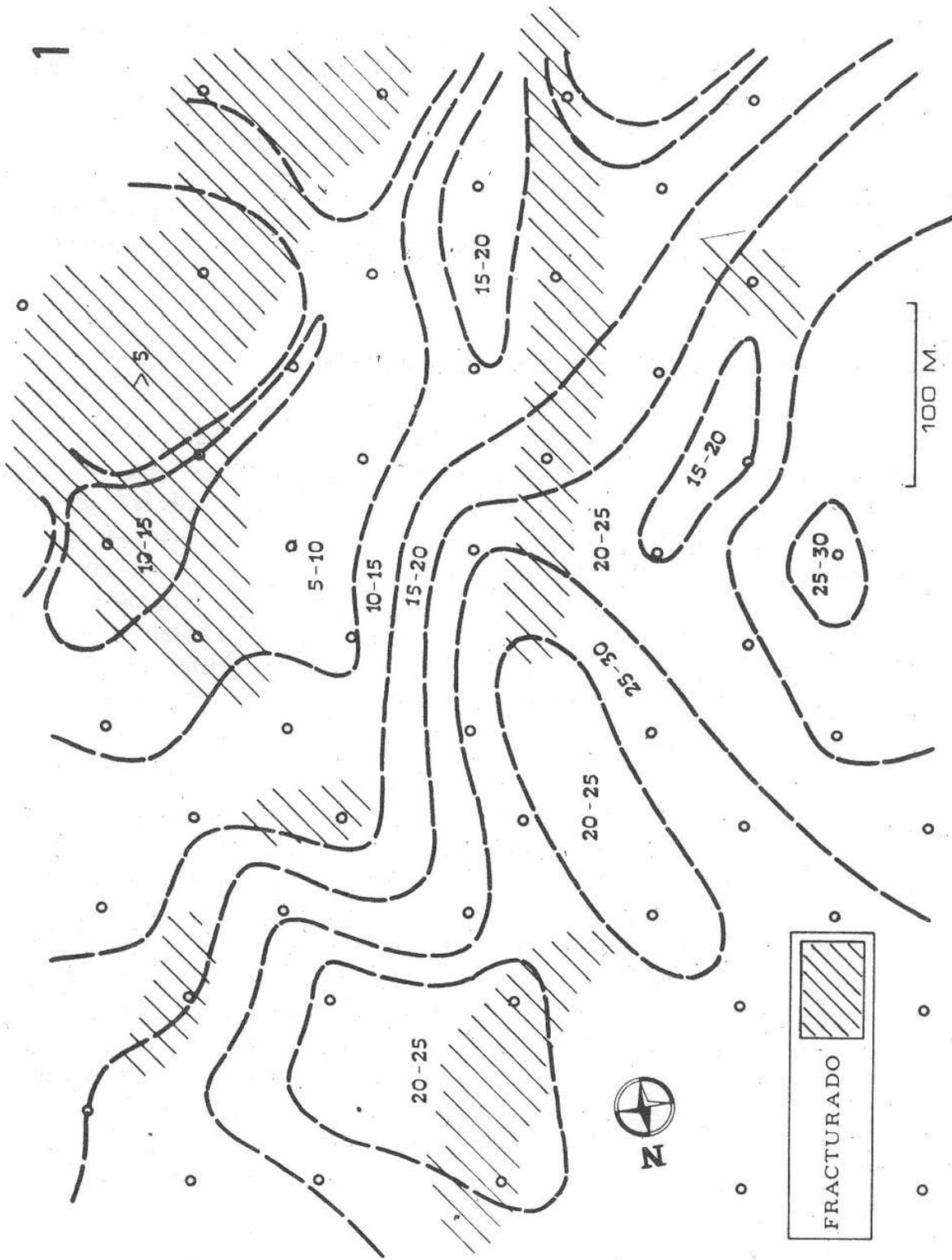
El análisis de los sismogramas de refracción permite calcular velocidades sísmicas y espesores de los diversos medios elásticos atravesados. La precisión de los cálculos depende, aparte de la calidad de las trazas en el sismograma, de los siguientes factores:

- a) Paralelismo entre la superficie de trabajo y las de contacto en el subsuelo.
- b) Homogeneidad elástica de cada medio determinado.
- c) Aumento progresivo de las velocidades en profundidad.

Desviaciones de a) y b) provocan inexactitudes en los cálculos. La condición c) es ineludible ya que sólo puede haber refracción registrable si las velocidades son mayores abajo que arriba.

Se deduce, pues, que la información de base de un estudio de refracción sísmica es un conjunto de datos que pueden dividirse en geométricos (espesores) y físicos (velocidades). Con los primeros se hace correlaciones para preparar mapas de profundidades, espesores (isópacas) y de curvas de nivel de los planos de contacto en el subsuelo. Con los datos de velocidades se hace interpretaciones y correlaciones para construir mapas representativos de:

- Velocidades de la cobertura reciente.
- Variaciones de compacidad en los horizontes no consolidados y en la roca de fondo.



