

UNIVERSIDAD NACIONAL DE
INGENIERIA

PROGRAMA ACADEMICO DE INGENIERIA CIVIL

" ESTUDIO DE LA AMPLIFICACION DE LAS
ONDAS SISMICAS EN LOS SUELOS
DE LA CIUDAD DE HUARAZ "

Tesis de Grado para optar el Título de Ingeniero Civil
presentada por :

A L E J A N D R O L A U R A D I A Z

L I M A P E R U

1 9 7 7

A mis padres, Alejandro y Ofelia
quienes con su cariño y esfuerzo
hicieron posible la culminación
exitosa de mis estudios profesionales.

AGRADECIMIENTO

Al Ingeniero Julio Kuroiwa, Asesor de la Tesis, por sus enseñanzas y directivas para la mejor realización del presente estudio.

Al Instituto Geofísico del Perú, en la persona del Ingeniero Ernesto Deza, quien gentilmente brindó el acceso a las informaciones bibliográficas y a los registros sísmológicos de la ciudad de Huaráz, así como también por sus consejos en cuanto a amplificación de suelos se refiere.

R E S U M E N

Estando el Perú ubicado en una de las zonas sísmicas más activas del planeta, como lo es, el llamado Cinturón Circumpacífico resulta obvio que las edificaciones que se construyan en su territorio sean racionalmente reforzadas con la finalidad de que puedan resistir satisfactoriamente los esfuerzos generados por los movimientos sísmicos.

A lo largo de su existencia, la ciudad de Huaráz, Capital del Departamento de Ancash, ha sido afectada por una serie de fenómenos telúricos, los cuales han dejado diverso grado de daños materiales y de pérdidas de vidas humanas habiéndolo sido el sismo del 31 de Mayo de 1970, el que con mayor severidad la ha afectado, es por ello que después de la ocurrencia de dicho sismo se realizaron diversos estudios tendientes a lograr la Microzonificación Sísmica de la ciudad.

El presente trabajo está encuadrado dentro de los estudios que se realizaron en dicha oportunidad, siendo su objetivo la determinación del Coeficiente Sísmico por medio del estudio de la Amplificación de las ondas sísmicas en su paso a través de los suelos de la ciudad.

Para llegar a conocer el Coeficiente Sísmico se ha empleado las

fórmulas desarrolladas por el profesor K.Kanai para el espectro de movimientos sísmicos fuertes; en las cuales, para el sismo más probable a ocurrir, de magnitud y de distancia epicentral conocida, la aceleración del suelo está en función del período predominante y de la impedancia sísmica de los estratos del suelo superficial.

La determinación del período predominante del suelo en los diferentes lugares de la ciudad, se realizó por medio del análisis de los registros de Microtrepidaciones tomados en dichos lugares.

La obtención de la impedancia sísmica de cada lugar, se realizó hallando primeramente las Razones de Amplitud de los movimientos sísmicos (réplicas del sismo del 31 de Mayo de 1970) registrados simultáneamente en la roca básica emergente y en la superficie del suelo. Luego mediante el empleo de las fórmulas de K. Kanai para la propagación de las ondas sísmicas a través de un solo estrato superficial, se calcularon los valores de impedancia sísmica y de factor de amortiguamiento que hacen coincidir en su mayoría los valores de las Razones de Amplitud observadas en el campo con las correspondientes calculadas con las fórmulas antes mencionadas.

Los valores de impedancia sísmica así obtenidos corresponden al conjunto de estratos comportándose como uno solo, lo cual es una simplificación de la realidad, ya que los diferentes estratos compo

nentes del suelo superficial de cada lugar tienen valores de impedancia sísmica diferentes entre sí, y su conocimiento implicaría la realización de estudios más detallados que por su elevado costo no se llevaron a cabo en esa oportunidad.

Estos mismos valores de impedancia sísmica son también afectados por el hecho de que las fórmulas de Kanai, para la propagación de ondas, consideran que el comportamiento del suelo es lineal, no ocurriendo así para el caso de sismos fuertes (magnitudes mayores que 6), en los cuales el comportamiento es no lineal.

En el presente estudio, no se han introducido los factores de corrección que hacen intervenir el comportamiento no elástico del suelo debido a que no se contó con la información requerida para hacerlo; es por ello que los valores de los resultados que se obtengan para sismos de magnitud mayor que 6, quizás sean 20 a 25% mayores que los reales.

Como resultado del presente estudio se ha obtenido que el Coeficiente Sísmico para la ciudad viene dado por :

$$C = 0.04 / T$$

donde T es el período de la estructura. Por lo tanto el cálculo de la fuerza sísmica horizontal, actuante sobre la edificación, se hará considerando el coeficiente antes mencionado.

Igualmente se ha determinado que los suelos en su mayoría se encuentran estratificados, notándose hasta tres lechos con propiedades físicas diferentes.

Asimismo, los períodos predominantes varían entre 0.25 seg. a 0.50 seg. correspondiendo los primeros a suelos duros y los segundos a suelos blandos.

En cuanto a la amplificación que los suelos ofrecen al paso de las ondas sísmicas, se aprecia que la amplitud de las vibraciones observadas en la superficie del suelo es 2 a 5 veces más grande que aquella observada en la roca base.

TABLA DE CONTENIDO.

	<u>PAGINA</u>
RESUMEN	5
INTRODUCCION	14
CAPITULO I. ANTECEDENTES	
1.10 Geografía.....	17
1.20 Historia, antecedentes sismológicos	19
CAPITULO II. BASES PARA EL ESTUDIO	
2.10 Sismología.....	26
2.11 Generalidades	
2.12 Clases de sismos	
2.13 Tipos de ondas sísmicas	
2.14 Sismómetros	
2.15 Equipo utilizado y Método de observación	
2.20 Microtrepidaciones	33
2.21 Generalidades	
2.22 Metodología é instrumentación	
2.30 Estudios Complementarios	41
2.31 Geología	
2.32 Mecánica de suelos	
2.33 Gravimetría	

CAPITULO	III.	ESTUDIO DE LA AMPLIFICACION DE LOS SUELOS	
	3.10	Generalidades	62
	3.11	Método de las Microtrepidaciones	
	3.12	Método Soviético	
	3.13	Método de la Amplificación de las ondas sísmicas	
	3.20	Selección del Método	73
	3.21	Generalidades	
	3.22	Ajuste de las curvas observadas y calculadas	
	3.30	Período predominante de los suelos.....	77
	3.40	Relación amplitud-período de sismos	90
	3.41	Generalidades	
	3.42	Corrección por Instrumentación	
	3.50	Razón de Amplitud observada,...	93
	3.60	Constantes características del suelo	96
	3.70	Fórmula semi-empírica para el espectro de movimientos fuertes,...	110
	3.71	Relación entre amplitud, período magnitud y distancia epicentral	
	3.72	Características vibratorias del suelo	

3.73 Fórmulas de Kanai para la respues
ta espectral

CAPITULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES....	122
BIBLIOGRAFIA	127
APENDICE	133
A - Programa I.B.M. : Interpretación de Espectros Sísmicos de las curvas Razón de Amplitud vs. Períodos me- diante el Ajuste por Mínimos cuadra dos	134
B - Programa I.B.M. "Determinación de la Respuesta Espectral según la Fórmula Semi-empírica de Kanai para la ciudad de Huaráz	146
C - Diagramas de Flujos para los dos Programas I.B.M. anteriormente men cionados	147

I N T R O D U C C I O N

De acuerdo a datos simotectónicos, cualquier zona del Círculo Circum-Pacífico, está expuesta a la acción de los fenómenos sísmicos; al respecto en el Perú, la Historia ha dejado una serie de terribles experiencias que hacen ver la vital importancia de poder construir edificaciones racionalmente reforzadas, que en caso de sismos no fallen causando daños personales y pérdidas materiales.

Es en ese sentido, hacia el cual se dirige el objetivo de la presente Tesis, ya que es bien conocida la influencia que tiene el suelo de cimentación en el comportamiento sísmico de las estructuras.

Con la finalidad de dar una idea general de la zona en estudio, en el desarrollo del presente trabajo, se ha considerado conveniente dar en el Capítulo I una breve reseña geográfica, así como también los antecedentes sismológicos correspondientes.

El Capítulo II ha sido dividido en tres partes, en las dos primeras se trata lo concerniente a la Sismología y a las Microtrepidaciones, dándose algunas definiciones básicas así como también sus modos de aplicación al presente estudio. En la tercera parte se trata lo concerniente a los aportes que de una manera menos directa han sido

hechos por los estudios realizados en los campos de: la Geología, la Mecánica de suelos y la Gravimetría.

En el Capítulo III primeramente se encuadra el estudio de la Amplificación de los Suelos como uno de los métodos con que cuenta la Ingeniería Antisísmica para realizar la Microzonificación de una ciudad. Luego se dan detalles del procedimiento seguido en el caso en estudio.

A continuación se trata acerca del Período predominante de los suelos, dándose los resultados de los análisis realizados a los registros de Microtrepidaciones.

La relación Amplitud-Período y la Razón de Amplitudes es seguidamente estudiada, para concluir con la obtención de las Constantes Características del suelo o sea la impedancia sísmica y el factor de amortiguamiento.

Finalmente, con la impedancia sísmica y el período predominante conocidos y mediante el empleo de las fórmulas de Kanai se determina el Espectro de aceleraciones y el Coeficiente Sísmico para la ciudad de Huaráz.

Para terminar en el Capítulo IV se exponen las conclusiones así como también algunas recomendaciones respecto a los resultados del presente trabajo.

CAPITULO I

A N T E C E D E N T E S

1.10 GEOGRAFIA

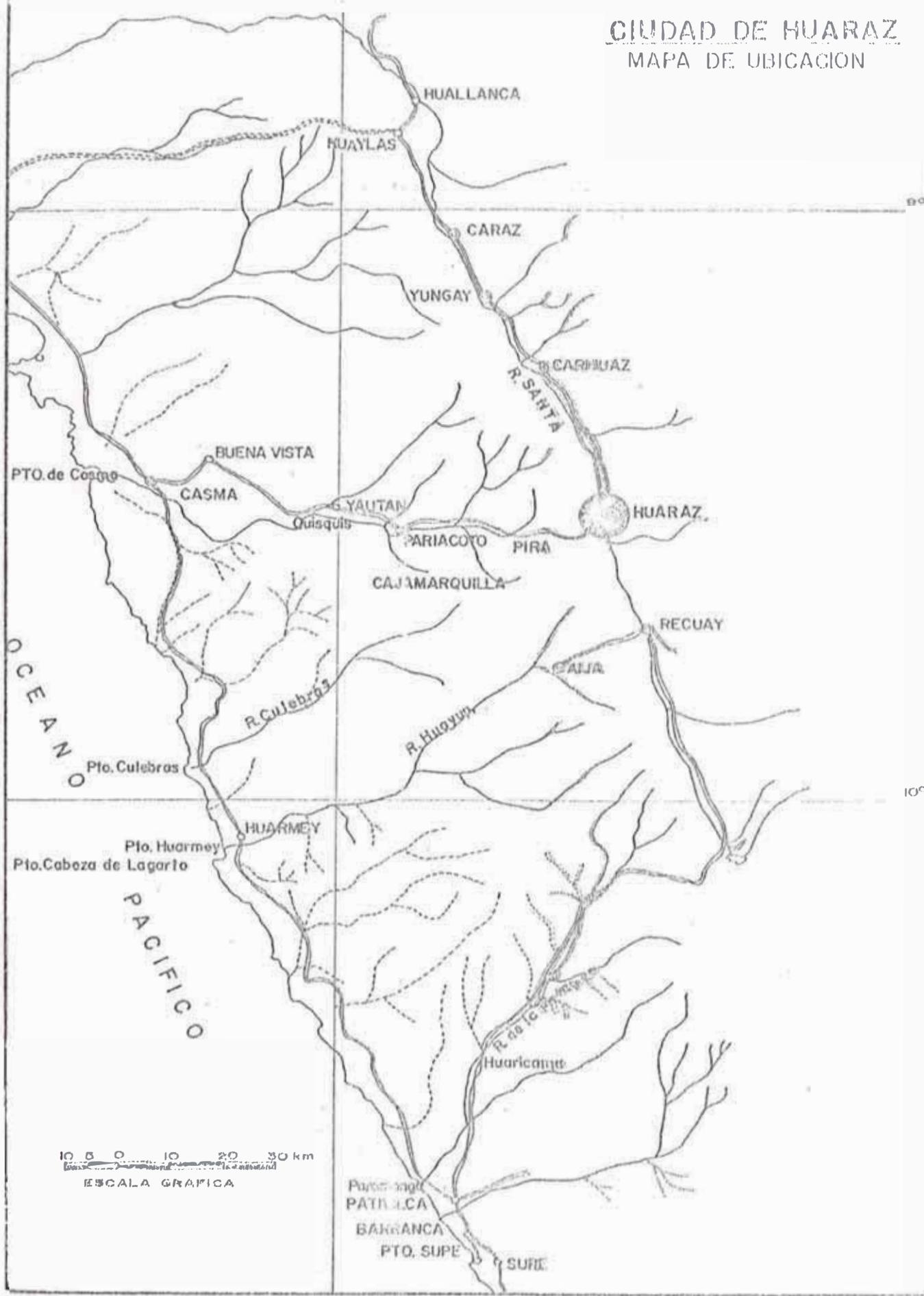
La ciudad de Huaráz está situada en el flanco occidental de la Cordillera Blanca y en la margen derecha del río Santa, sobre una elevación de 3,050 mts. sobre el nivel del mar y comprendida en las coordenadas geográficas: 09°30' Latitud Sur y 77°33' Longitud Oeste.

El área de Huaráz comprende aproximadamente un rectángulo de largo igual a 3.6 kms. siguiendo la dirección del curso del río y de 2 kms. de ancho, lo que representa 760 Ha. aproximadamente.

Huaráz es una provincia, Capital del Departamento de Ancash localizada en el eje del Callejón de Huaylas.

En cuanto a la Hidrografía, todas las aguas de la zona de Huaráz drenan al sistema hidrográfico del río Santa; los ríos y riachuelos son de régimen permanente y torrentosos durante la época de precipitaciones pluviales (Noviembre a Marzo) y en tiempo de estiaje se reducen al mínimo con excepción del río Santa y el río Quilcay.

CIUDAD DE HUARAZ MAPA DE UBICACION



10 5 0 10 20 30 km
 ESCALA GRAFICA

El río Santa nace en la laguna Gonococha (4080 m.s.n.m.) atravieza a lo largo el Callejón de Huaylas según la dirección S.E.-N.O. y tiene una longitud de 294 kms. hasta su desembocadura en el Océano Pacífico.

El río Quilcay es el principal tributario del río Santa y disecta a la ciudad de Huaráz, está formado por el drenaje de las siguientes quebradas: Cojup; Quilcay Huanca y Shallap. Otros rios existentes pero de menor importancia son el río Tajamar y el río Seco que son torrentes de escaso caudal, siéndo el último de ellos el de mayor alcance por sus períodos de crecientes notables.

1.20 HISTORIA SISMICA

Estando el Perú situado en el Círculo Circum Pacífico, es natural que su territorio se vea afectado periódicamente por movimientos telúricos, los cuales en el caso de la ciudad de Huaráz, han dejado diversos grados de daños materiales y personales, siéndo el de mayor gravedad por las pérdidas de vida y daños materiales que ocasionó, el ocurrido el 31 de Mayo de 1970.

En las páginas 21 a 24 se muestra una relación de sismos cuyos epicentros, se encuentran ubicados en una área comprendida entre :

08° y 12° Latitud Sur

76° y 80° Latitud Oeste

Considerándose ésta, el área desde donde un movimiento sísmico de magnitud mayor que 5.1 puede haber afectado a la ciudad de Huaráz; dichos sismos han sido seleccionados desde el Catálogo de Sismos Fuertes elaborado por el Instituto Geofísico del Perú.

HISTORIA SISMICA DE HUARAZ

<u>Fecha</u>			<u>Hora</u>	<u>Lat.</u>	<u>Long.</u>	<u>Int.</u>	<u>Mag.</u>	<u>Lugar y Consecuencia</u>
<u>Mes</u>	<u>Día</u>	<u>Año</u>	<u>Local</u>	<u>S</u>	<u>W</u>	<u>MM</u>	<u>M</u>	
Abr.	04	1568	-	-	-	VI	-	Sentido fuerte en Lima
Jun.	17	1578	-	12.0	77.0	VII	-	Destrucción de casas y templos en Lima.
Jul.	09	1586	19.0	12.0	77.7	IX	-	Destrucción de Lima y Callao maremoto.
Oct.	19	1609	20.0	-	-	-	-	Destrucción de Lima y # de muertos no determin.
Feb.	16	1619	11.30	08	79.4	IX-X	8.2	Ruina en Trujillo.
Nov.	27	1630	10.30	-	-	-	-	Daños en Lima, desplome de edificios.
Nov.	13	1655	14.45	-	-	VIII	7.3	Destructivo en Lima, grietas en Plaza de Armas, Iglesia Jesuita, Calles.
Jun.	17	1678	19.45	-	-	VIII	-	Destrucción parcial en Lima, averíos en edificios y conventos.
Oct.	20	1687	04.15	-	-	IX	8.0	Destrucción en Lima, Tsunami en Callao, mar inundo Chancay.
Oct.	10	1687	16.30	-	-	-	-	Fuerte temblor en Lima
Nov.	21	1694	13.00	-	-	-	-	" " "
Set.	29	1697	08.00	-	-	-	-	" " "
May.	07	1713	19.00	-	-	-	-	" " "
Ene.	24	1715	13.00	-	-	-	-	" " "

<u>Fecha</u>			<u>Hora</u>	<u>Lat.</u>	<u>Long.</u>	<u>Int.</u>	<u>Mag.</u>	<u>Lugar y Consecuencia</u>
<u>Mes</u>	<u>Día</u>	<u>Año</u>	<u>Local</u>	<u>S</u>	<u>W</u>	<u>MM</u>	<u>M</u>	
Ene.	28	1715	23.00	-	-	-	-	Fuerte temblor en Lima.
Ene.	06	1725	23.15	-	-	-	-	Daños en Trujillo, en Lima daños y rajaduras.
Oct.	28	1746	22.30	11.6	77.5	X XI	-	Destrucción total de Lima más de 8,000 muertos de 3,000 casas quedaron 25, sólido puente sobre río Huaura destruido.
Set.	02	1759	23.15	-	-	-	-	En Trujillo, avería en Catedral y casas, 5 muertos.
Dic.	01	1806	-	-	-	-	-	Fuerte temblor en Lima originó maremoto leves daños.
Mar.	30	1828	07.35	-	-	VII VIII	-	Destrucción en Lima, Chancay 20 muertos.
Mar.	04	1904	05.17	-	-	VII VIII	7.2	Fuerte temblor en Lima.
Abr.	12	1909	03.05	-	-	VI	-	Avería en Edif.en Huacho.
Ene.	19	1932	21.33	12.00	77.5	VI VII	7.3	Caída de cornisa en Lima.
Jun.	21	1937	10.13	08.5	80.0	VI	6.75	En Trujillo, Salaverry y Lambayeque.
Dic.	24	1937	01.23	10.5	75.3	-	6.25	Sismo destructor en Oxapampa y Huancabamba.

<u>Fecha</u>			<u>Hora</u>	<u>Lat.</u>	<u>Long.</u>	<u>Int.</u>	<u>Mag.</u>	<u>Lugar y Consecuencia</u>
<u>Mes</u>	<u>Día</u>	<u>Año</u>	<u>Local</u>	<u>S</u>	<u>W</u>	<u>MM</u>	<u>M</u>	
May.	24	1940	11.35	11.0	77.5	VIII	8.2	Terremoto en Lima Chancay, Huacho, Lurín.
Nov.	10	1946	12.40	08.5	77.5	X XI	7.25	Sismo destructor en Sihuas, Quinchés, Majes y Conchucos.
Set.	24	1963	11.30	10.6	78.0	VII	-	Daños en Huayllacayán, Cajacay, Ocros, averías en Huaráz y Huarney.
Oct.	17	1966	16.42	10.7	78.7	VIII	7.5	Terremoto destructor en Lima, Callao, Huara, Supe Huacho 100 muertos.
May.	31	1970	15.36	9.18	78.8	VIII	7.7	Sentido fuertemente en Chiclayo, daños en zona de Ancash.
Jun.	01	1970	01.36	9.3°	79.0°	-	6.0	Frente a Chimbote, sentido en Trujillo, replica fuerte del 31 de Mayo.
Jun.	04	1970	04.09	9.8°	78.6°	-	5.8	Al norte de Huarney, otra de las replicas del 31 de Mayo.
Nov.	29	1971	20.14	11.24°	77.75°	*	5.3	Sentido en Lima.
Ene.	05	1974	08.33	12.3°	76.4°	V	6.3	Ocasionó 10 muertos; daños mayores en Lima y Yauyos.