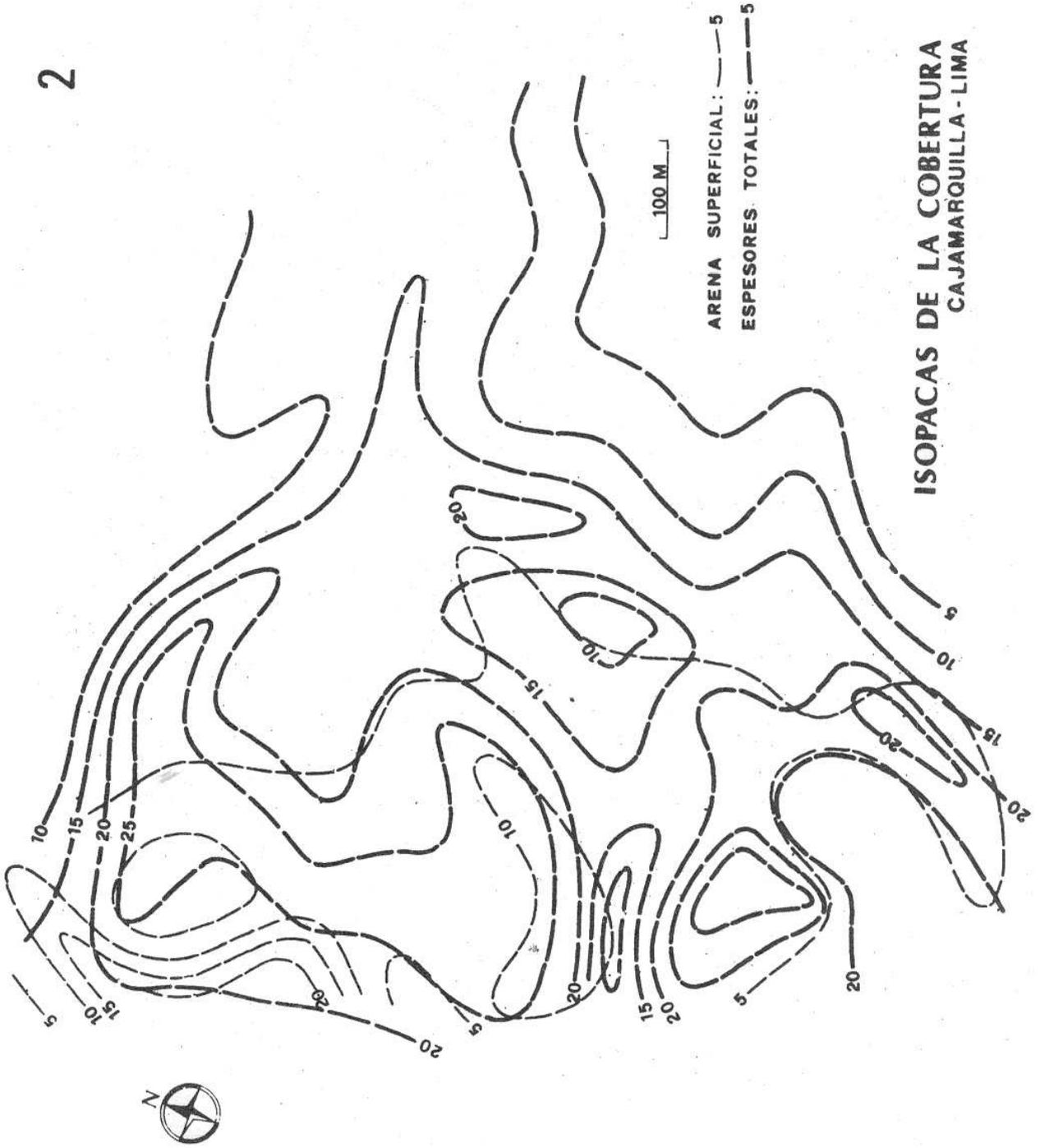
CHUZA - ILO  
 PROFUNDIDAD AL BASAMENTO (METROS)

- Estimaciones del grado de fracturación en la parte superior del basamento.
- Clasificación de los medios elásticos según susceptibilidad al arranque mecánico (rippability).
- Estimación de módulos elásticos.

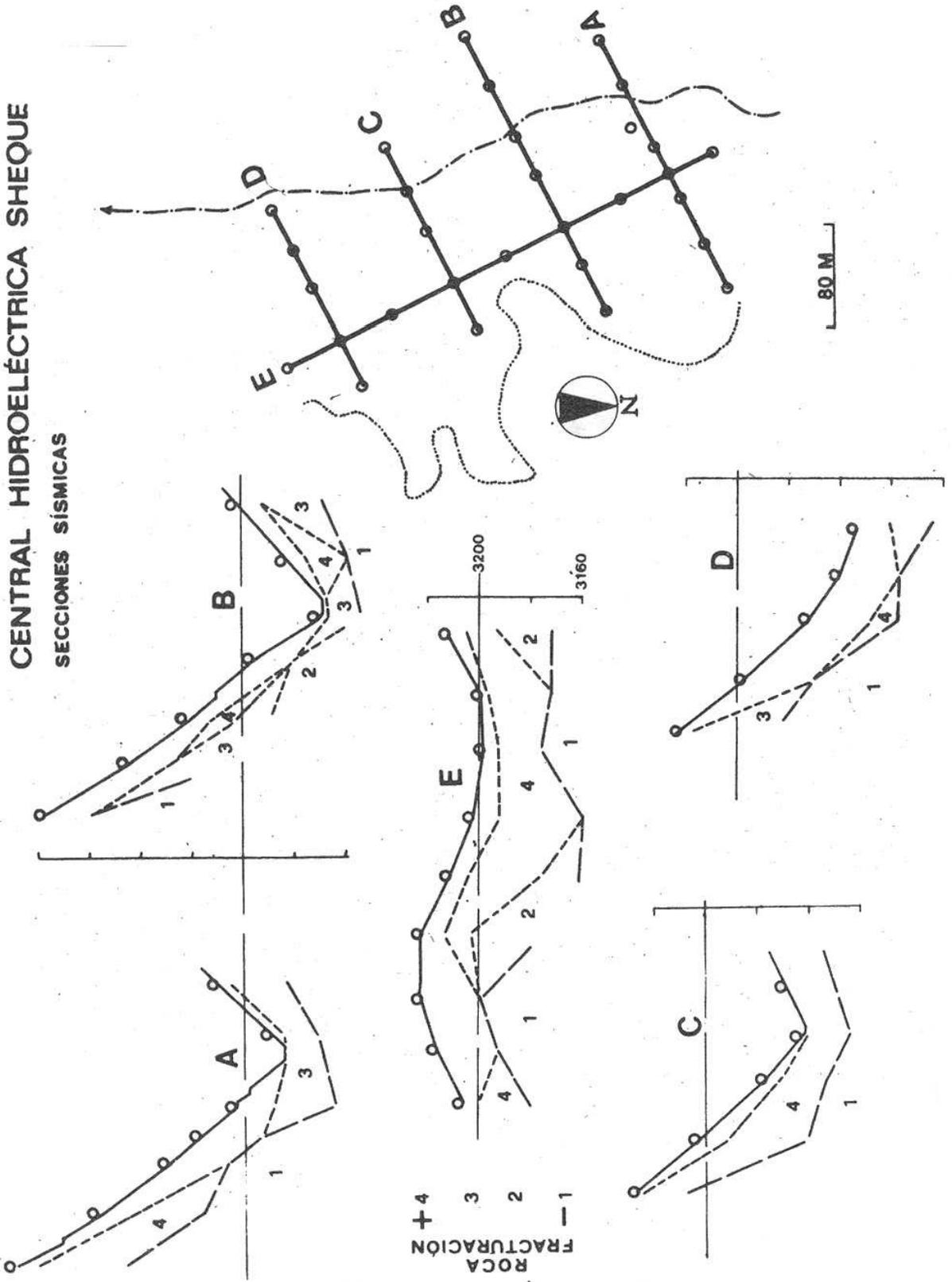
Como se habrá notado, los datos de los sismogramas pueden representarse, correlacionados, en forma de interpretaciones geológicas de diverso tipo, según sea el objetivo buscado.