Fecha		Año	Hora	Lat.	Long.	Int.	Mag.	<u>Lugar y</u> Consecuencia
Mes	Día		Local	S	W	MM	M	
Oct.	03	1974	09.21	12.3	77.8	VII	6.6	Daños mayores en la Molina, Chorrillos y el Callao; daños menores en edificios de Lima grietas y licuefacciones de arena en Cañete.
Nov.	09	1974	12.59	12.5	77.7	IV	6.0	Sentido en Lima con regular intensidad.

CAPITULO II
BASES PARA EL ESTUDIO

Cuando ocurre un sismo, el movimiento superficial del suelo está influenciado por los siguientes factores

- 1.- La naturaleza del mecanismo de origen, las dimensiones y orientación del área deslizada, la caída del esfuerzo, la naturaleza del movimiento de falla, su amplitud, dirección, tiempo ó historia.

- 2.- La trayectoria de viaje de las ondas sísmicas, las propiedades físicas de la roca, discontinuidades, estratificación, etc.

- 3.- Geología local, propiedades físicas de los estratos de suelo y rocas sedimentarias; dimensiones verticales y horizontales de los cuerpos de suelos y rocas; orientación del plano de flexión.

La influencia del medio se ha hecho notoria en innumerables casos como resultado de evaluaciones de daños en estructuras por efecto de un terremoto. Se ha encontrado discrepancia en los resultados para edificaciones similares en un área bastante limitada. Esta incongruencia puede explicarse en parte por

el comportamiento diferencial del suelo de fundación en razón de la variabilidad de sus propiedades físicas.

El comportamiento dinámico del suelo de un determinado lugar, tan importante para el cálculo del coeficiente sísmico estructural, puede llegar a conocerse con la ayuda de los resultados de los análisis de las curvas frecuencia-período, sumados a los deducidos de la observación de sismos naturales, del análisis teórico de la multireflexión de ondas y a los obtenidos de estudios estadísticos.

En el presente trabajo, todos estos factores son estudiados por la Sismología, las Microtrepidaciones, la Geología, la Mecánica de suelos y la Gravimetría.

2.10 SISMOLOGIA

2.11 GENERALIDADES

La Sismología es la ciencia que estudia los fenómenos sísmicos, los cuales son interpretados como el resultado de la ruptura de la corteza terrestre ó movimientos bruscos en las fallas existentes, producidas por presiones internas crecientes hasta el punto de exceder la capacidad resistente del material, con desplazamientos sub-secuentes de la roca.

El lugar ó la zona donde se inicia la ruptura es conocido como el foco sísmico.

El desplazamiento que ocurre a causa de un sismo, genera una liberación de energía en la fuente de perturbación sísmica, la cual es única y puede determinarse mediante uno ó más registros instrumentales, obtenidos a cualquier distancia del epicentro.

La magnitud de un sismo que es función de la energía liberada se define como : el logaritmo base 10 de la amplitud máxima expresada en micrones con el cual el sismómetro de torsión standard de período corto registra un sismo a una distancia epicentral de 100 kms.

Un sismo que no es más que una serie de vibraciones elásticas se trasmite desde su punto de origen a través de la tierra, obedeciendo las leyes de propagación de ondas. Estas vibraciones son registradas en la superficie del suelo por instrumentos denominados sismógrafos, los cuales son péndulos convenientemente acondicionados y amortiguados que están asociados a sistemas de registro.

2.12 CLASES DE SISMOS

Según la cantidad de energía liberada, los sismos pueden clasificarse por magnitudes desde 0.0 hasta 8.9. La relación entre ambas cantidades viene dada por :

$$\log E = 11.4 + 1.5 M$$

donde E = energía en ergios

M magnitud

Por su distancia epicentral, los sismos pueden ser :

- a - Sismos locales de la distancia epicentral menor que 1000 kms, en los sismogramas se les aprecia por el corto espaciamiento entre en arribo de las ondas P y S.
- b - Telesismos de distancia epicentral mayor que 1000 kms.

Desde el punto de vista estructural, solo interesan los sismos locales, ya que son los que potencialmente podrían producir daños.

Según sus profundidades los sismos se clasifican en

- a - Superficiales ó normales : en los cuales la profundidad varía entre 0 y 70 km; ocurren generalmente en el lado de la costa del Océano Pacífico.
- b - Intermedios sus profundidades varían entre 70 y 300 km.
- c - Profundos en los cuales, el foco se encuentra ubicado en el interior de los continentes y su profundidad varía

entre 550 y 700 kms.

En general, puede decirse, que la intensidad y los daños debidos a un sismo determinado, dependerán tanto de la magnitud como de la distancia epicentral, profundidad focal, características del suelo, etc.

2.13 TIPOS DE ONDAS SISMICAS

Existen los siguientes tipos elementales de ondas sísmicas:

1) Ondas de cuerpo

Son las que se transmiten por el interior de la tierra y son :

- a) Onda de compresión y rarefacción "P"; análoga a la onda sonora longitudinal, es la más rápida de todas.

- b) Onda transversal (distorsional) ó de Cizalla de propagación análoga a la vibración transversal de una cuerda de guitarra, su velocidad es aproximadamente 0.6 veces la velocidad de las ondas "P".

2) Ondas Superficiales

Son las que se transmiten fundamentalmente en la corteza terrestre y son :

- a) Cizalla ó Love "Lq"; son las más rápidas de las de

superficie y representa la mayor cantidad de energía inscrita en un sismograma de un instrumento de período largo, tanto en los terremotos profundos como en los de profundidades medias, siéndole el movimiento de la partícula perpendicular a la dirección de propagación y se efectúa en el plano horizontal.

- b) Rayleigh (L_r); la partícula se mueve en una órbita retrógrada elíptica ubicada en un plano vertical a la dirección de propagación. La velocidad de estas ondas es aproximadamente 0.92 veces la velocidad de las ondas " L_q ".

2.14 SISMOMETROS

Las ondas sísmicas son captadas por medio de sismómetros, los cuales están asociados a un filtro de frecuencias, a un amplificador y a un registrador o sismógrafo. Existen varios tipos de sismómetros, de acuerdo al principio que empleen para su funcionamiento, pudiendo ser: Electromagnéticos, de Reluctancia, de Capacitancia y Piezoeléctricos, de estos los que más se usan son el primero y el último.

Todo sismómetro tiene un período natural para el cual la am-

plitud de las vibraciones forzadas causadas por un impulso periódico es máximo.

Si el período natural del sismómetro es mucho menor que el de la vibración de la tierra, el desplazamiento del sismómetro será proporcional a la aceleración de la tierra y tendremos un acelerómetro, si los dos períodos son aproximadamente iguales; la lectura del instrumento será proporcional a la velocidad del movimiento de la tierra, si el período natural es mucho mayor que el período de la vibración de la tierra, la lectura es proporcional al desplazamiento real de la tierra.

Los sismómetros para registros de sismos naturales son raras veces diseñados para períodos menores que 1 segundo. El rango de frecuencia es un factor que controla el diseño no solo de los elementos detectores, sino también de los amplificadores y registradores.

2.15 EQUIPO UTILIZADO Y METODO DE OBSERVACION

Como es ya conocido, después de que ocurre una gran liberación de energía sísmica ó sea un terremoto, ocurren por un espacio

de tiempo determinado, réplicas de aquel, las cuales van decayendo en intensidad en forma exponencial.

Teniendo en cuenta esto es que con ocasión del terremoto del 31 de mayo de 1970 se planteó el estudio de la amplificación de las ondas sísmicas en los suelos de la ciudad de Huaráz por medio del registro de las réplicas de aquel en diferentes tipos de suelo y en la roca en forma simultánea.

Se dispusieron tres estaciones de observación, una fija (sobre roca) y dos móviles (sobre suelo); la estación fija se situó sobre un afloramiento rocoso del cerro Rataquenua el cual se supone que es el que yace bajo los suelos de la ciudad; las estaciones móviles fueron desplazándose sobre la ciudad. Los equipos utilizados en cada estación de observación fueron proporcionados por los Departamentos de Sismología del Instituto Geofísico del Perú y la Universidad de San Agustín de Arequipa y estaban constituidos por : un sismómetro Hess, un amplificador transistorizado, un reloj electrónico con cristal de cuarzo y un registrador de señales.

La ganancia del amplificador se seleccionó de acuerdo al ruido sísmico de cada lugar y las estaciones móviles se trasladaban de lugar una vez que se obtenían registros de dos ó

tres réplicas sísmicas.

La ubicación de los lugares de observación, se muestra en la página 41 y las fotografías de parte de los registros obtenidos en algunos de ellos, se muestran en las páginas 34 a 37.

2.20 MICROTREPIDACIONES

2.21 GENERALIDADES

Son pequeños movimientos de la superficie del suelo cuyas amplitudes son del orden de 0.1 a 1.0 micrones y cuyos períodos varían entre 0.05 y 0.1 seg. a 1.2 seg. Son producidos por medios naturales ó por medios artificiales entre los naturales tenemos : perturbaciones meteorológicas, ríos, lagos y mares; entre los artificiales podemos mencionar el tráfico, máquinas industriales, etc.

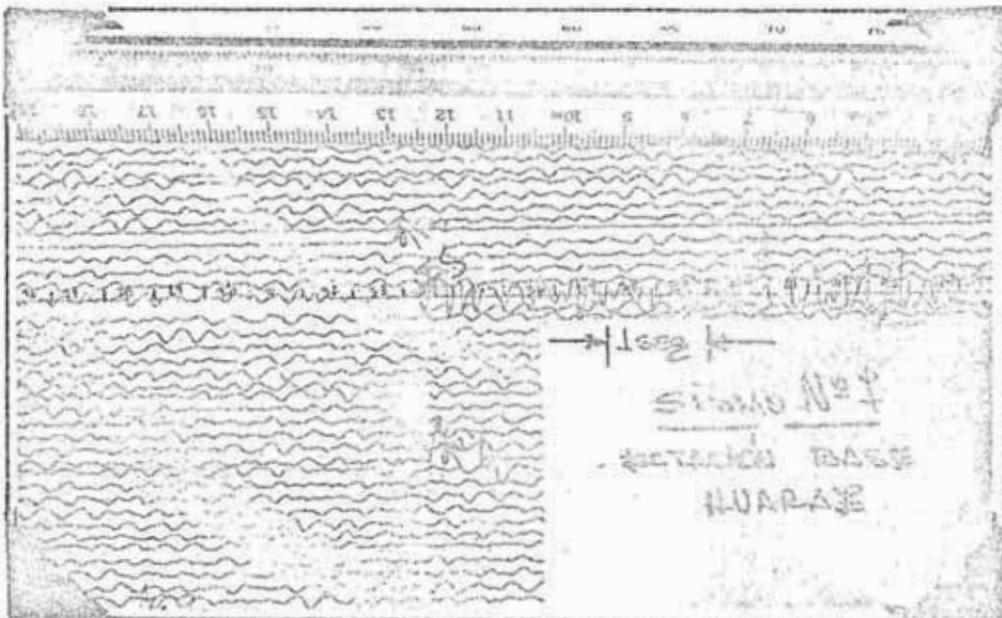
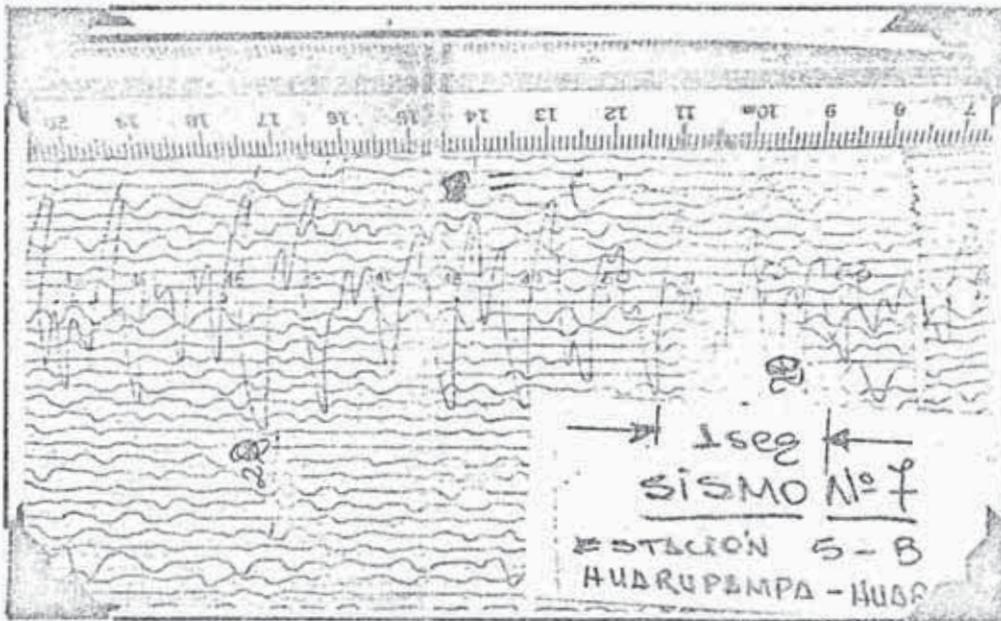
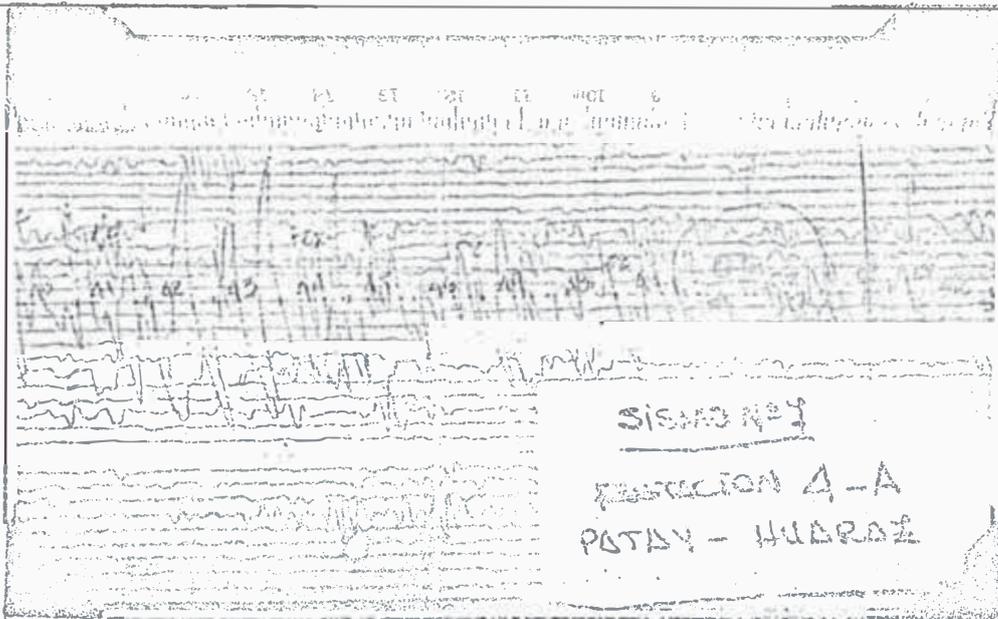
Las características de las microtrepidaciones dependen no sólo de la actividad ó condiciones artificiales de perturbación si no también de las condiciones de sub-suelo que son las constantes físicas y de las disposiciones de los materiales arriba del sub-suelo propiamente dicho.

El registro de las microtrepidaciones es importante porque

REGISTROS DE SISMOS

FECHA: NOV. 1 DE 1970

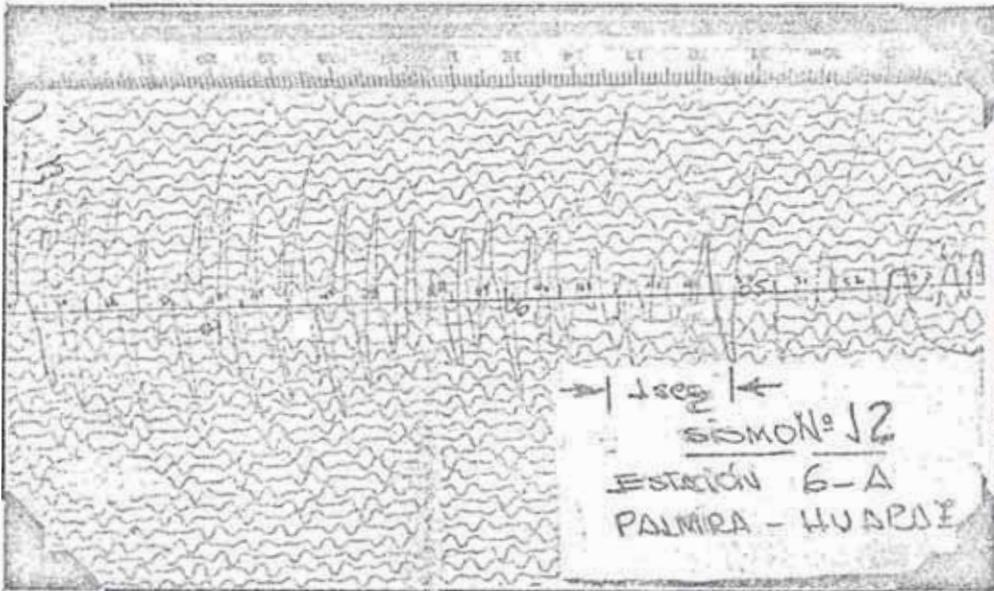
HORA: 09.20

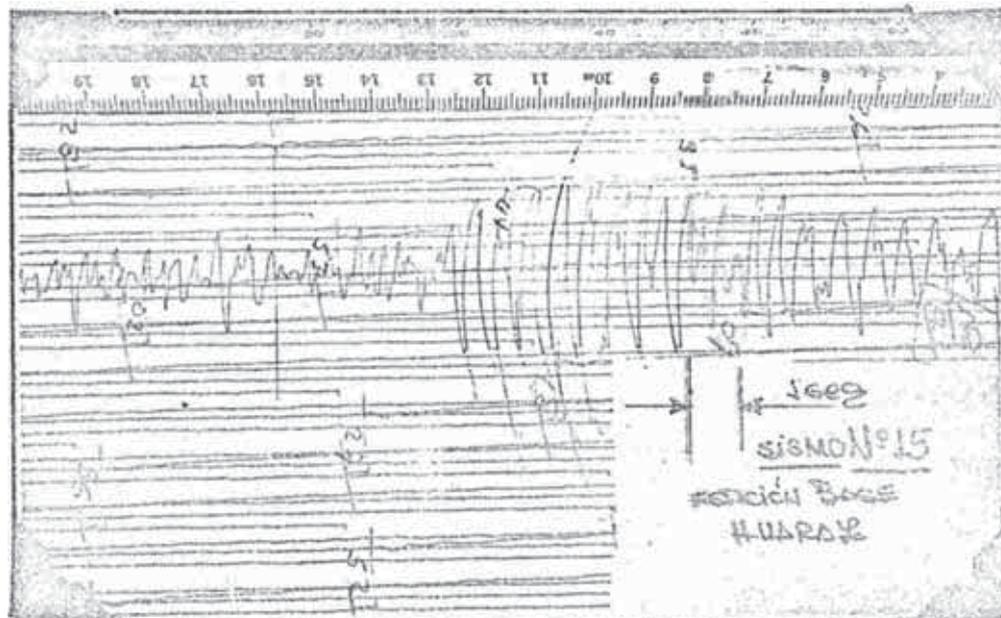
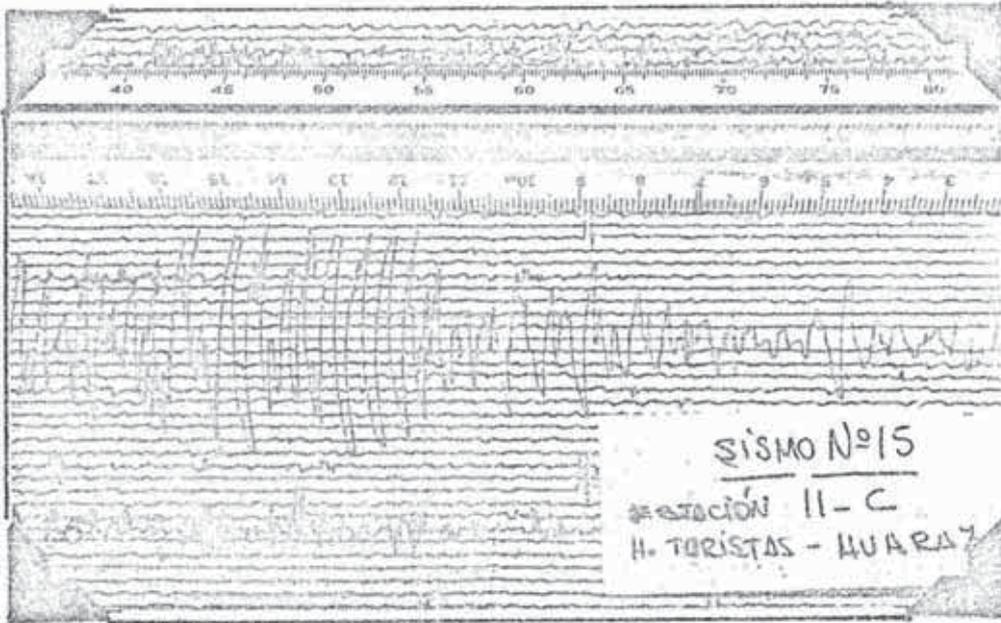


REGISTROS DE SISMOS

FECHA: NOV. 03 - DE 1970

HORA: 16.45

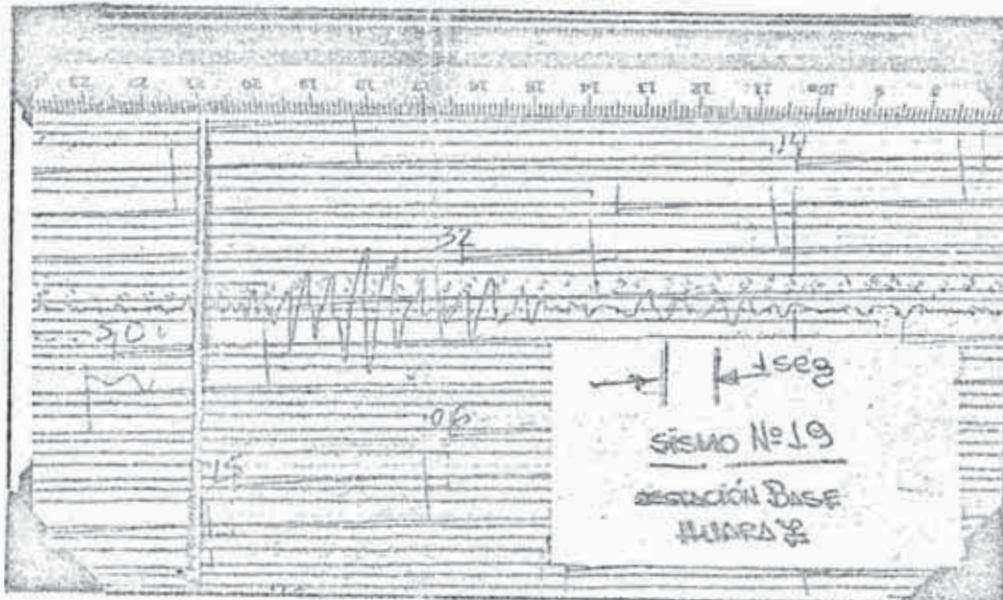
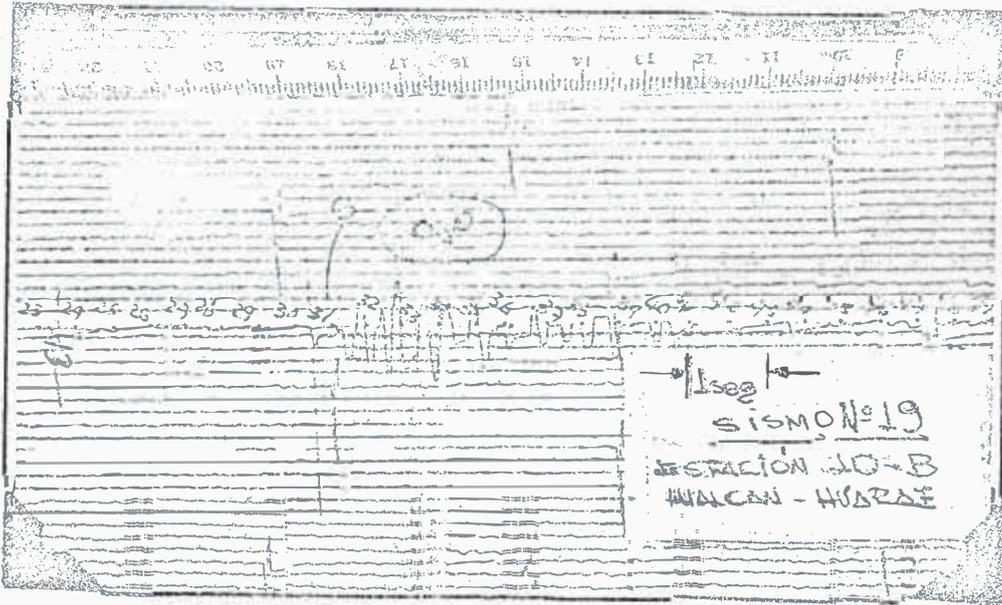




REGISTROS DE SISMOS

FECHA: NOV. 17 DE 1970

HORA: 04.45



se ha observado similitud entre las histogramas frecuencia período de estos movimientos con los histogramas de acelerogramas para un mismo lugar, esto se explica por la vibración libre de los depósitos sedimentarios, ya que siendo libre el movimiento vibratorio, sus modos naturales de vibración no tienen porque ser diferentes en caso de un sismo y en caso de microtrepidaciones.

Por estudios realizados en California (USA) se ha determinado que en caso de un solo estrato las curvas de relación frecuencia-período de microtrepidaciones y de sismos tienen un pico coincidente; en caso de una estratificación múltiple los picos no coinciden debido a que las interfaces entre los estratos producen reflexiones múltiples de las ondas (17).

2.22 METODOLOGIA E INSTRUMENTACION

El instrumental utilizado en el caso de la ciudad de Huaráz es de tipo portátil utilizando en prospección sísmica y fué proporcionado por el Departamento de Sismología del Instituto Geofísico del Perú; las características de dichos equipos son los siguientes :

Un sismómetro Hess (Geófono) de período corto ($T_0 = 1.0$ seg)

Un amplificador transistorizado TRGF-CIV un reloj electrónico con cristal de cuarzo marca Toyo, y un registrador portátil de dos canales, uno para los registros de vibración natural del suelo y el restante para introducir marcas de tiempo (cada segundo) necesarios para el análisis.

La velocidad de desplazamiento del registrador fue del orden de 9 mm/seg.; el filtro utilizado fue de 1.2 cps. y la ganancia del amplificador fue variable de acuerdo al lugar de observación.

El procedimiento empleado para la observación fue el siguiente :

- 1) Como primer paso se ubicó sobre un plano catastral los lugares de observación tratando de distribuirlos regularmente.
- 2) Se procedió luego de efectuar un reconocimiento diurno de los sitios elegidos a la ubicación de-

finitiva de los puntos de medida.

- 3) Las observaciones se hicieron durante la noche y por la madrugada para evitar la interferencia originada por el tráfico de vehículos y el tránsito de peatones.

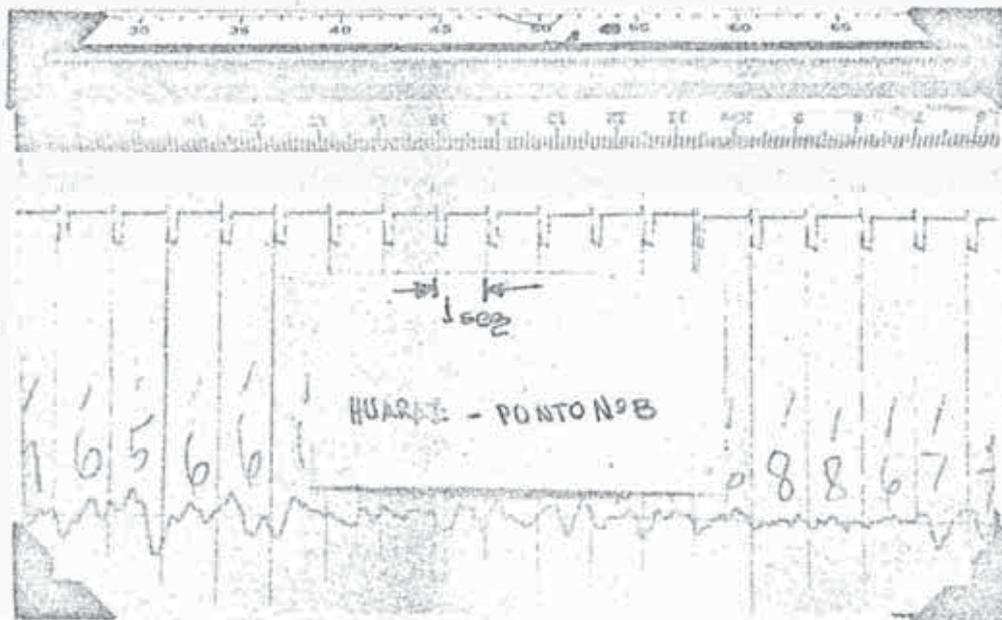
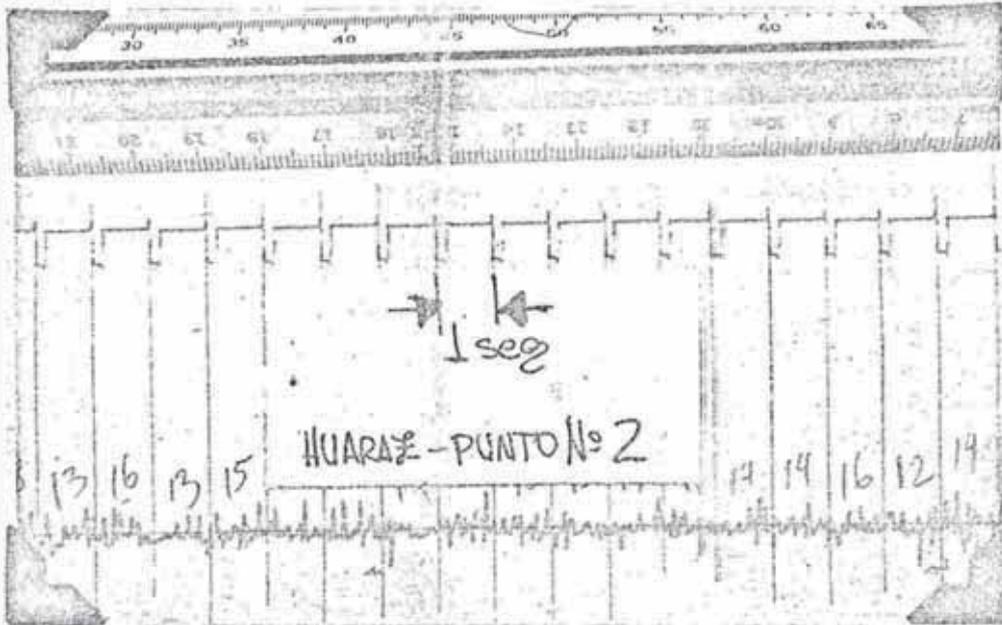
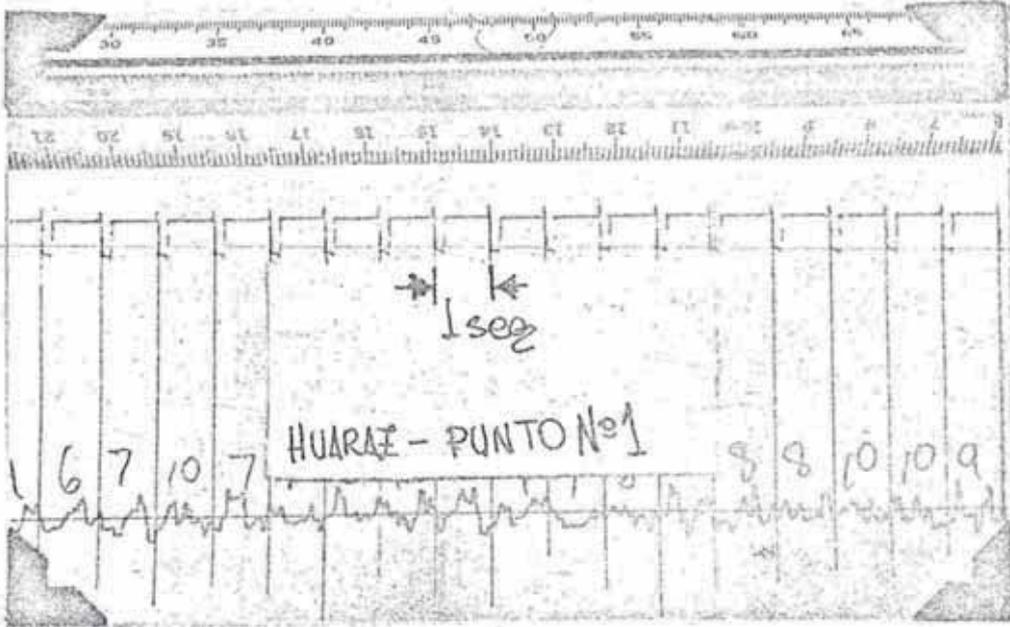
El tiempo mínimo de registro útil fué de 2 minutos.

En las páginas 41 a 44 se muestran la ubicación de los puntos de observación lo mismo que fotografías de parte de los registros obtenidos en cada uno de ellos.

El análisis de estos registros al igual que el de movimientos irregulares tales como terremotos y ruidos, ha sido realizado por medio del conocido método de dibujar el diagrama frecuencia-período de la vibración de la manera siguiente :

Los intervalos de paso por la línea cero de todas las ondas son leídas desde el registro de la vibración, el intervalo de tiempo así leído es doblado y ello es considerado como el período correspondiente a la onda media,

REGISTROS DE MICROTREPIDACIONES



el número total de pasos por cero M_i , contenidos en el rango de períodos desde T_i a $T_i + 1$ es representado por el período central T_i ; donde T_i es un período tomado arbitrariamente y $T_i + 1$ es el período más grande que T_i por ΔT , entonces la curva de frecuencia-período es graficada tomando T_i sobre las abscisas y M_i de cada rango de períodos sobre las ordenadas.

2.30 ESTUDIOS COMPLEMENTARIOS

Para completar el análisis de los factores que influyen en el movimiento superficial del suelo; en el presente estudio se ha considerado como complementarias las investigaciones realizadas en los campos de: la Geología, la Mecánica de suelos y la Gravimetría.

2.31 GEOLOGIA

En este aspecto, es de suma importancia la parte correspondiente a la Geología local debido a que un mismo terremoto produce efectos diferentes en la estructuras según el tipo de suelo de fundación, lo cual se explica en parte por el diferente comportamiento sísmico de los suelos blandos sensibles ó sueltos, sobre todo cuando la napa freática se encuentra cerca

de la superficie.

En Janón, se han efectuado estudios que relacionan la Geología con las Microtrepidaciones, según los cuales a cada tipo de suelo corresponde un período predominante de vibración obtenido del histograma de frecuencia-período, así se tiene que :

- 1) Para terrenos duros aparece un pico entre 0.1 á 0.2 seg.
- 2) Sobre terreno firme aluvional aparece un pico entre 0.2 á 0.4 seg.
- 3) Para terreno suave aluvional aparecen picos entre 0.3 á 0.6 seg.
- 4) Sobre terreno suave y de gran potencia aparecen picos entre 0.2 á 1.0 seg.
- 5) Lechos rocosos producen curvas planas para períodos menores que 0.1 seg. y mayores que 1.0 seg.

Por los estudios realizados en cuanto a la Geología, se conoce que: el área de la ciudad de

Huaráz, está íntegramente rodeada por derrames, brechas y tufos volcánicos de composiciones variadas, dacítica y riolítica, aunque también se presentan andesitas porfiríticas.

En el área de estudio puede distinguirse las siguientes unidades geomórficas

- a) Terrazas fluviales.
- b) Depósitos fluivo-gravitacionales.
- c) Depósitos de arcilla y arenas saturadas.
- d) Depósitos aluviónicos.
- e) Depósitos flúvioglaciares.

Todas estas unidades geomórficas son las que conforman el relleno sedimentario Cuaternario, que suprayacen a la roca de basamento.

Según el mapa geológico estructural y estratigráfico levantado en un área de 120 kms², se puede decir que :

La zona del barrio Centenario se halla sobre depósitos aluviales antiguos.

Las zonas de Shancayán y Micrupampa están sobre depósitos gravitacionales.

La zona del río Quilcay, está conformada por depósitos aluviales recientes.

La zona central de Huaráz se halla sobre depósitos aluviales antiguos.

La zona de Pedregal está sobre depósitos gravitacionales.

La zona de Patay y Huarupampa están sobre depósitos fluviales.

La zona de Palmira, al norte del río Vichay se halla sobre depósitos fluvioglaciares.

Al Sur de Huaráz existen rocas volcánicas terciarias; al Norte, cerca de Monterrey, existen formaciones de Cuarcitas y lutitas y rocas metamórficas tales como pizarras y al Noreste existen rocas volcánicas tales como granito y granodiorita.

2.32 MECANICA DE SUELOS

De las investigaciones que se realizan en este rubro son de mucha importancia las que nos llevan a conocer las constantes elásticas de cada estrato constituyente del suelo superficial, entre ellas tenemos: la velocidad de las ondas de corte, la densidad y la potencia ó espesor.

La potencia de cada estrato es determinada por medio de sondajes profundos, los cuales pueden servir también para determinar la velocidad de las ondas de corte, haciendo explotar pequeñas cargas de dinamita a diferentes profundidades y midiéndolo los tiempos de llegada de las ondas longitudinales y de corte mediante equipos de refracción sísmica.

La velocidad también se puede determinar por medio de :

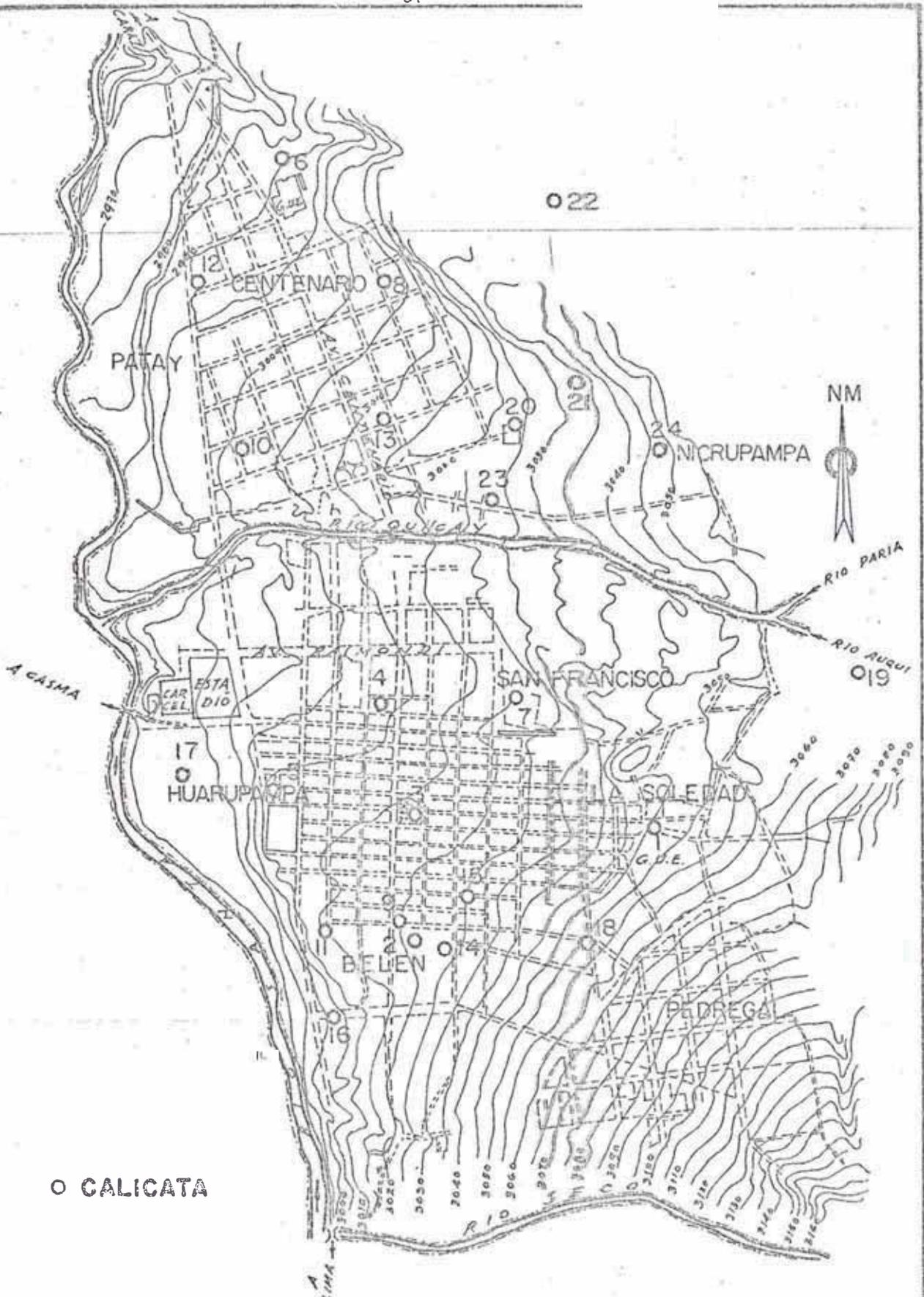
- 1) El análisis de muestras en el Laboratorio empleando el método de los pulsos en el cual, la muestra cilíndrica se ensaya dentro de una

cámara triaxial.