## 5.— ALGUNOS CASOS TIPICOS ESTUDIADOS EN EL PERU

- 5.1 **Refinería de cobre—Ilo, Moquegua.**— Minero Perú está construyendo una refinería de cobre al norte del puerto de Ilo. Originalmente, el área escogida se encontraba en la Pampa de Chuza, adyacente a la fundición de la Southern Perú Cooper Corporation. El estudio sísmico reveló (figura 1) fuertes irregularidades en el basamento y espesores de cobertura excesivos como para programar cimentación en roca. En el área actual de trabajo, el basamento aflora en muchos lugares y no se ha considerado necesario hacer un estudio sísmico allí. Aparte de la morfología del basamento, existen cambios de velocidades en éste que sugieren la presencia de zonas de fracturación y/o fallamiento.
- 5.2 **Refinería de Zinc—Lima (figura 2).**— Para el diseño de las estructuras grandes, se consideró necesario conocer los espesores de aluvión, en vista de que el área está en una quebrada afluyente de la de Jicamarca, en el sector conocido como Cajamarquilla. El levantamiento sísmico se hizo sobre una red exacta de 100 x 100 metros, habiéndose encontrado dos grandes unidades elásticas no diagenizadas: una superior de velocidad muy baja (menos de 500 metros por segundo) y otra inferior con 800 á 1200 m/s. La más lenta corresponde a una masa de arena suelta depositada en la margen izquierda de la quebrada Jicamarca. Sus características elásticas son desfavorables para construcción, por lo que he trazado una serie de curvas isópacas, comenzando con un espesor de 5 metros, sobre el cual la remoción de esta cubierta significaría alto costo adicional. La mejor zona para construcción está entre las isópacas de 5 m. (arena) y la de 10 m. (aluvión total).
- 5.3 **Central Hidroeléctrica Sheque, Lima.**— Se proyectó construir esta central subterránea, para lo cual interesaba conocer los espesores de material no

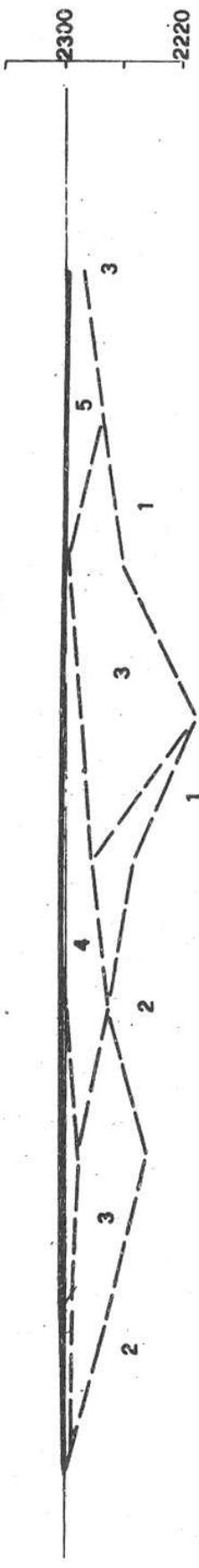


CENTRAL HIDROELÉCTRICA SHEQUE  
SECCIONES SÍSMICAS

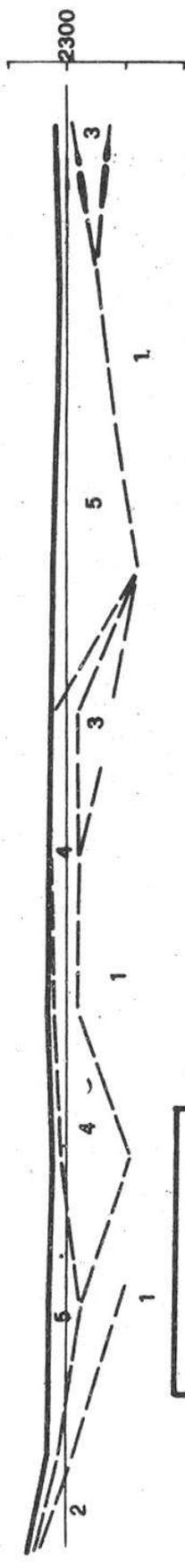


consolidado descansando sobre roca firme. En la figura 3 se muestra algunas estaciones y alineamientos de puntos de disparo sísmico en la margen izquierda de la quebrada. Las pendientes de ladera son fuertes como se nota en los cuatro perfiles transversales (A, B, C y D). La roca está fuertemente alterada, habiéndose podido clasificar tres tipos de ésta (2, 3 y 4) con morfología irregular cubriendo a la roca firme (tipo 1). Sobre todos ellos, existe un aluvión delgado. La zona debe ser propensa a deslizamientos en vista de la poca compacidad de la cobertura.

- 5.4 **San José—Cerro Verde, Arequipa.**— Una de las áreas consideradas para construir la planta de beneficio del yacimiento de Cerro Verde, está localizada en la quebrada San José, al oeste de la mina. La zona es bastante plana, con anchuras promedio de 600 metros, por lo que es difícil estimar la morfología del subsuelo a partir de observación de las márgenes. Para ésta zona se presenta algunas secciones sísmicas típicas (figura 4) con indicación de los tipos de medios elásticos encontrados; se nota las irregularidades del basamento no evidentes en la superficie. En la figura 5, las curvas isópacas del aluvión indican claramente la posición del eje de la quebrada. La figura 6 es una variante de las isópacas ya que se ha dado cotas al fondo del horizonte no consolidado; también es evidente la posición del eje de la quebrada. Las figuras 7 y 8 muestran las distribuciones de velocidades en el aluvión y en la roca. Este tipo de planos se preparan para escoger las áreas con mayor homogeneidad elástica.
- 5.5 **Siderúrgica de Chimbote.**— La ampliación de la planta de laminación requiere, para su diseño, el conocimiento del grado de compacidad del subsuelo, hasta la cota de 10 metros a la que se tendrá que nivelar el terreno con el objeto de construir todas las estructuras a una misma elevación, con referencia a las existentes. La figura 9 muestra tres secciones sísmicas típicas donde aparecen los diferentes medios elásticos encontrados: 1, 2 y 3 son diversos estados de compactación del aluvial, totalmente removible con escarificadores, de acuerdo a su velocidad sísmica menor que 2 Km/seg. El tipo 4 es marginal y se ha perforado taladros para conocer mejor este horizonte, aunque todavía no se ha definido claramente su grado de susceptibilidad al arranque mecánico. Los tipos 5 y 6 son, con seguridad, roca sólo removible con explosivos. Según la información geofísica, queda por resolver la alternativa presentada por la duda del grado de compacidad del medio 4 ya que si este es sólo removible con explosivos, deberá utilizarse la morfología mostrada en la figura 10, mientras que si se le pudiera incluir en el aluvión removible con escarificadores, podrá usarse la morfología de la figura 11.