- 2) Estimaciones de dicha velocidad, conociendo su relación de vacíos, la presión confinante efectiva y utilizando curvas tipo ya determinadas por investigaciones anteriores (18).
- 3) La prueba de penetración standard, utilizando la siguiente fórmula semi-empírica,
$$V_s = 75 N^{0.39} \text{ (mt/seg.)}$$
en la cual: N es el número de golpes que tienen que ocurrir para que la cuchara se hunda 1 pié.

La densidad de cada estrato es determinada por el análisis de Laboratorio de las muestras obtenidas.

En el presente trabajo, los estudios de Mecánica de suelos no han proporcionado conocimiento acerca de las constantes elásticas antes mencionadas, debido a que los trabajos que ello requería implicaban un costo elevado; en este aspecto lo que se ha efectuado son 24 calicatas cuyas profundidades varían desde 1.00 hasta 7.50 mts. en ellas solo es posible apreciar la composición del suelo y su resistencia superficial, así como también en algunos casos la profundidad de la napa freática. En las páginas 51 a 58 se dan la ubicación y los detalles de algunas calicatas ya realizadas.



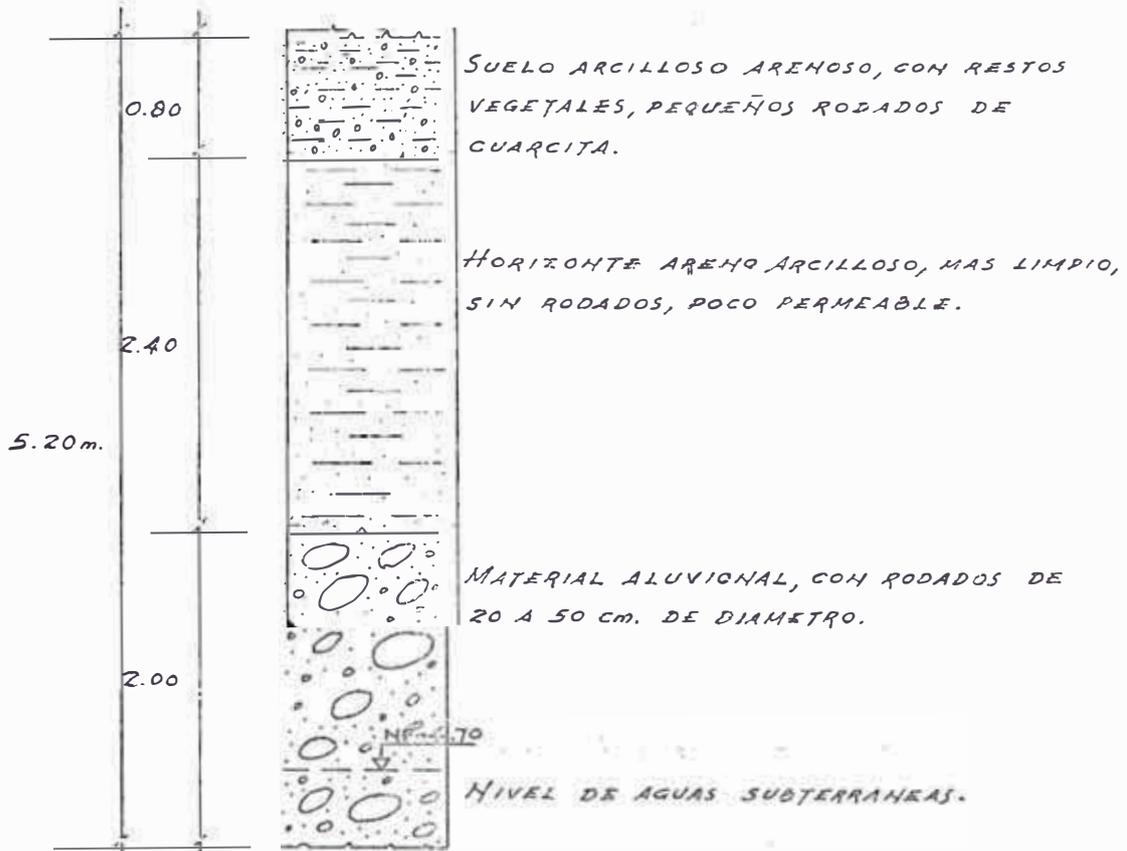
MAPA DE UBICACION DE CALICATAS—

CALICATA N° 3

UBICACION: PLAZA DE ARMAS

DIMENSIONES: 3.00 x 3.00 x 5.20

PROFUNDIDAD: 5.20 m.



CALICATA N° 4

UBICACION: CALLE ESPIRITU SANTO (HUARUPAMPA)

DIMENSIONES: 2.00 x 2.00 x 3.00

PROFUNDIDAD: 3.00 m.

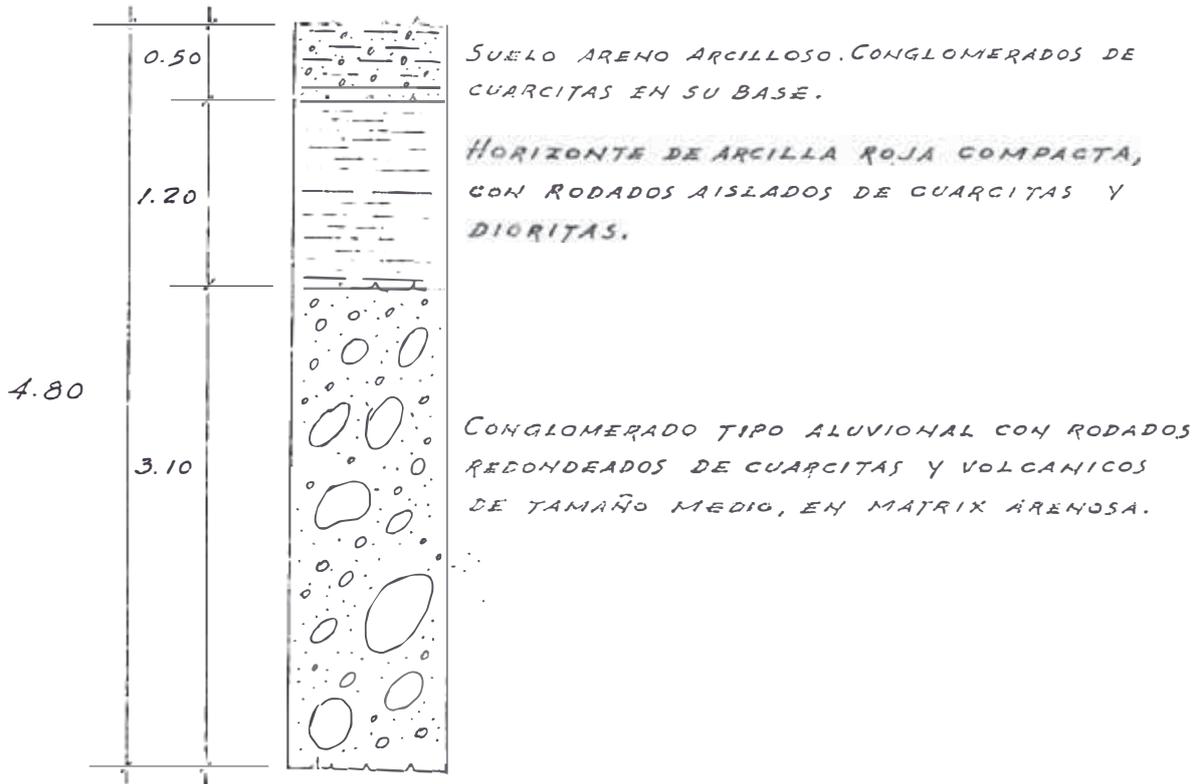


CALICATA N° 5

UBICACION: PLAZUELA HUARUPAMPA

DIMENSIONES: 2.00 x 2.00 x 4.80

PROFUNDIDAD: 4.80 m.

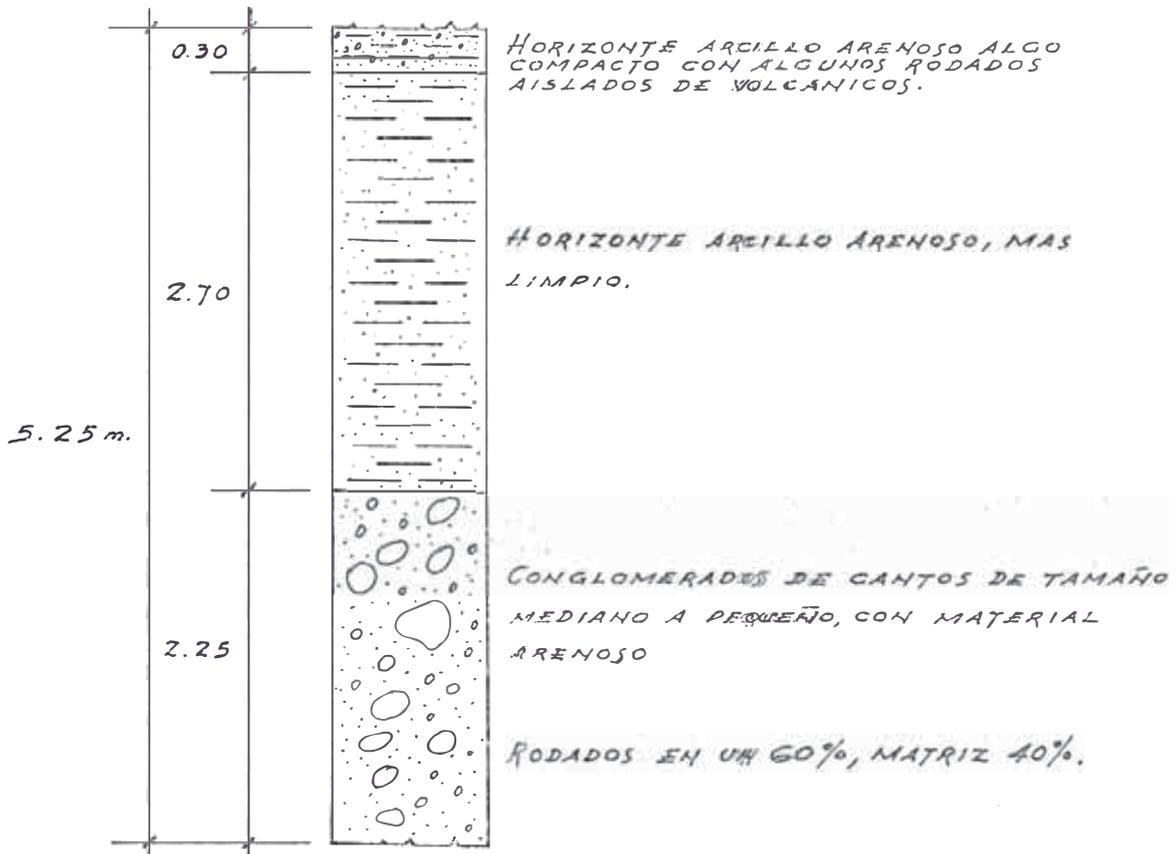


CALICATA N° 6

UBICACION: HOTEL TURISTAS (CENTENARIO)

DIMENSIONES: 3.00 x 3.00 x 5.25

PROFUNDIDAD: 5.25 m.

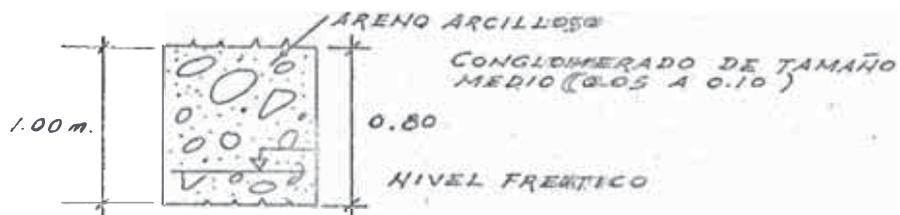


CALICATA N° 7

UBICACION: AVDA. ALFONSO UGARTE (BARRIO SAN FRANCISCO)

DIMENSIONES: 2.00 x 2.00 x 1.00

PROFUNDIDAD: 1.00 m.

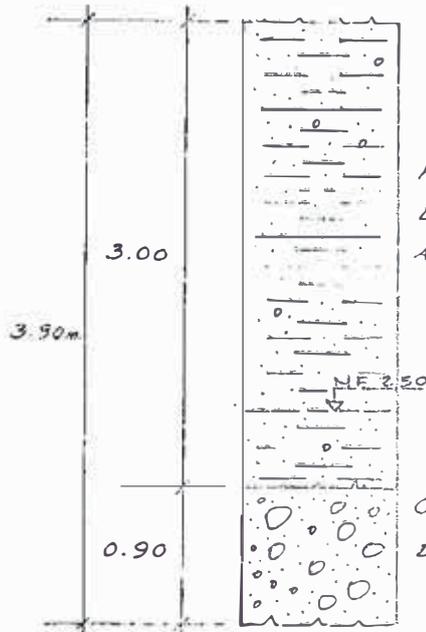


CALICATA N° 8

UBICACION: JR. MARIANO MELGAR (BARRIO CENTENARIO)

DIMENSIONES: 2.00 x 2.00 x 3.90

PROFUNDIDAD: 3.90 m.



HORIZONTE ARCILLOSO, IMPURO, COMPACTO, DE COLOR GRIS, CON RODADOS PEQUEÑOS, AISLADOS DE CUARCITAS.

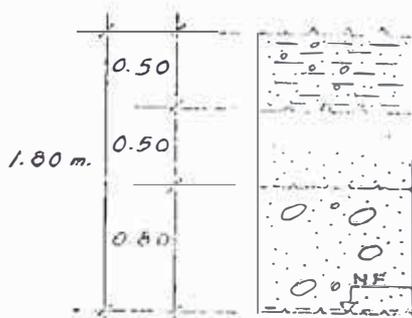
CONGLOMERADO ALUVIAL, RODADOS PEQUEÑOS DE PIZARRA, CUARCITAS, MATRIZ ARENOSA.

CALICATA N° 9

UBICACION: PLAZUELA BELEN

DIMENSIONES: 2.50 x 2.00 x 1.80

PROFUNDIDAD: 1.80 m.



MATERIAL DE TURBA, OSCURO, CON RODADOS AISLADOS.

HORIZONTE LIMO-ARENOSO FINO, LIMPIO PERMEABLE.

CONGLOMERADO ALUVIAL DE GRANODIORITAS, MATRIZ ARENOSA, PERMEABLE.

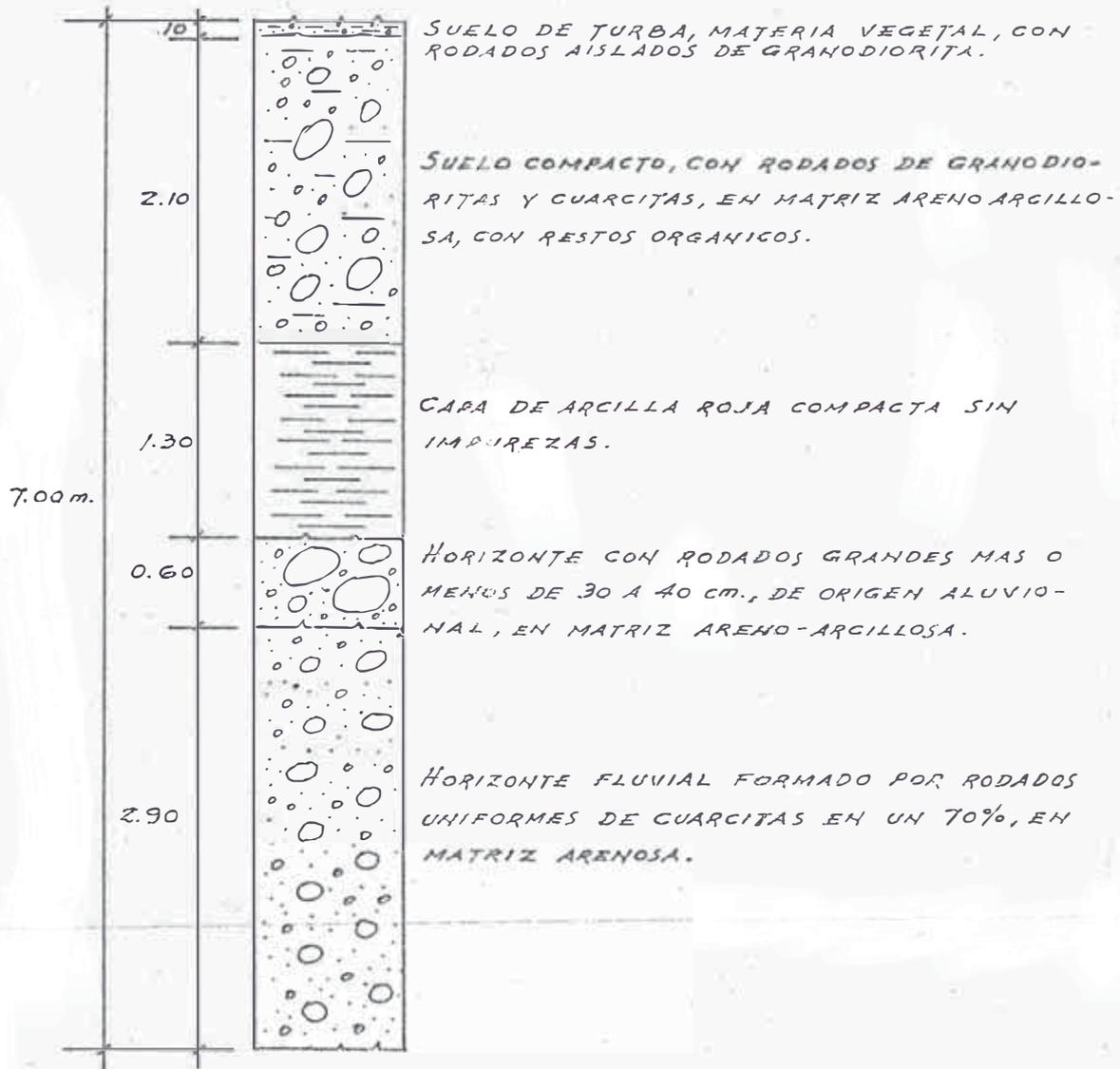
NIVEL DE AGUA SUBTERRANEA.

CALICATA N° II

UBICACION: SEMINARIO (BARRIO BELEN)

DIMENSIONES: 2.50 x 2.50 x 7.00

PROFUNDIDAD: 7.00

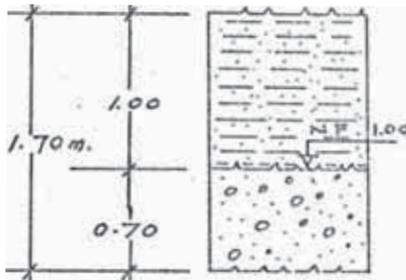


CALICATA N° 17

UBICACION: BARRIO HUARUPAMPA BAJO ANTENA.