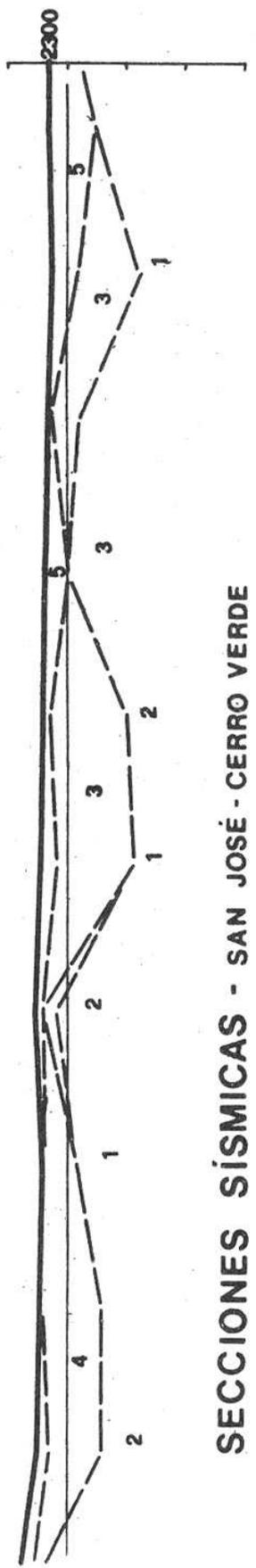


S - N

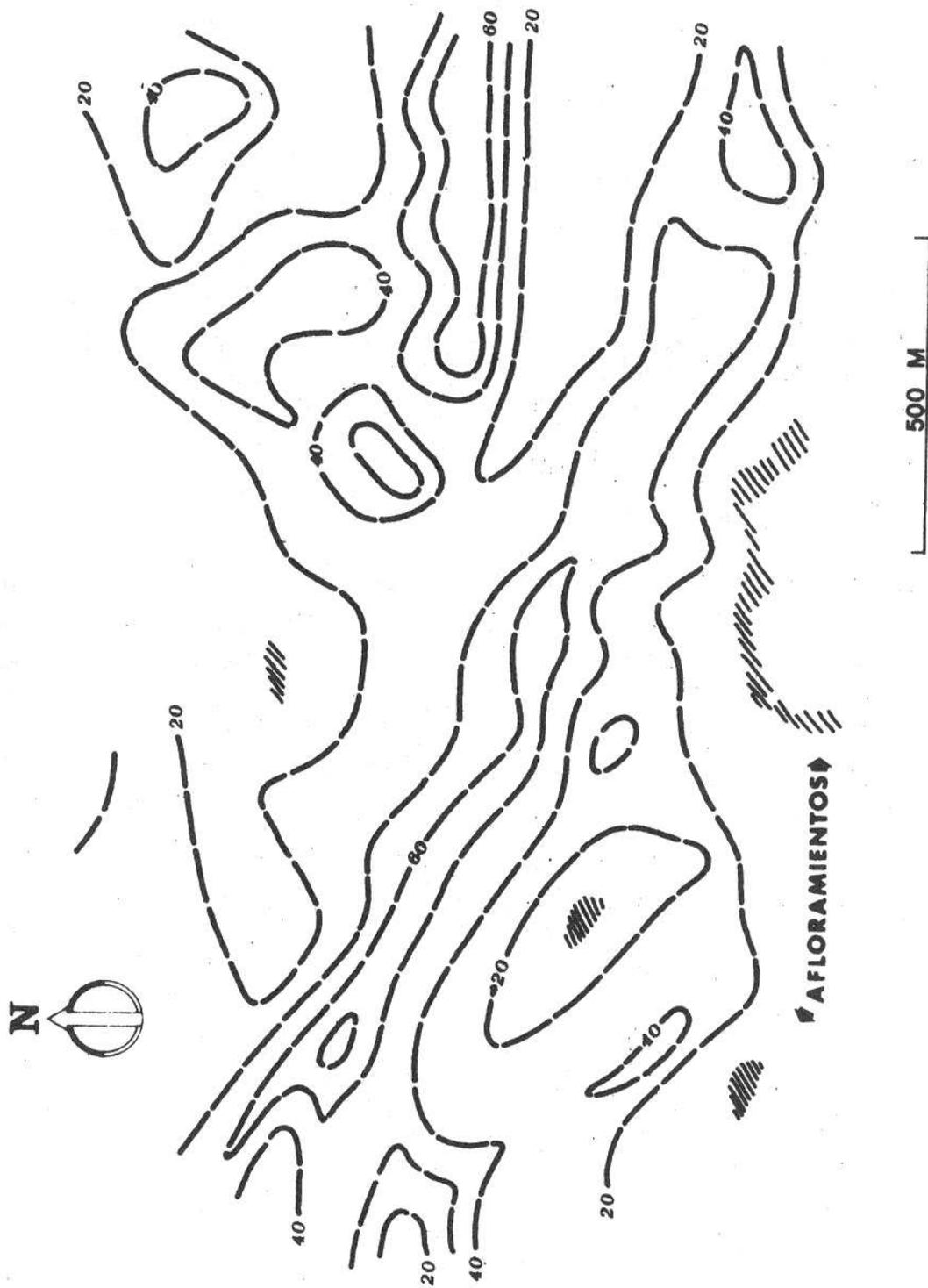


COMPACIDAD  
 + ← —  
 1 2 3 4 5  
 ROCA · ALUV.