DIMENSIONES: 1.50 x 1.50 x 1.70

PROFUNDIDAD: 1.70 m.



SUELO ARCILLOSO LIMPIO, OSCURO Y HUMEDO, CON ALGUNOS RODADOS PEQUEÑOS DE CUARCITAS; RESTOS VOLCANICOS.

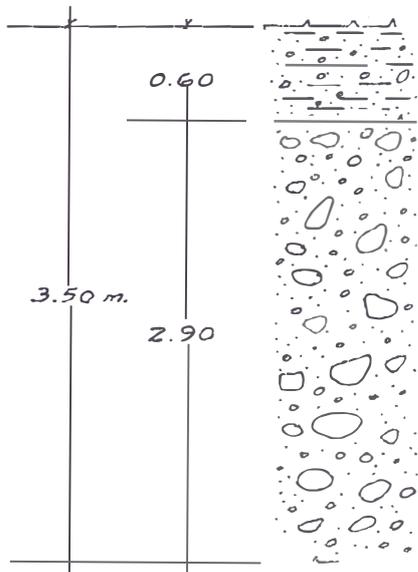
NIVEL DE AGUA SUBTERRANEA.
CONGLOMERADO FLUVIAL, DE RODADOS PEQUEÑOS. MATERIAL ARCILLO-ARENOSO NO COMPACTO.

CALICATA N° 18

UBICACION: BUENOS AIRES Y BOLIVIA-PEDREGAL

DIMENSIONES: 2.00 x 2.00 x 3.50

PROFUNDIDAD: 3.50 m.



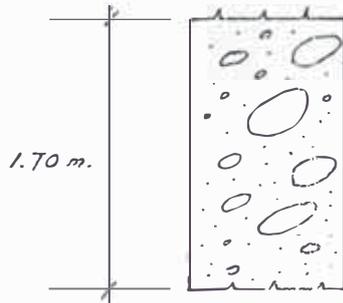
CAPA ARCILLOSA, CON IMPUREZAS Y RESTOS ORGANICOS.

HORIZONTE FLUVIAL, RODADOS DE CUARCITAS Y GRANODIORITAS, TAMAÑO MEDIO A GUESO. MATRIZ ARENOSA.

CALICATA N° 23

UBICACION: AVDA. MANGO CAPAC
(BARRIO NICRUPAMPA)

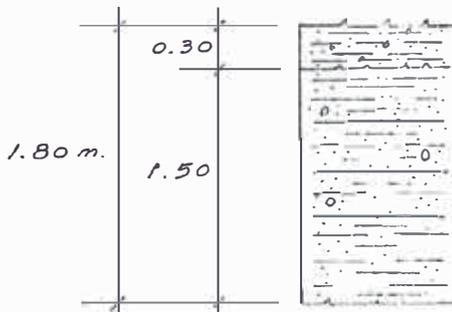
PROFUNDIDAD: 1.70 m.



HORIZONTE ALUVIONICO CON RODADOS DE GRANITO, GRANODIORITA, Y CUARCITA EN MATRIZ ARENOSA.

CALICATA N° 24

UBICACION: BARRIO NICRUPAMPA.
DIMENSIONES: 2.00 x 2.00 x 1.80
PROFUNDIDAD: 1.80 m.



SUELO DE ARCILLA ALTERADA OSCURA, CON RESTOS VEGETALES.

HORIZONTE ARCILLO ARENOSO, MUY HUMEDO, CON RESTOS ANGULOSOS AISLADOS DE CUARCITAS Y VOLCANICOS.

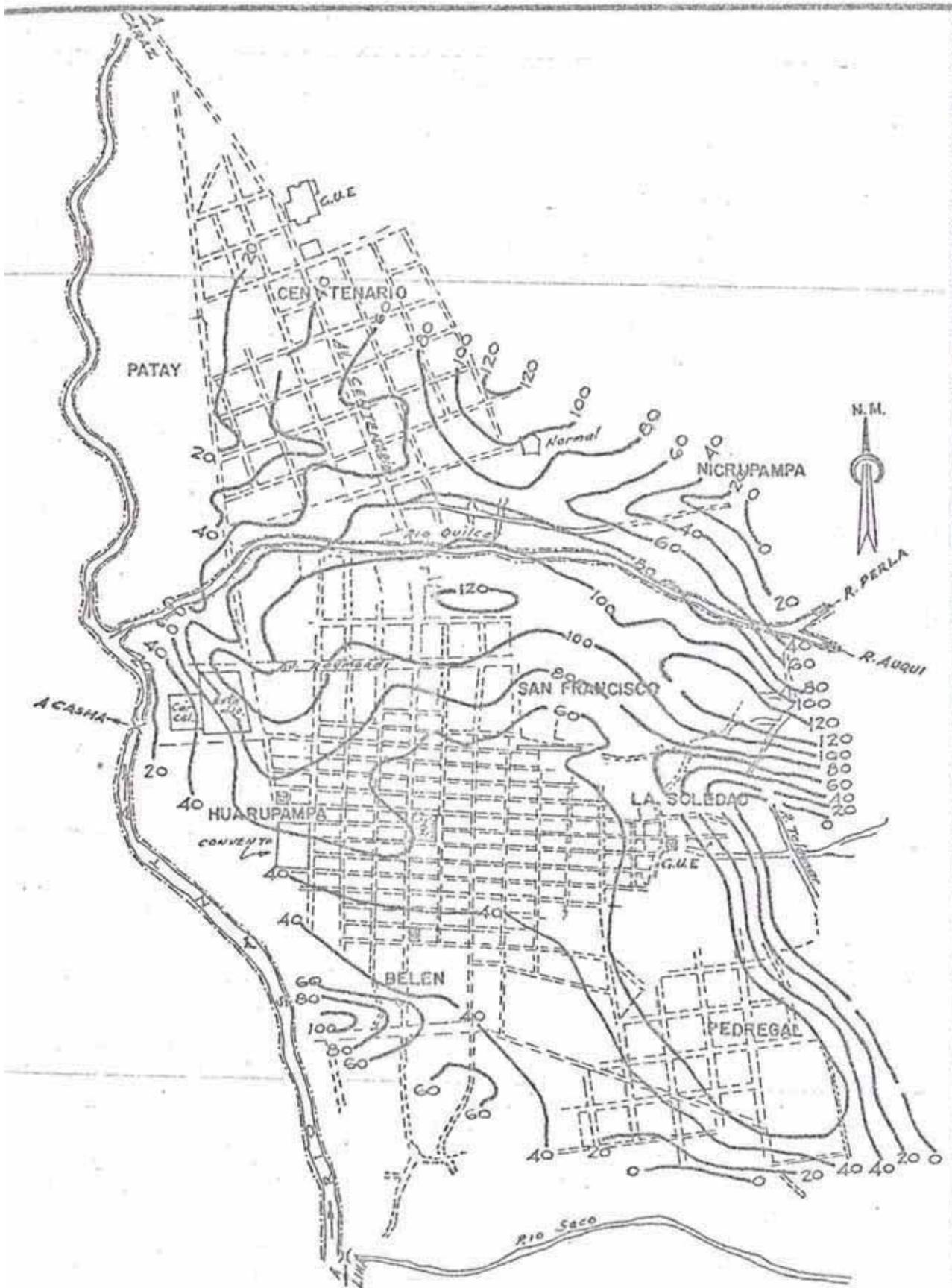
2.33. GRAVIMETRIA

Estos estudios fueron planeados y ejecutados para proporcionar información acerca de la topografía del basamento rocoso a la que suprayacen los depósitos sedimentarios recientes sobre los cuales se desarrolla la ciudad.

De esta manera es posible obtener una aproximación de las variaciones de la potencia de los rellenos sedimentarios para así poder conseguir la correlación de las características del sub-suelo y los efectos sísmicos en la superficie.

Este método se basa en la medida de las variaciones de la atracción gravitatoria, que son funciones de los cambios de la densidad de los materiales infra yacentes.

La diferencia de densidad entre los materiales depositados recientemente y el basamento rocoso motiva anomalías gravitacionales las cuales son interpretadas con la ayuda de los estudios Geológicos del área de la ciudad y sus alrededores y el Principio de la Teoría del Potencial; luego se efectúa el modelaje ma



PROFUNDIDADES DEL BASAMENTO ROCOSO

Fuente : D.I.G. CRYRZA

temático correspondiente, obteniéndose la tonografía del basamento y de ahí la potencia aproximada de los sedimentos.

Para los fines que se persiguen en nuestro estudio los valores anteriormente mencionados son solo aproximados, pues para hallarlos con precisión se requiere de sondajes profundos para poder ajustar los cálculos gravimétricos este último no se ha podido realizar debido al elevado costo que ello implicaba.

En la página 60 se muestran los valores de la potencia del relleno, resultado de estos estudios.

Como se vé, la ciudad se asienta sobre un relleno cuya potencia varía desde 20 hasta 120 mts. siendo las de mayor espesor las zonas del Barrio San Francisco, cercanas al río Quilcay y las de menor espesor las zonas cercanas a los cerros que circundan la ciudad ó sea las llamadas zonas de contacto.

CAPITULO III

ESTUDIO DE LA AMPLIFICACION DE LOS SUELOS

3.10 GENERALIDADES

La selección de un diseño sísmico se basa en la regionalización ó zonificación sísmica la cual tiene por objetivo la división de un territorio en áreas de diferente riesgo sísmico ó en otras palabras con diferente frecuencia de repetición promedio de los sismos de una magnitud ó de una intensidad dada.

Se define como Microzonificación al concepto de zonificación aplicado a áreas pequeñas y cuyo objetivo final es la división de un determinado territorio en microzonas de características sísmicas diferentes una de otra y semejantes ú homólogas dentro de cada una de ellas y por lo tanto con diferentes requerimientos para el diseño de estructuras.

Dentro de los métodos de Microzonificación tenemos : el de la Amplificación de los Suelos, el de las Microtrepidaciones y el método Soviético.

A continuación se darán breves referencias acerca de los dos últimos métodos mencionados, para luego ocuparnos en detalle del primero.

11 METODO DE LAS MICROTREPIDACIONES

Se basa en medir las amplitudes y períodos de las mismas los cuales permiten ubicar a los suelos dentro de una clasificación pre-establecida, este método fue propuesto por K.Kanai, T.Tanaka, y K.Osada(20).

En este método es conveniente clasificar los suelos usando los períodos mayores y el período medio, porque la otra manera de hacerlo dá resultados variables debido a que depende de los períodos predominantes y de las mayores amplitudes, siendo estas últimas variables no solo con el tiempo sino también debido a circunstancias artificiales.

3.12 METODO SOVIETICO

Fué presentado por S.V.Medvedev (19) y relaciona el incremento de intensidad sísmica con respecto a la superficie, así se tiene que :

$$\Delta n = 1.67 \log. \left(\frac{V_{p_0} \rho_0}{V_{p_n} \rho_n} \right) \Delta n_b$$

donde: Δn , es el incremento total de intensidad sísmica MSK V_{p_0} , ρ_0 y V_{p_n} , ρ_n , son respectivamente la velocidad de propagación de las ondas p y la

densidad de la roca y del suelo.

Δmb , es el incremento de intensidad sísmica MSK debido a la posición del nivel freático.

MÉTODO DE LA AMPLIFICACION DE LAS ONDAS SISMICAS

En este método se idealiza el suelo superficial como un sistema de estratos los cuales se apoyan sobre la roca fundamental, cada estrato queda definido por las constantes características siguientes: potencia ó espesor (h), densidad (ρ), desplazamiento (U), coeficiente de viscosidad (ξ), velocidad de las ondas de corte (V_s) y módulo de rigidez (μ).

El conjunto de estratos y la roca fundamental constituyen el modelo dinámico del sub-suelo de cada lugar, el cual permite el estudio de la amplificación selectiva de movimientos sísmicos debido a la reflexión múltiple de las ondas en las fronteras de los diferentes estratos.

El modelo dinámico puede estar constituido por igual o menor número de estratos que los establecidos por

el sondaje que se haga en la medida en que sea posible asimilar estratos adyacentes que posean densida-

Diversos autores han propuesto métodos de análisis de las respuestas del suelo a movimientos desarrollados en la roca fundamental, todos ellos se pueden reunir en dos grandes grupos los cuales son :

El método de la solución continua.

El método de las masas discretas.

-
ambas poseen las siguientes características comunes

- a) Se basan en la teoría unidimensional.
- b) Consideran al suelo como un material viscoelástico.
- c) Consideran movimientos horizontales con las ondas "S" propagándose verticalmente.
- d) Usan la viscosidad para representar el amortiguamiento.
- e) Consideran que la velocidad de las ondas de corte y el amortiguamiento varían de acuerdo al

nivel de deformación.

diferenciándose tan solo en que el primero considera al suelo como un medio continuo y resuelve la ecuación de propagación de la onda y el segundo considera al suelo como un sistema de masas discretas unidas (procedimiento similar al realizado en el análisis sísmico de edificaciones); además según Posset (17) ambos métodos dan los mismos resultados cuando los parámetros del suelo son dados convenientemente y que conforme crece el número de estratos el método discreto tiende al continuo. A continuación trataremos brevemente algunos de los métodos de análisis propuestos.

1) Método de K. Kanai

Considera al suelo como un medio continuo y resuelve la ecuación de propagación de la onda; Kanai (5, 14, y 16) experimentó la relación entre la amplitud del movimiento sísmico y la naturaleza del lecho superficial considerando espesor, den-

sidad, rigidez y velocidad como los parametros que controlan las características dinámicas de los suelos, partiendo del hecho de que el fenómeno de la amplificación es un problema de multireflexión de ondas.

Así cuando ondas distorsionales planas se propagan verticalmente hacia arriba, a través de una capa viscoelástica estratificada la cual se encuentra sobre un cuerpo viscoelástico semi-infinito, una parte se ~~transmite~~ y otra se refleja en las interfases y en la superficie libre ocurre una reflexión total.

Llamando ρ, ν, ϵ, H ; a la densidad, rigidez, velocidad, coeficiente de viscosidad sólida y espesor del estrato y U al desplazamiento, la ecuación de movimiento de cada medio puede ser escrito como :

$$\rho_n \frac{\partial^2 U_n}{\partial t^2} = \left(\nu_n + \epsilon_n \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial^2 U_n}{\partial z^2}$$

$n = [1, 2]$

Si las ondas incidentes en el medio inferior son del tipo :

$$U_0 = a e^{i(\rho t + f_2 z)}$$

Los desplazamientos en cada medio son :

$$U_2 = a e^{i(\rho t + f_2 z)} + A e^{i(\rho t - f_2 z)}$$

$$U_1 = B e^{i(\rho t + f_1 z)} + C e^{i(\rho t - f_1 z)}$$

donde A, B y C son constantes determinadas por condiciones de frontera, tales como :

- Igualdad de desplazamiento en la interfase.
- Igualdad de esfuerzos en la interfase (continuidad)
- Esfuerzo nulo en la superficie libre.

y f_1 y f_2 son dadas por :

$$f_1^2 = \frac{\rho_1 P^2}{u_1 + i \epsilon_1 P} \quad ; \quad f_2^2 = \frac{\rho_2 P^2}{u_2 + i \epsilon_2 P}$$

$$p = \frac{2\pi}{T} \quad ; \quad T = \text{período de las ondas}$$

Aplicando estas condiciones se obtiene :

$$\frac{|U_1|}{2|U_0|} = \frac{1}{\sqrt{\phi_1^2 + \phi_2^2}}$$

despreciando al amortiguamiento en la roca esto es :

$$\epsilon_2 \frac{P}{u_2} \simeq 0$$

Se tiene que :

$$\phi_1 = \cos P \cosh Q + \alpha (R \cos P \sinh Q - S \sin P \cosh Q)$$

$$\phi_2 = \sin P \sinh Q + \alpha (R \sin P \cosh Q + S \cos P \sinh Q)$$

donde :

$$P = \frac{\pi T_0}{2 T} \quad M \cos N$$

$$Q = \frac{\pi T_0}{2 T} \quad M \sin N$$

$$R = M \left(\cos N + \frac{\tau}{T} \sin N \right)$$

$$S = M \left(\frac{\tau}{T} \cos N - \sin N \right)$$

$$\alpha = \frac{\rho_1 v_1}{\rho_2 v_2}$$

$$T_0 = \frac{4 H_1}{v_1}$$

$$M = \left(1 + \left(\frac{\tau}{T} \right)^2 \right)^{-1/4}$$

$$N = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\tau}{T} \right)$$

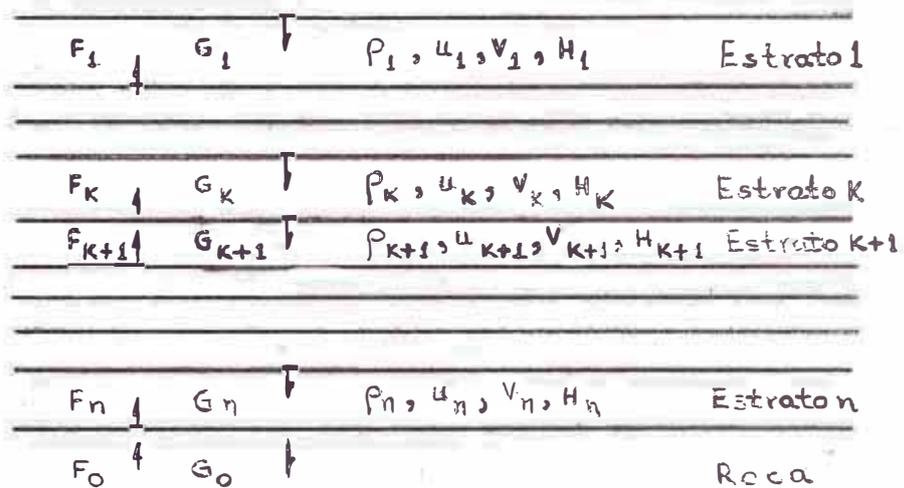
$$\tau = \frac{2 \pi \epsilon_1}{u_1}$$

Una limitación de este método es que ha sido desarrollado considerando sismos de magnitud 6 como máximo y bajo el punto de vista de que el comportamiento del suelo es lineal, esto es que sus propiedades están en el rango elástico; lo cual como es conocido, no se ajusta a la realidad para el caso de sismos de magnitudes mayores, donde el comportamiento del suelo es no lineal.

En la actualidad esta limitación es superada introduciendo factores de corrección que hacen que la respuesta del suelo a la excitación sísmica disminuya en valor aproximadamente un 20%.

2) Método de Kobayashi ó del sismo actuante

Se basa en la reflexión múltiple de ondas, es un análisis numérico de la respuesta de suelos multiestratificados provocados por un sismo, bajo la condición de propagación de ondas de corte y considera que cada estrato es paralelo y horizontal.



donde: $\rho_1, u_1, v_1, H_1, \dots, \rho_n, u_n, v_n, H_n$ son : la densidad, rigidez, velocidad y espesor del primer y enésimo estrato; de igual manera: U_1, U_n son los desplazamientos del primer y del enésimo estrato.

La ecuación de propagación de las ondas de corte será :

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = \left(\frac{u}{\rho}\right) \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}$$

Su solución está dada por :

$$U = F_1 \left(T - \frac{X}{V}\right) + F_2 \left(T + \frac{X}{V}\right)$$

donde : $v = \sqrt{\frac{u}{\rho}}$

El desplazamiento de un estrato, sea este al primero y segundo estrato, vendrá dado por :

$$U_1 = F_1 + G_1$$

$$U_2 = F_2 + G_2$$

donde : F_1 y G_1 , F_2 y G_2 , son las ondas dirigidas hacia arriba y hacia abajo en los estratos respectivos.