100 M

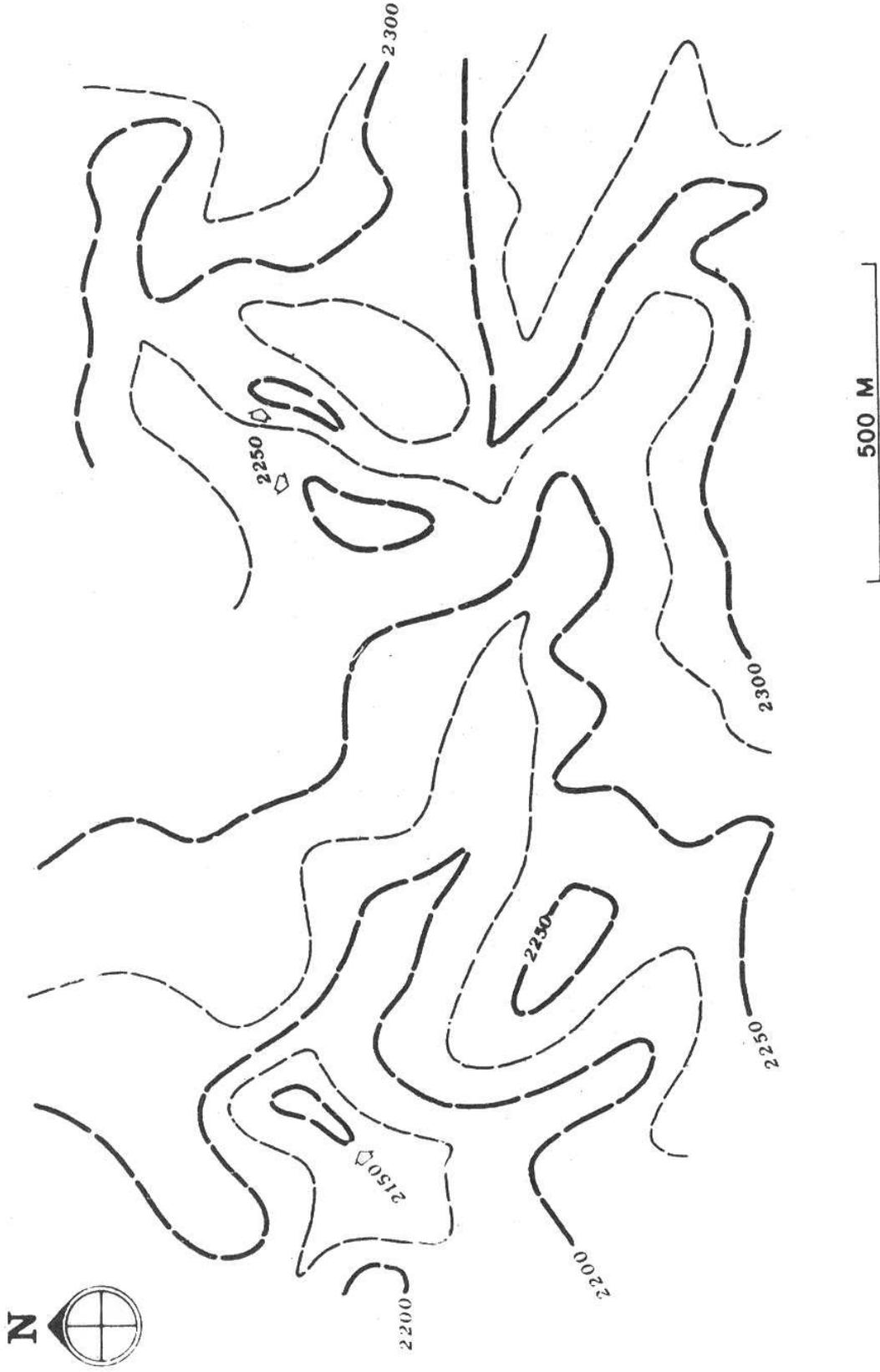


SECCIONES SÍSMICAS - SAN JOSÉ - CERRO VERDE



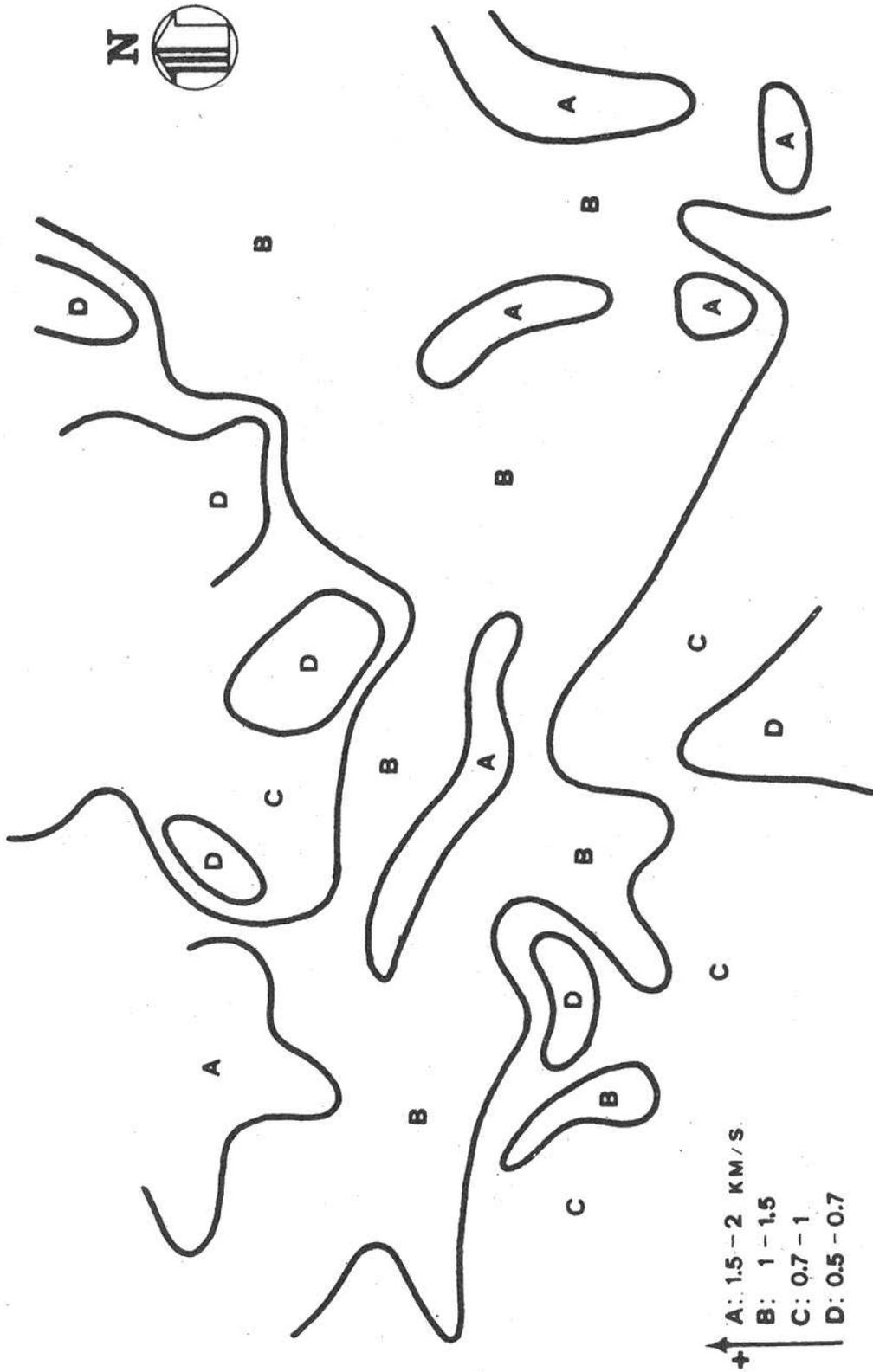
ISÓPACAS DEL ALUVIÓN  
SAN JOSÉ

6

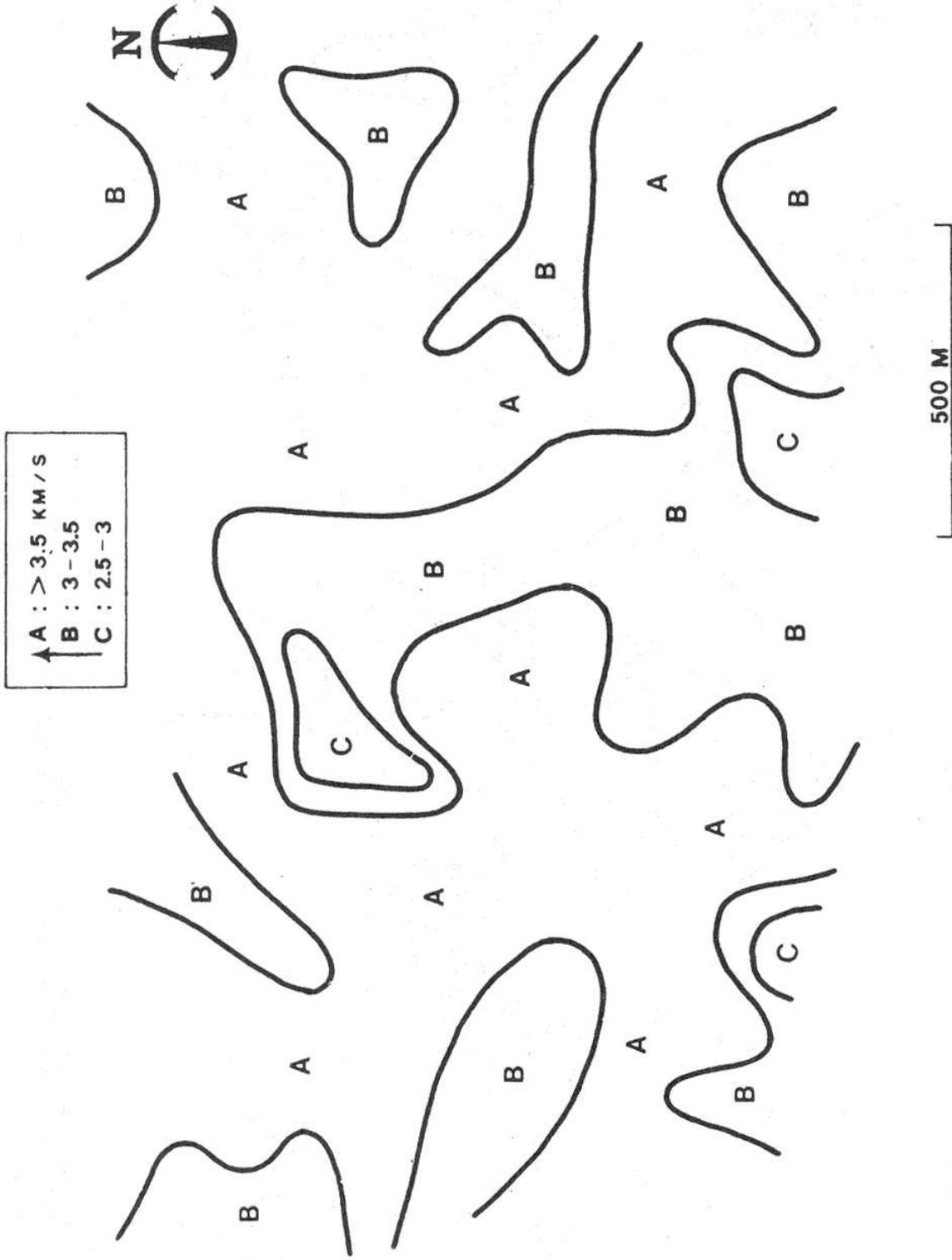


# MORFOLOGÍA DEL BASAMENTO

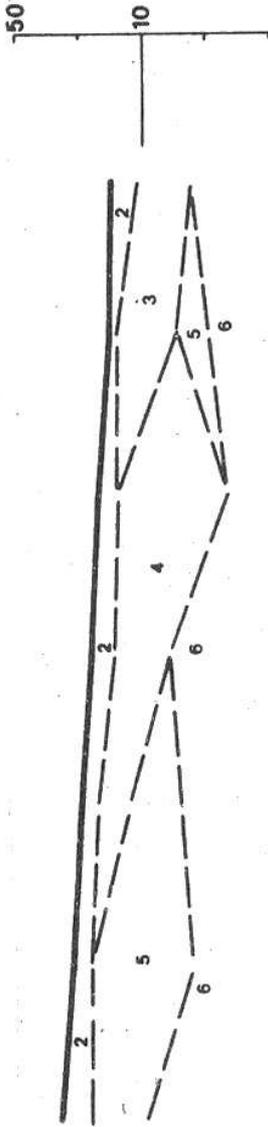
SAN JOSÉ



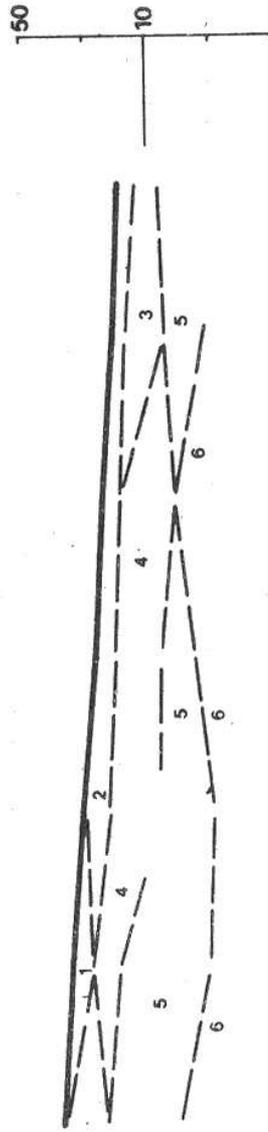
**VELOCIDADES DE ALUVIÓN  
SAN JOSÉ**



VELOCIDADES DE ROCA  
SAN JOSÉ

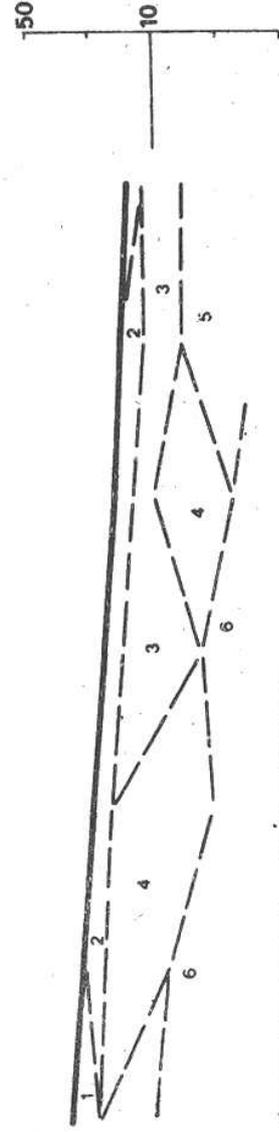


O - E



100 M

C TIPOS	
1 :	ALUV.
2 :	ROCA
3 :	
4 :	ROCA
5 :	
6 :	ROCA



SECCIONES SISMICAS  
CHIMBOTE

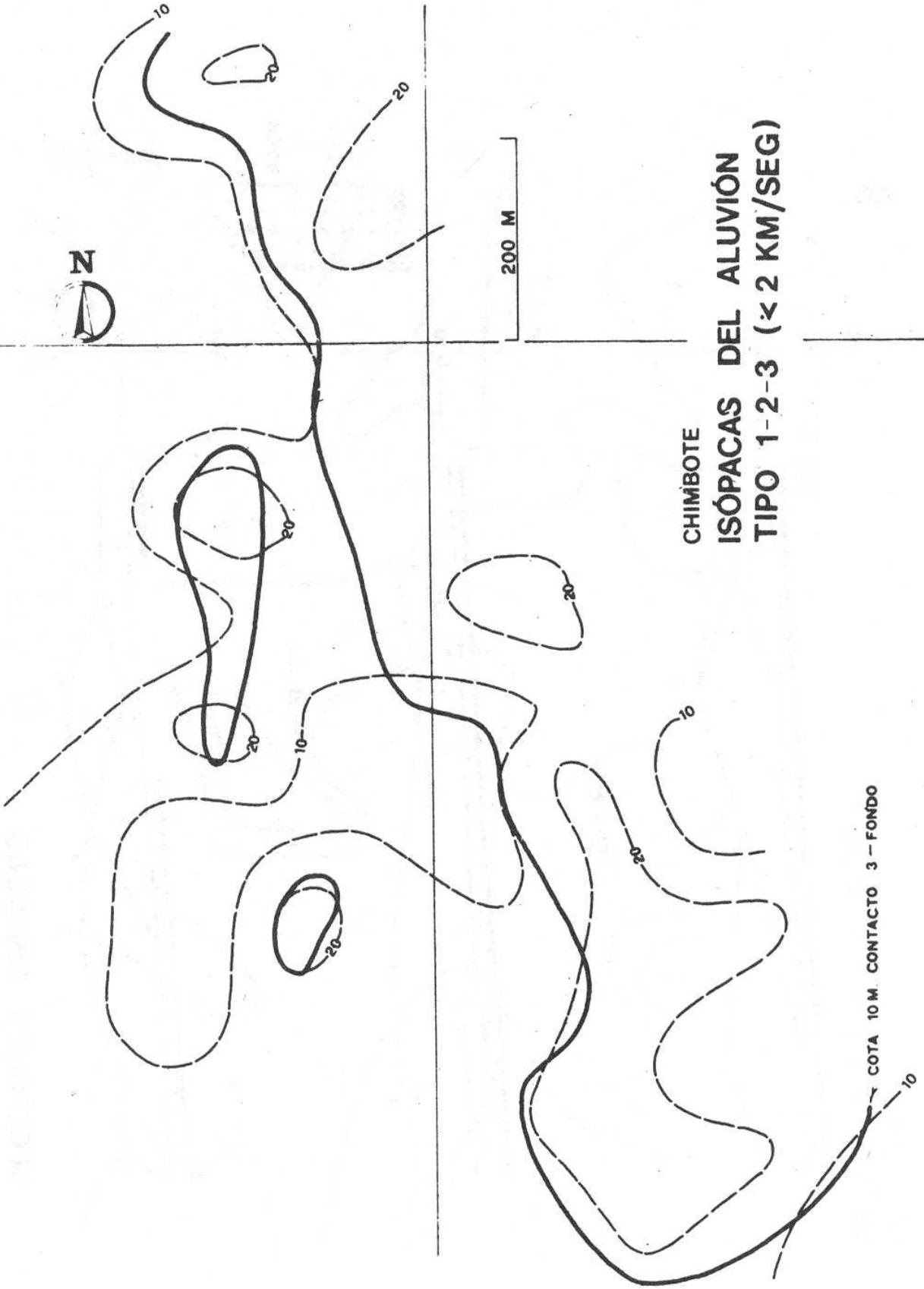
10

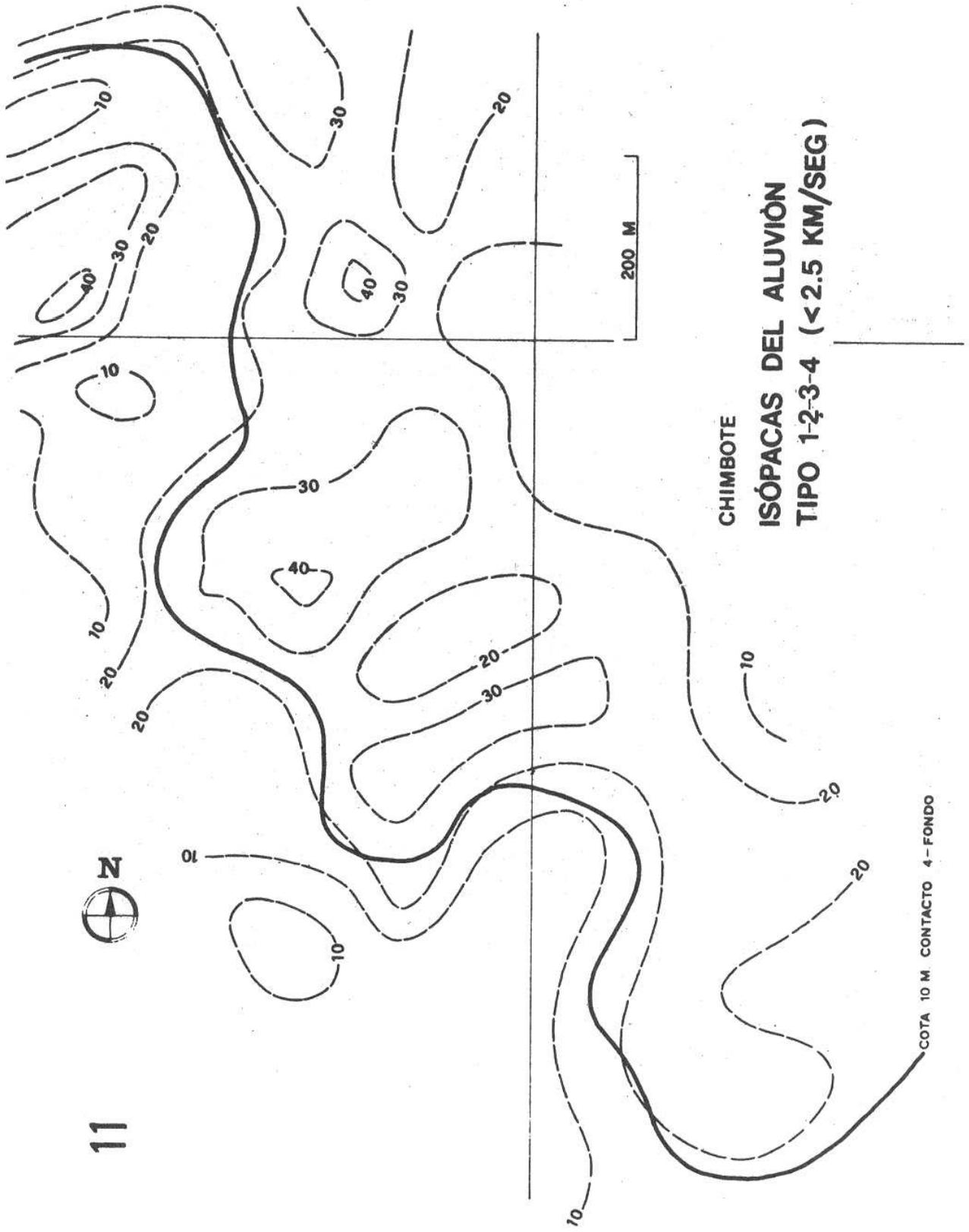


200 M

**CHIMBOTE  
ISÓPACAS DEL ALUVIÓN  
TIPO 1-2-3 (< 2 KM/SEG)**

COTA 10 M. CONTACTO 3 - FONDO





**CHIMBOTE**  
**ISÓPACAS DEL ALUVIÓN**  
**TIPO 1-2-3-4 (<2.5 KM/SEG)**

COTA 10 M CONTACTO 4-FONDO

## 6.— CONCLUSIONES

El empleo de la técnica de Refracción Sísmica en problemas de ingeniería deberá ser cada vez más frecuente, en vista de la gran cantidad de información que se obtiene de los sismogramas. Además, con adecuada densidad de estaciones se consigue configurar cuadros morfológicos del subsuelo con diferentes tipos de elementos y curvas, de acuerdo a los