- La relación de ondas en la frontera de estratos viene dado por :

$$F_2 = \frac{2}{1+\alpha} F_1 + \frac{\alpha-1}{\alpha+1} G_2$$

$$G_1 = \frac{1-\alpha}{1+\alpha} F_1 + \frac{2\alpha}{1+\alpha} G_2$$

donde :

$$\alpha = \frac{V_2 \rho_2}{V_1 \rho_1} = \text{impedancia sísmica}$$

Haciendo :

$$\gamma = \frac{2}{1+\alpha}$$

$$\beta' = \frac{\alpha-1}{\alpha+1}$$

$$\beta = \frac{1-\alpha}{1+\alpha}$$

$$\gamma' = \frac{2\alpha}{1+\alpha}$$

Reemplazando en la ecuación anterior

$$F_2 = \gamma F_1 + \beta' G_2$$

$$G_1 = \beta F_1 + \gamma' G_2$$

Para el estrato K el valor respectivo de F_k para un tiempo T cualquiera y tomando en cuenta los parametros proporcionados por los estratos superiores e inferiores,

viene dado por :

$$F_k(T) = \gamma_k F_{k+1} \left(T - \frac{H_{k+1}}{V_{k+1}} \right) + \beta'_k G_k \left(T - \frac{H_k}{V_k} \right)$$

En forma análoga :

$$G_{k+1}(T) = \beta_k F_{k+1} \left(T - \frac{H_{k+1}}{V_{k+1}} \right) + \gamma'_k G_k \left(T - \frac{H_k}{V_k} \right)$$

Se observa que, el parametro fundamental que controla los coeficientes de transmisión y de reflexión es la impedancia sísmica entre los lechos.

El cálculo consiste en determinar paso a paso los valores de F_k y G_k . En el caso de que F_k y G_k sean aceleraciones, la ecuación no cambia y en este caso la onda incidente será de aceleraciones.

La dificultad de usar este método es la necesidad de conocer detalladamente las propiedades de los estratos y tener un acelerograma tipo como señal que se pueda aplicar en el límite del basamento al suelo.

3) Método de Bolton Seed

Considera la confección de un acelerograma sintético a partir de un acelerograma tipo obtenido en la roca de basamento, sino lo hubiera se considera aceptable un acelerograma obtenido en cualquier tipo de suelo.

La metodología a seguir es en breves términos como sigue :
Primero se calculan las características del sismo probable en el área de interés, luego se busca un acelerograma que tenga el mismo período de sismo probable y se encuentra la razón de la aceleración máxima de ambos sismos, procediéndose luego a escalar el sismograma tipo; el sismograma resultante puede ser un acelerograma representativo para la roca.

Sino se dispusiera de un acelerograma con el mismo período predominante del sismo probable, se busca el que tenga el más aproximado y se procede a escalar tanto razones de aceleración como períodos.

3.20 SELECCION DEL METODO

3.21 GENERALIDADES

Debido a los altos costos para Mecánica de Suelos y Análisis de laboratorio que implicaba la elaboración de modelos dinámicos del suelo conforme a lo anteriormente expuesto es que con motivo del terremoto del 31 de mayo de 1970, se planteó el estudio de la amplificación de las ondas sísmicas en los suelos de la ciudad de Huaráz, aplicando la metodología que a continuación se describe :

Por estudios realizados por Kanai (16) en los lugares correspondientes a la Mina Hitachi y a Tokai-Mura, en el Japón, se ha establecido por comparación de los resultados observados (realizando análisis espectrales de sismogramas obtenidos sobre y debajo de la superficie del suelo) con los resultados teóricos que :

- 1) La amplitud sobre la superficie del suelo crece grandemente de acuerdo a la reflexión múltiple de las ondas sísmicas en los estratos superficiales.
- 2) Exceptuando el caso de períodos considerablemente cortos, a los períodos más cortos corresponden aceleraciones espectrales más grandes bajo la superficie del suelo (300 mts. de profundidad).
- 3) Las curvas de la relación entre la razón de amplitud sobre el suelo y debajo de aquel y el período, crece considerablemente para el período predominante del lugar y lo que es más importante pues es la base del método seguido, estas curvas son similares a las curvas teóricas razón de amplitud-período de un cuerpo que posee un solo estrato superficial. La curva teórica puede hacerse coincidir mayor mente con la curva de observaciones, ajustando conveniente-

mente los valores de impedancia sísmica (α) y factor de amortiguamiento (γ).

3.22 AJUSTE DE LAS CURVAS OBSERVADAS Y CALCULADAS

La relación desarrollada por Kanai para la propagación de ondas de corte en un solo estrato es como ya se mencionó en el Artículo 3.13.1 :

$$\frac{U}{U_0} = \frac{2}{\sqrt{\phi_1^2 + \phi_2^2}} \quad 1$$

La relación U/U_0 es la que se denomina función de transferencia para un período determinado.

Escribiendo la siguiente relación :

$$UO_i = UC_i + \Delta UC_i \quad 2$$

en la cual :

UO_i = función de transferencia observada para el período i
($i = 1, 2, 3, \dots, n$)

UC_i = función de transferencia calculada para el mismo período.

ΔUC_i = error de ajuste

Como para realizar la coincidencia de las curvas es necesario variar los valores de α y γ , por el teorema de los incrementos finitos se tiene que :

$$\Delta UC_i = \frac{\partial UC_i}{\partial \alpha} + \frac{\partial UC_i}{\partial \tau} \dots \dots \dots 3$$

empleando para el ajuste el método de los mínimos cuadrados y combinando las relaciones 2 y 3 se tiene :

$$S = \sum_{i=1}^n (UO_i - UC_i - \frac{\partial UC_i}{\partial \alpha} - \frac{\partial UC_i}{\partial \tau})^2$$

Debido a que esta suma debe hacerse mínima, para que el sistema sea resoluble se requiere que el número de ecuaciones sea mayor que el de incógnitas; en el presente caso el número de incógnitas es igual a dos y el de ecuaciones es mucho mayor.

Sobre este procedimiento, el Ing° E. Deza ha desarrollado un programa en lenguaje Fortran IV para computadora 360-40, el cual ha sido empleado en el presente trabajo. A este programa se le dan valores probables de α y τ los cuales son computados hallándose la raíz media cuadrática, entre los valores observados y los calculados luego el programa prosigue ajustando los valores de α y τ y realizando los computos hasta obtener el ajuste por mínimos cuadrados con lo cual se obtienen los valores característicos de impedancia sísmica y de factor de amortiguamiento del suelo estudiado.

3.30 PERIODO PREDOMINANTE DE LOS SUELOS

Por estudios observacionales (13) puede decirse estadísticamente que el período predominante del movimiento sísmico puede presumirse como el máximo período frecuente de las microtrepidaciones de los respectivos lugares, desde que análisis de registros de microtrepidaciones y de sismos en un mismo lugar muestran curvas, frecuencia-período bastante similares en forma, con el período para el pico de máxima frecuencia casi coincidentes.

Además de acuerdo a los estudios anteriormente citados se ha establecido que existen dos tipos de suelo. Esto es un tipo de suelo que tiene un período predominante y otro que tiene más de dos períodos predominantes, el primero está considerado como consistente de un solo estrato y el segundo como formado de varios estratos. Estudios teóricos sobre el problema de vibración de este último tipo de suelo muestran claramente que en general el espectro del movimiento sísmico no es tan grande como en el caso de un solo estrato debido a la reflexión y refracción de las ondas sísmicas en los diferentes límites las cuales se interfieren entre si. Sin embargo los períodos predominantes de un movimiento sísmico también pueden ser más ó menos similares a los valores de los máximos períodos frecuentes de las microtrepidaciones.

Por estudios realizados en Japón, Kanai (10) deduce que cuando la magnitud de un sismo es más grande que un cierto valor (en los casos estudiados esta magnitud oscila entre 3-6) en cualquier lugar, el período predominante toma un valor aproximadamente constante el cual es propiedad de cada lugar y cuando la magnitud del sismo es menor en valor el período predominante arriba mencionado se hace pequeño con el decremento de la magnitud.

En otras palabras cuando el período predominante en la roca (T_m) es mayor que el período predominante del suelo (T_o) el período correspondiente a la máxima aceleración de la superficie del suelo, coincide aproximadamente con T_o ; por otro lado cuando T_m es más pequeño que T_o , el período arriba mencionado se acerca a T_m el cual depende de la magnitud del sismo.

De otro lado por estudios realizados por Gutenberg y Richter (4) para el terremoto de California, para magnitudes en un rango de 5.5 a 6.5 y de Figueroa para magnitudes mayores que 7 se llega a las siguientes conclusiones entre otras :

- a) el período predominante en la roca para cualquier distancia incrementa con la magnitud.

b) dicho período incrementa también con la distancia epicentral.

De aquí es que se comprende la razón por la cual Ishimoto (12) encontró que un sismo de distancia epicentral pequeña produce aceleraciones más grandes en suelo firme que en suelos blandos mientras que para sismos de distancia epicentral grande, las aceleraciones llegan a ser más grandes sobre suelos blandos debido a que el período de las ondas sísmicas en la roca es cercano al período natural del estrato superficial produciéndose un efecto parecido al fenómeno de resonancia.

El hecho de que el período predominante del suelo, permanezca constante a partir de cierta magnitud, implica que exista similitud entre las curvas frecuencia-período de grandes terremotos y de las microtrepidaciones como ha sido mostrado por Kanai (3) en numerosos lugares, ya que siendo libre su vibración sus modos naturales de vibrar serán los mismos en terremotos y en microtrepidaciones.

En el caso de un solo estrato ha sido desarrollada la siguiente fórmula para el período natural.

$$T = \frac{4 H}{2n-1} \sqrt{\frac{\rho}{G}}$$

en la cual

T = período natural

H = espesor del estrato

ρ = densidad del estrato

G = rigidez

n = modo de vibración

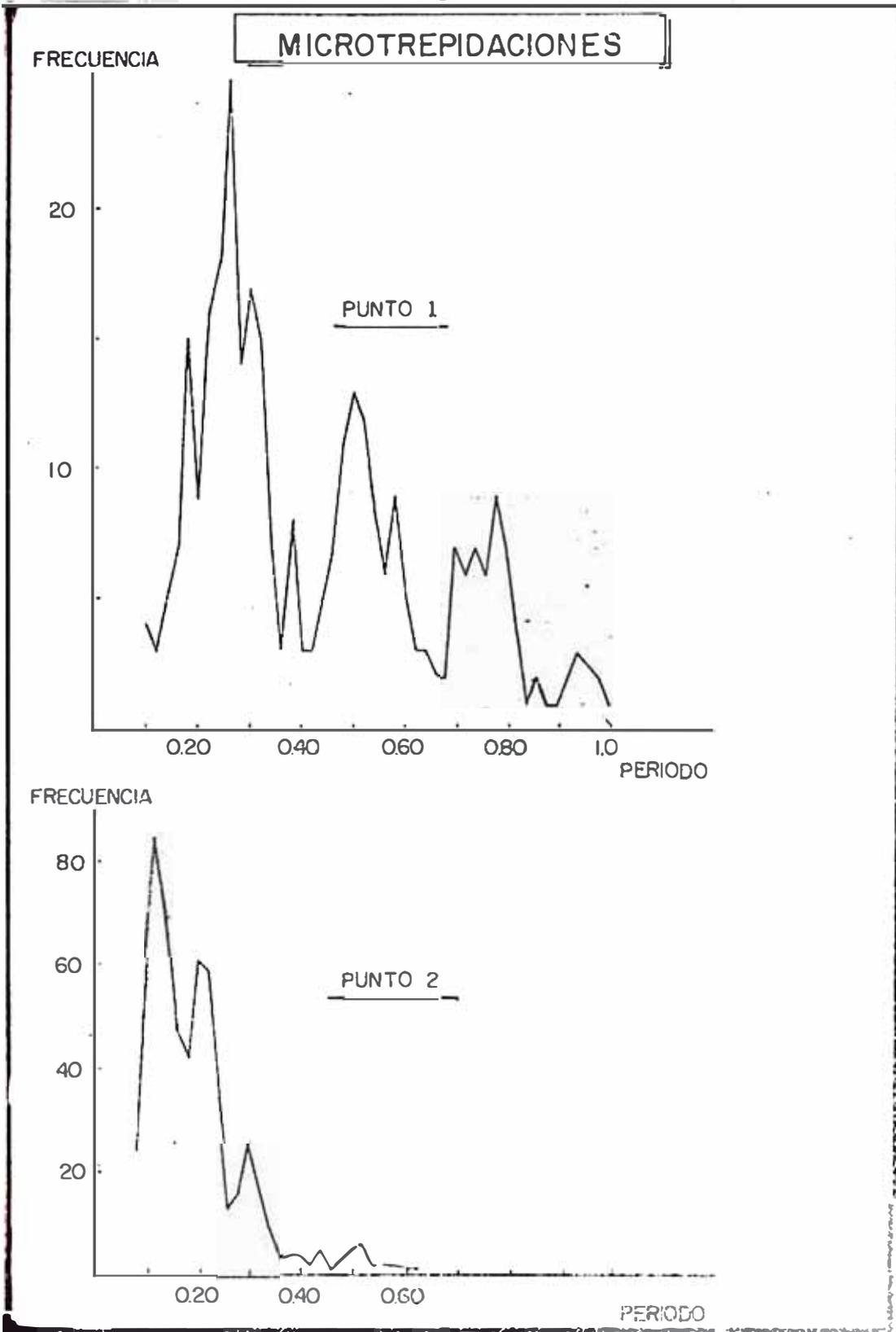
Considerando el modo fundamental ($n = 1$), Ibañez (3) encontró en el caso del terremoto del Centro (California) de 1940, que el valor del período dado por esta fórmula es aproximadamente igual a aquel para el cual el espectro del acelerograma muestra grandes picos.

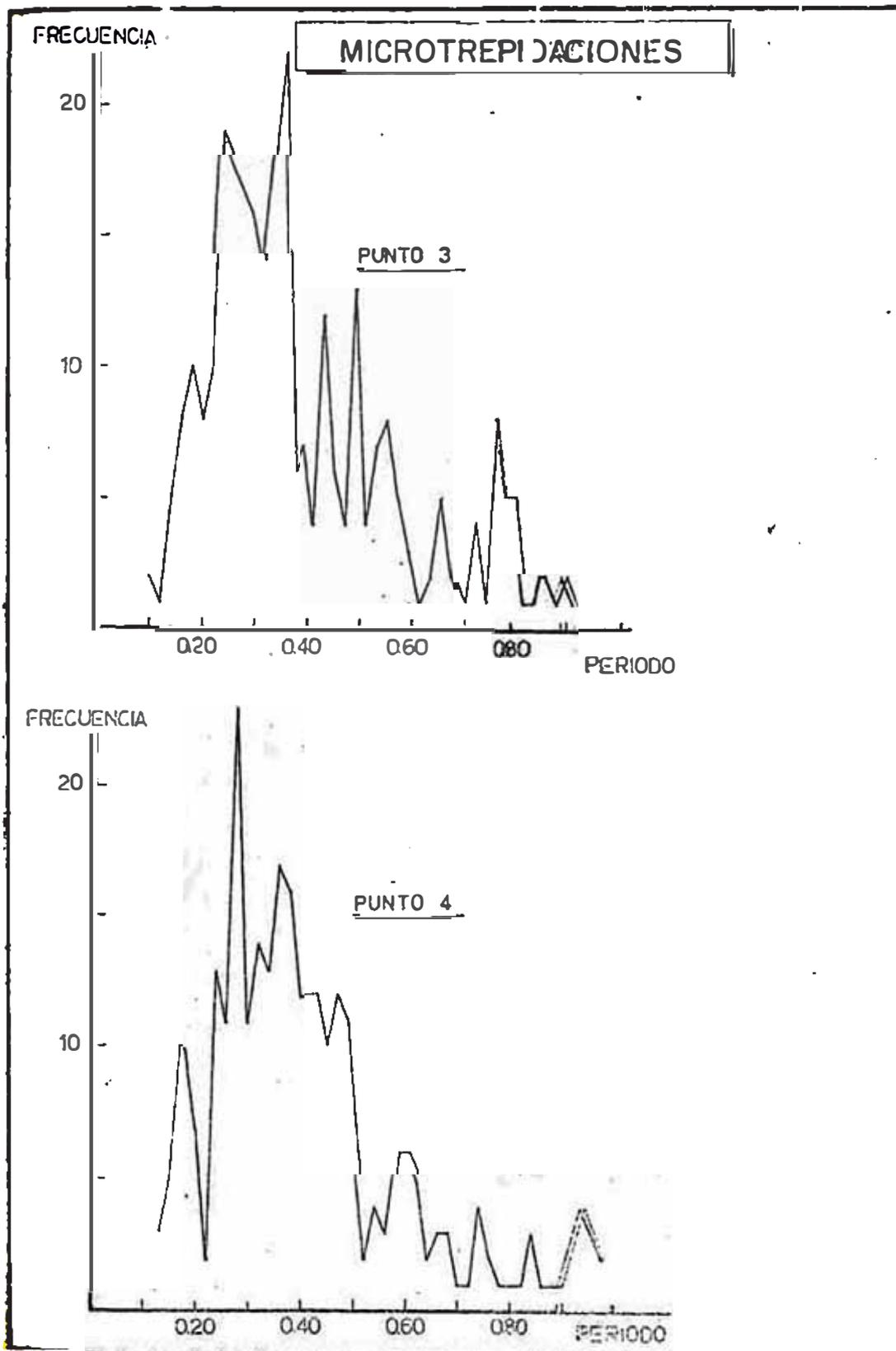
Para la ciudad de Huaráz los períodos predominantes se han obtenido con la ayuda de la información proporcionada por las microtrepidaciones, realizando el análisis de la siguiente manera: Se trazó una línea de base a lo largo y por el centro del tren de ondas, luego se proyectó sobre esta línea en forma perpendicular las marcas de tiempo y se procedió a contar el número de veces que en el intervalo de un segundo la onda cortaba la línea base, obteniéndose de esta manera el

número de ciclos en segundos, para luego calcular el período medio de vibración correspondiente a cada segundo.

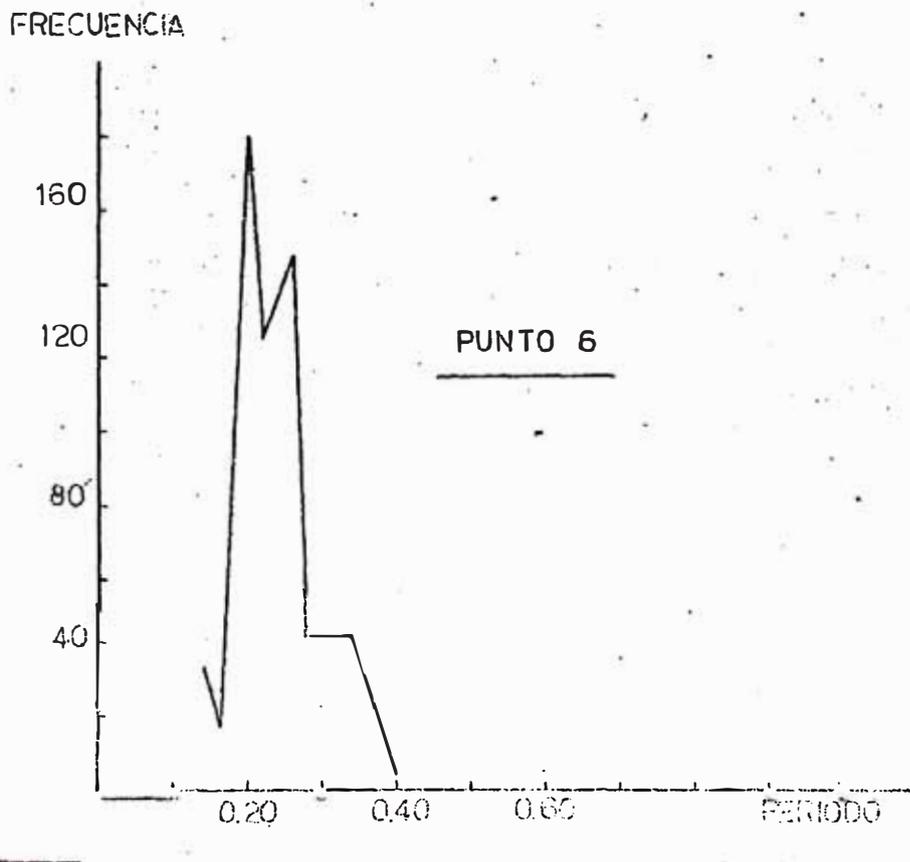
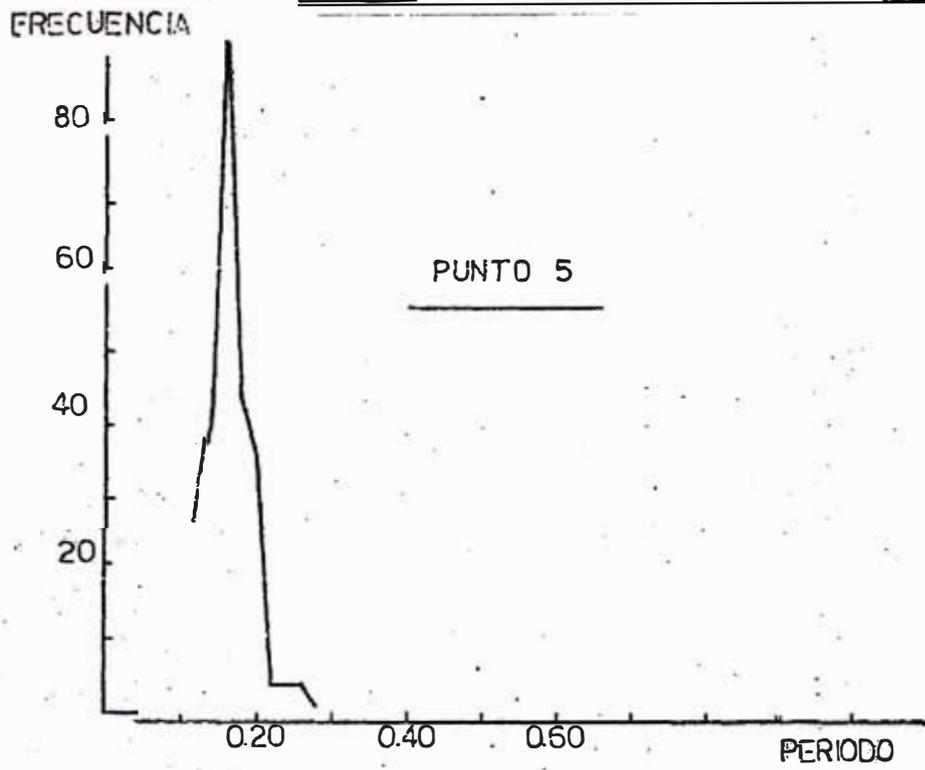
Con los períodos medios obtenidos se construyeron las curvas de frecuencia-período que se muestran en las páginas 82 a 89, de ellas se pueden deducir las siguientes conclusiones

- 1) El área presenta modos de vibración que van desde períodos cortos: 0.10 seg. hasta períodos largos del orden de 0.50 seg.
- 2) De las formas de estas curvas y de la presencia de sus picos, se puede inferir que los suelos se presentan estratificados en su mayor parte, presentando hasta tres lechos con propiedades físicas variables; con excepción de las correspondientes a los puntos 7 y Palmira que muestran un solo pico fundamental.
- 3) En general las amplificaciones que estos suelos introduzcan a un evento sísmico será más manifiesto para vibraciones cuyos períodos sean similares a los fundamentales, además se espera fenómenos de resonancia para los suelos que tengan períodos de 0.25 seg. cuando ocurran eventos sísmicos con magnitud igual o mayor que 6 que tengan epicentro cercano.