objetivos en cada caso. Un programa de perforaciones preparado en base a la información geofísica debería proporcionar mayor utilidad que en el caso de taladros solos.

## 7.— BIBLIOGRAFIA

- ARCE, J.E.— Estudio Geofísico del Subsuelo—Chuza, Ilo. Minero Perú, 1971 (inédito).  
Estudio Geofísico del Subsuelo—Cajamarquilla, Lima. Minero Perú, 1972 (inédito).  
Estudio Geofísico de Refracción Sísmica, Proyecto Salto Sheque—Lima. Empresas Eléctricas Asociadas, 1972 (inédito).  
Estudio Geofísico de Refracción Sísmica, Planta San José—Cerro Verde, Arequipa. Minero Perú, 1973 (inédito).  
Estudio Geofísico de Refracción Sísmica, Siderúrgica de Chimbote. Siderperú, 1974 (inédito).
- GRIFFITHS, D.H. y King, R.F.— Applied Geophysics for Engineers and Geologists. Pergamon Press, Londres. 1965.
- MATHIES, J.P. y Astier, J.L.— Sault—Brenaz Damsite Refraction Survey. En "Geophysical Surveys", publicado por EAEG, Holanda, 1958.
- VECCHIA, O. Geophysical Surveys for a Dam at the Lake of Molveno (Venetian Alps, Italy). En "Geophysical Surveys", publicado por EAEG, Holanda, 1958.
- WELIN, E. Seismic Refraction Survey for a Hydro—Electric Plant Site in Northern Sweden. En "Geophysical Surveys", publicado por EAEG, Holanda, 1958.