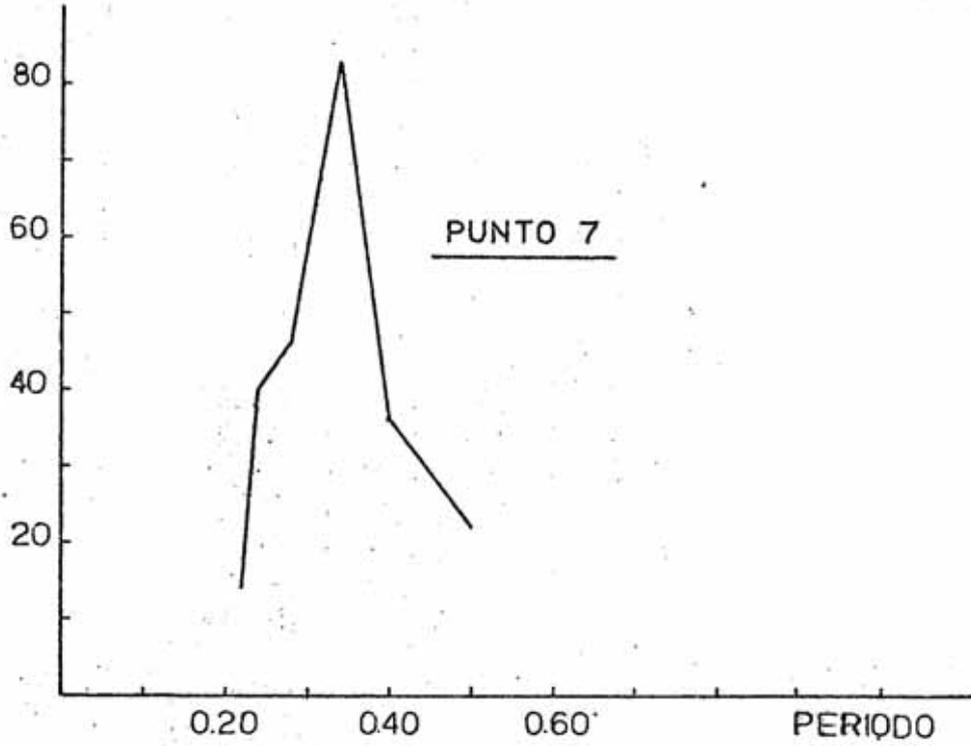


• MICROTREPIDACIONES

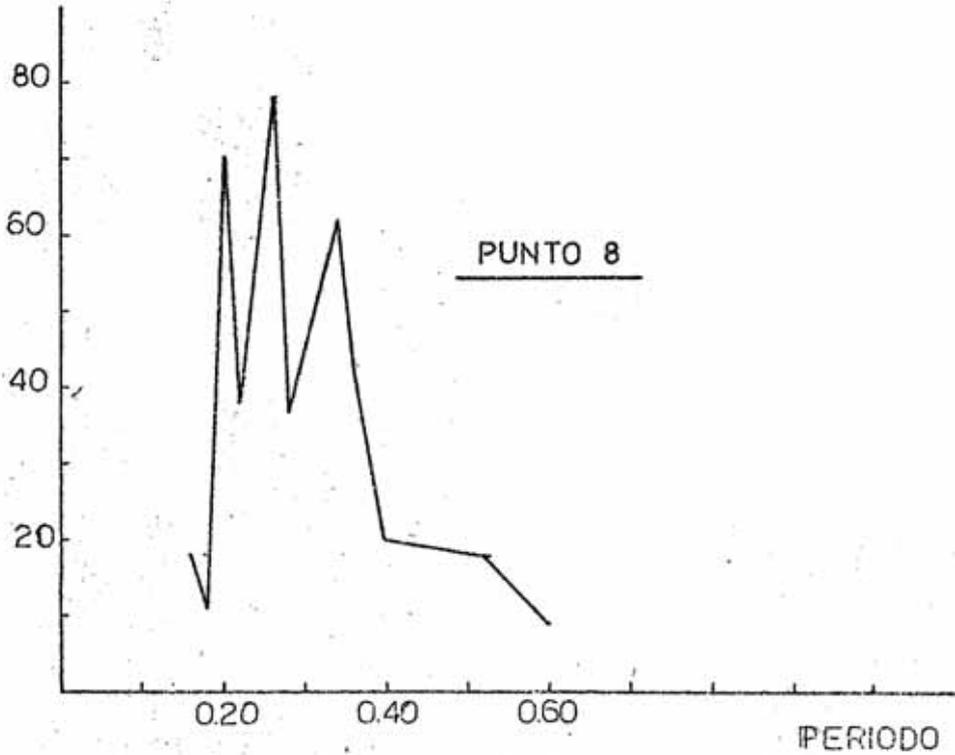


MICROTREPIDACIONES

FRECUENCIA

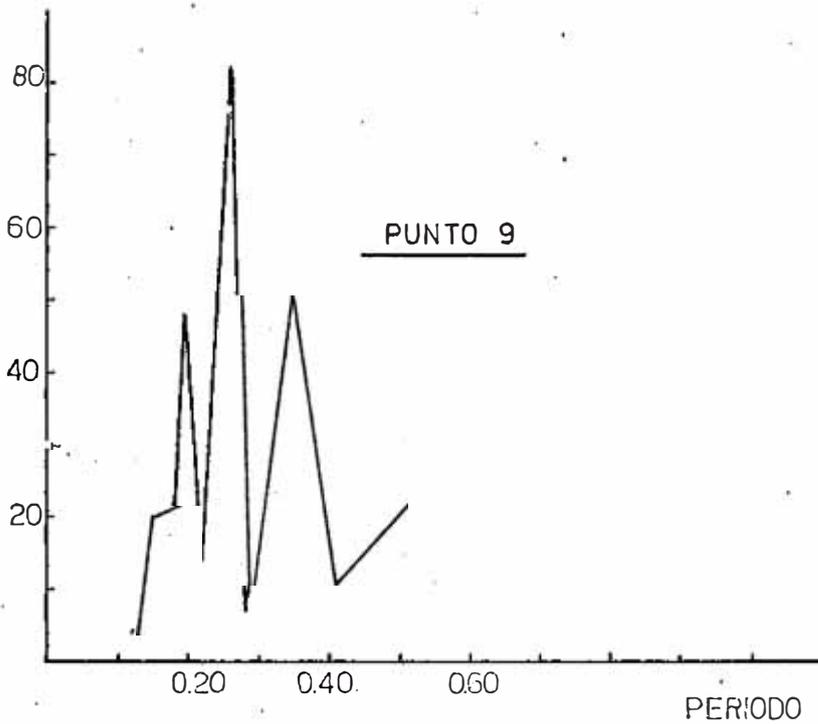


FRECUENCIA

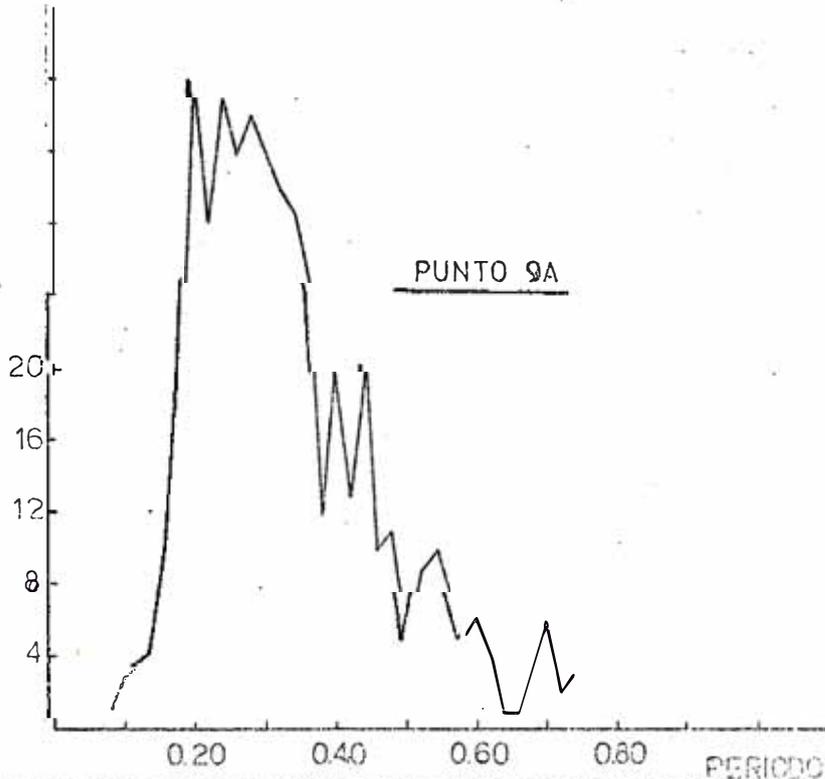


MICROTREPIDACIONES

FRECUENCIA



FRECUENCIA



FRECUENCIA

MICROTREPIDACIONES

80

60

40

20

PUNTO 10

0.20

0.40

0.60

0.80

PERIODO

FRECUENCIA

40

20

16

12

8

4

PUNTO 10-A

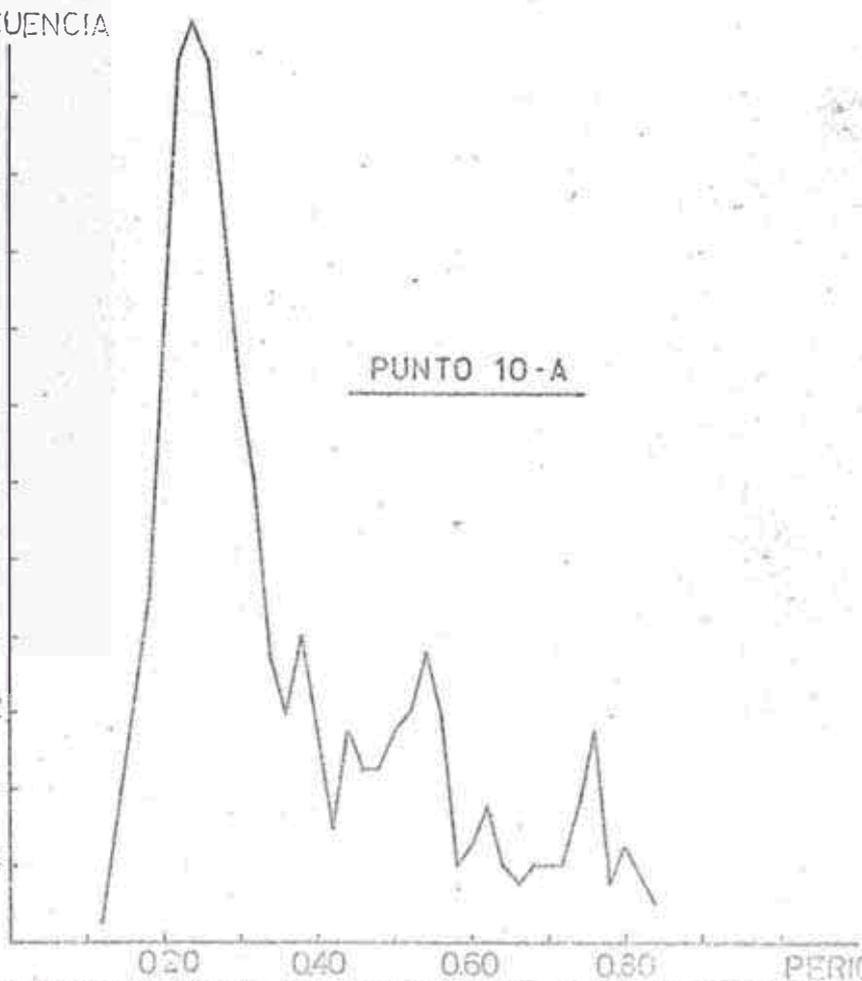
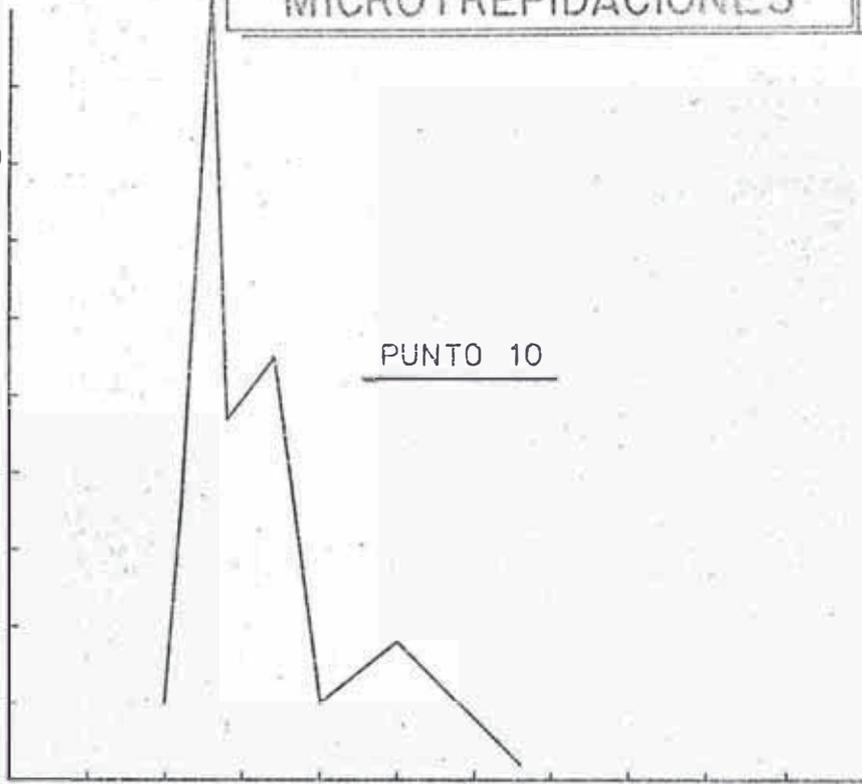
0.20

0.40

0.60

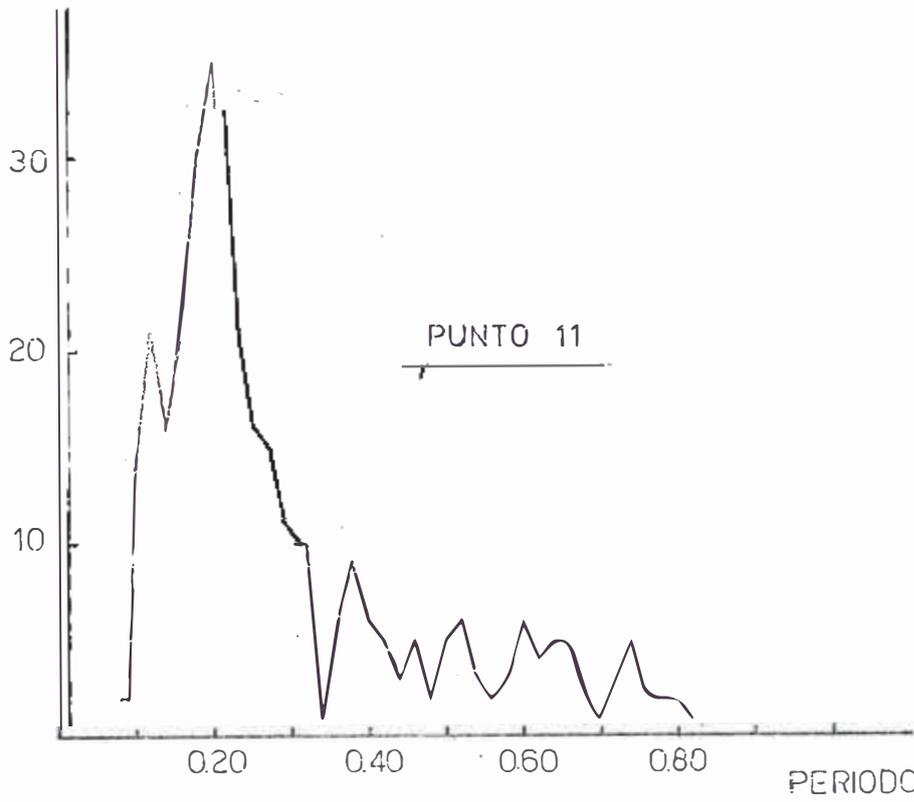
0.80

PERIODO

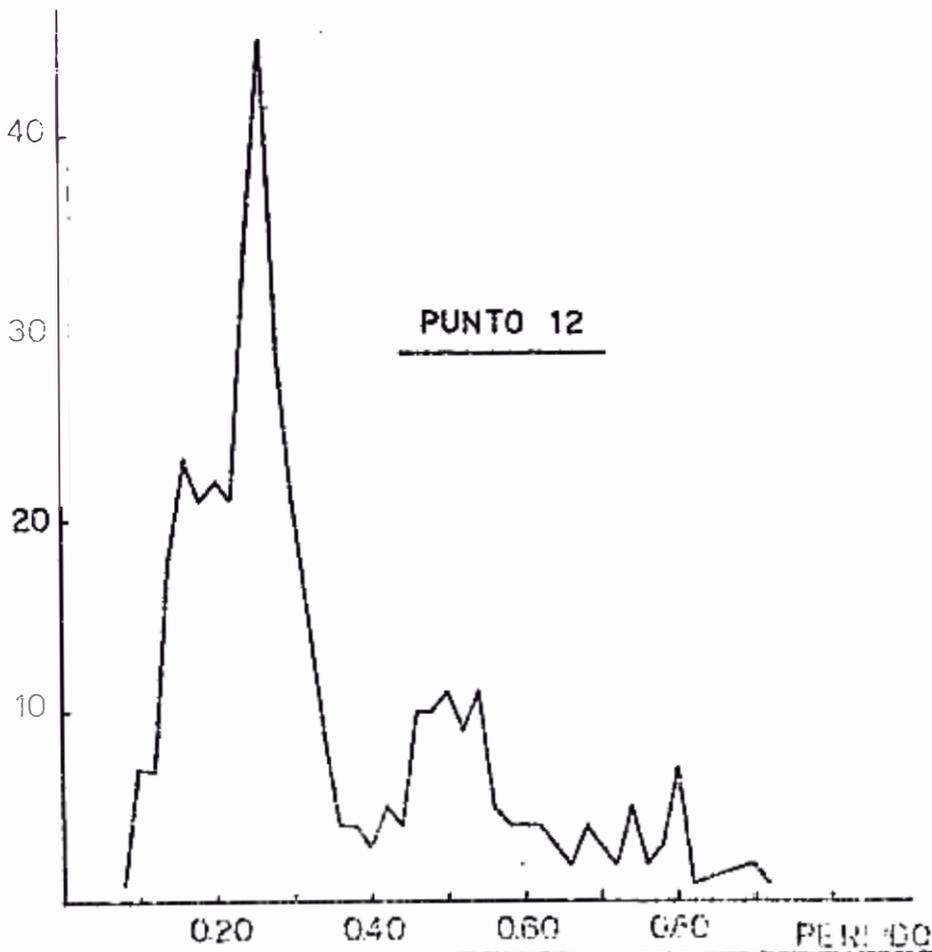


MICROTREPIDACIONES

FRECUENCIA

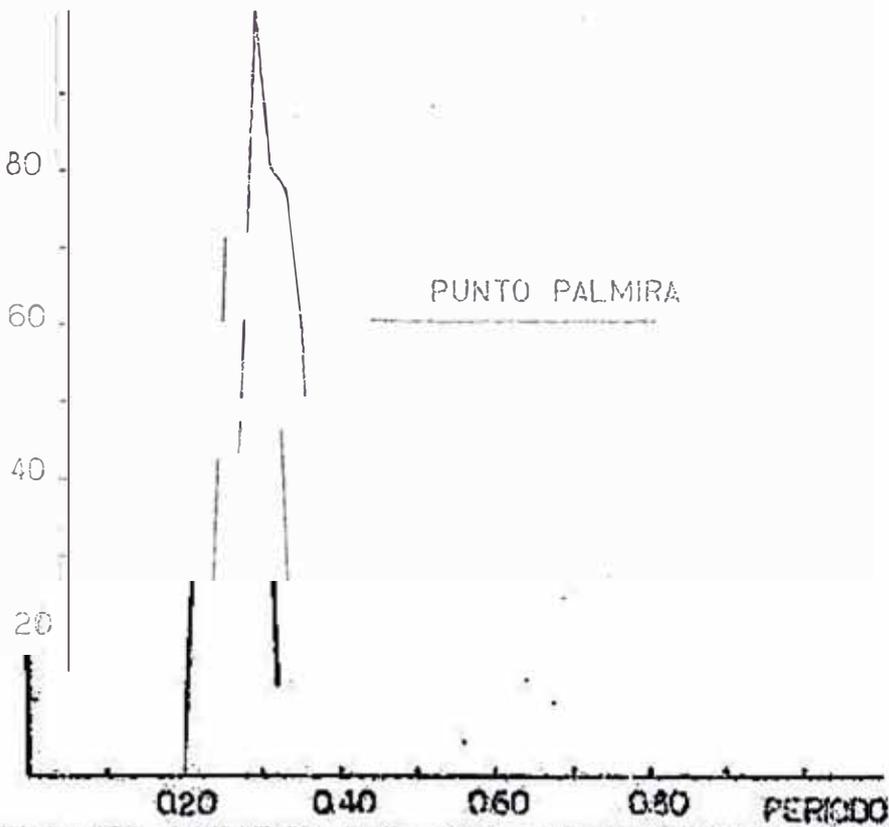
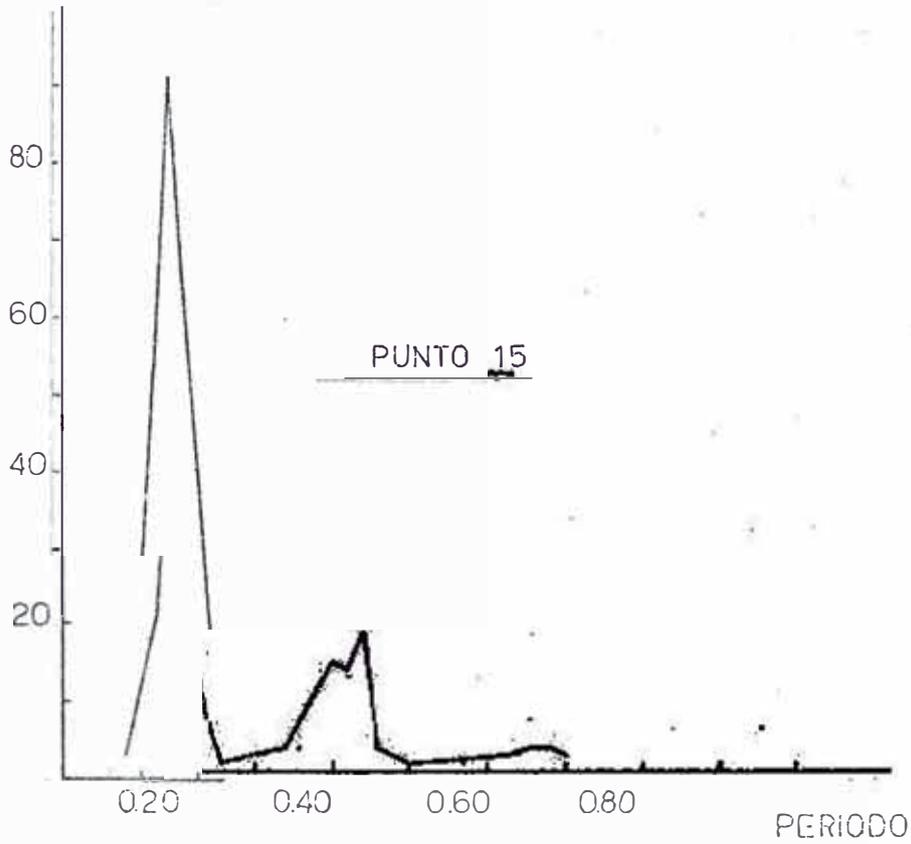


FRECUENCIA



MICROTREPIDACIONES

FRECUENCIA



3.40 RELACION AMPLITUD-PERIODO DE SISMOS

3.41 GENERALIDADES

La forma de las ondas de un registro sísmico obtenido sobre una estación puede ser escrita como sigue :

$$u(t, q) = O(T) \cdot Q(t, q) \cdot G(t, q)$$

Donde :

$Q(t)$ = características vibratorias del punto de origen.

$Q(t, q)$ = características vibratorias de la corteza terrestre.

$G(t, q)$ = características vibratorias del suelo

t = período de la onda

q = atenuación de la onda

Como se aprecia para estudiar analíticamente las características de las ondas incidentes, es conveniente el uso de sismogramas en los cuales el efecto de $G(t, q)$ sea despreciable, esto se consigue trabajando con sismogramas obtenidos directamente sobre roca. Al respecto Kanai, Osada y Yoshizawa (11 y 15) han realizado estudios tratando estadísticamente los resultados espectrales de un gran número de sismogramas obtenidos en las profundidades de la mina Hitachi (Japón), habiéndose obtenido la siguiente relación empírica

$$A_{ms} = 53 T_m^{2.56}$$

En la cual A_m y T_m representan respectivamente el máximo valor del desplazamiento espectral en un lugar a 100 kms. de distancia hipocentral, en micrones y el correspondiente período en segundos.

De igual manera, han determinado que la relación amplitud-período de las ondas sísmicas, exceptuando los períodos considerablemente cortos y los largos, puede ser asumida como :

$$\frac{2 \pi A}{T} = \text{velocidad} = \text{constante}$$

Ello debido a que, el espectro de velocidades en las condiciones anteriormente mencionadas, toma por lo general una forma considerablemente plana.

Respecto a la amplitud sobre el suelo superficial, es conocido que ésta es mucho mayor que la botenida sobre la roca misma, excepto para localidades muy cercanas a la falla y para sismos con magnitudes iguales ó superiores a 8.

En casos donde el período de las ondas sísmicas en la roca coincide con un pico en la curva frecuencia período sobre la superficie, el cual corresponde al período natural del estrato superficial, la amplitud en la superficie del suelo crece grandemente; pero cuando las ondas sucesivas de período coincidente son pocas el estrato superficial tiene poca influencia sobre la

amplitud en la superficie.

Por estudios realizados por Kanai (6) acerca de la propagación de ondas sísmicas en dos estratos, se conoce que la amplitud en la superficie del suelo llega a ser máxima cerca del período natural de los estratos. Excepciones ocurren cuando hay amortiguamiento y el estrato superficial es muy delgado.

3.42 CORRECCION POR INSTRUMENTACION

Como ya se mencionó en el Artículo 2.15, en la obtención de los registros sísmicos de la ciudad de Huaráz, la ganancia del amplificador del equipo se seleccionó de acuerdo al ruido sísmico de cada lugar, ello dió como resultado diferente magnificación de los movimientos reales del suelo y la roca. Con el propósito de uniformizar dichas magnificaciones es que se procedió a realizar la corrección por ganancia del amplificador, teniendo en cuenta que

$$U = \frac{A}{M} \times 1000 \quad \text{y} \quad U_0 = \frac{A_0}{M_0} \times 1000$$

Donde: U y U₀ son respectivamente el movimiento real del suelo y la roca.

A y A₀ son movimientos registrados sobre el suelo y la roca respectivamente (en mm)

M y M_0 son las magnificaciones de los movimientos antes mencionados y son iguales a

$$M = \frac{\text{Microvoltios (uV) de salida}}{\text{Microvoltios (uV) de entrada}}$$

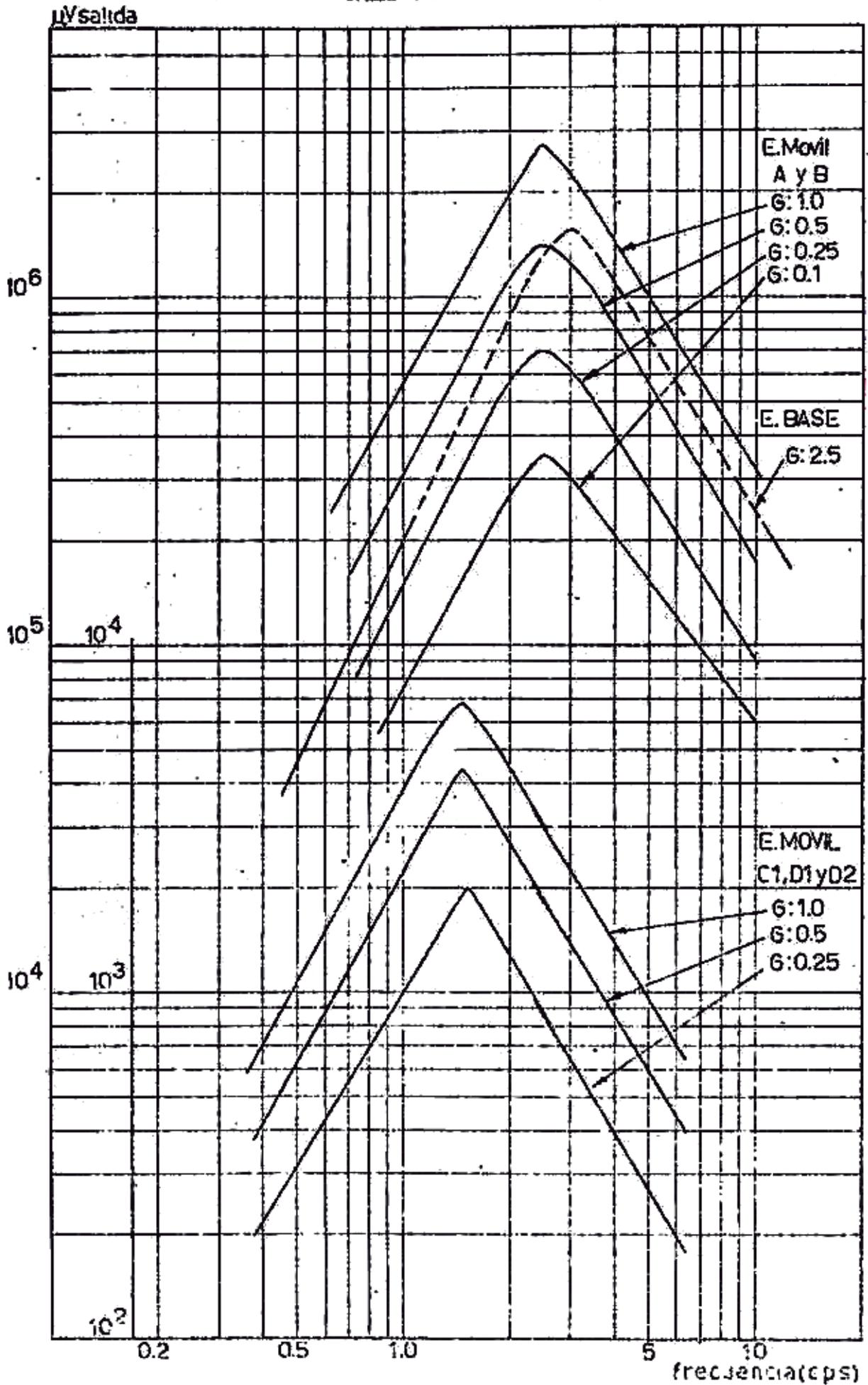
La corrección antes mencionada se realizó efectuando la calibración de los amplificadores por medio de la cual se obtuvieron los Microvoltios de salida para los diferentes ganancias utilizadas, variando las frecuencias desde 0.1 a 12 cps; en todos los casos los Microvoltios de entrada fueron iguales a 200. Las curvas obtenidas siguiendo este procedimiento se muestran en la página 94.

3.50 RAZON DE AMPLITUD OBSERVADA

La amplitud de las ondas superficiales es mucho mayor en terrenos aluviales que en la roca, Frank Newman (3) dice :

"Algunos investigadores han estimado que los desplazamientos en suelo aluvial son 30 veces los de la roca básica emergente en dicho lugar". En efecto la única limitación a su amplitud es la capacidad de deformación elástica del depósito y la magnitud de los desplazamientos del lecho rocoso. Ahora bien, en depósitos aluviales de gran espesor y blandos, la capacidad de deformación elástica es considerable y los desplazamientos en roca pueden ser también muy grandes, aunque la amplitud de sus vibraciones

CURVAS DE CALIBRACION DE LOS EQUIPOS



acusada por los registros instrumentales tomados en ella, sea pequeña.

Por otro lado, Gutenberg en 1957 y Thon and Bickel en 1966 (21) han demostrado que en algunos casos la magnificación de las amplitudes del movimiento sísmico en los suelos están en el rango de 4 a 5 veces ha aquella experimentada en roca.

De estudios realizados por Kanai (16) ha quedado establecido que a más pequeña razón de amplitudes corresponde períodos de sismos más pequeños.

Considerando la notación empleada anteriormente, se tiene que:

$$\frac{U}{U_0} = \frac{A \times 1000 / \left(\frac{\text{uV salida}}{\text{uV entrada}} \right)}{A_0 \times 1000 / \left(\frac{\text{uV salida}}{\text{uV entrada}} \right)}$$

Si consideramos que los uV de entrada en la calibración de los amplificadores fueran los mismos tanto para los equipos instalados en suelo como en roca, tendremos que :

$$\frac{U}{U_0} = \frac{A}{A_0} \times \left(\frac{\text{uV salida}}{\text{uV salida}} \right) = \frac{A}{A_0} \times K$$

Donde K es un factor que depende de la ganancia de los amplificadores instalados en la roca y en el suelo; y de los filtros

respectivos.

En las páginas 99 a 102 se muestran los gráficos de las razones de amplitud observadas en los lugares seleccionados para el estudio de la ciudad de Huaráz.

3.60 CONSTANTES CARACTERISTICAS DEL SUELO

Se llaman así a los valores de : impedancia sísmica y factor de amortiguamiento, que como ya se explicó en 3.13-1 están definidos por :

$$\alpha = \frac{V_1 \rho_1}{V_2 \rho_2}$$
$$\tau = \frac{2 \pi E_1}{u_1}$$

Valores de estas constantes han sido estimadas por Kanai (16), para varios casos estudiados en el Japón, así se tiene que :

1) En el caso de la mina Hitachi se adoptó :

$V_1 = 132$ m/sde mediciones

$T_0 = 0.18$ seg.Obtenido de micro-trepidaciones.

$V_2 = 1730$ m/s Asumiendo la velocidad de las ondas P

$V_p = 3000$ m/s y la relación de Poisson = $1/4$

$$\rho_1 = \rho_2 \dots\dots\dots \text{Igualdad de densidades}$$

Entonces : $\alpha = 1/13$ y $\zeta = 0.034$

2) En el caso del lugar A en Tokai-Mura se adoptó :

$T_0 = 0.27$ seg. $\dots\dots\dots$ de microtrepidaciones

$H_1 = 7.55$ m. $\dots\dots\dots$ espesor del estrato de arena

$$V_1 = 4 H/T_0 = 112 \text{ m/s}$$

$V_2 = 920$ m/s $\dots\dots\dots$ Asumiendo $V_p = 1600$ m/s
y la relación de Poisson
 $= 1/4$

$$\rho_1 = \rho_2 \dots\dots\dots \text{Igualdad de densidades}$$

Entonces :

$$\alpha = 0.121 \quad \text{y} \quad \zeta = 0.020$$

3) En el caso del lugar B en Tokai - Mura :

$T_0 = 0.24$ seg. $\dots\dots\dots$ de microtrepidaciones

$H = 7$ m $\dots\dots\dots$ espesor del estrato de arena

$$V_1 = 4 \frac{H}{T_0} = 117 \text{ m/s}$$

$V_2 = 920$ m/s $\dots\dots\dots$ similar al caso 2

$$\rho_1 = \rho_2 \dots\dots\dots \text{Igualdad de densidades}$$

Entonces :

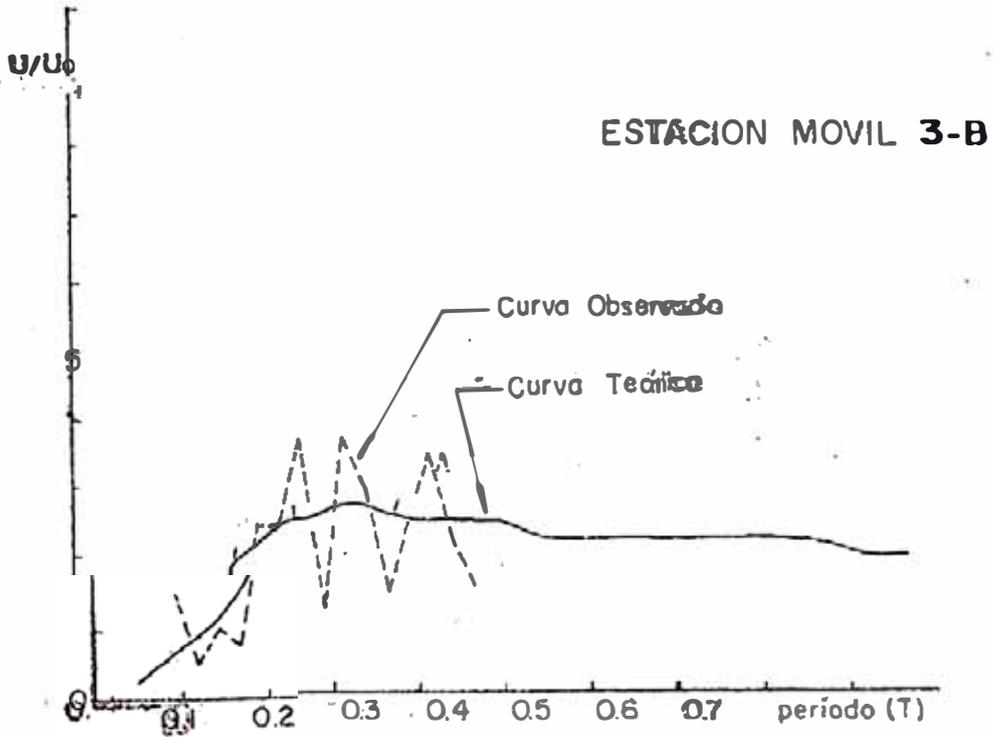
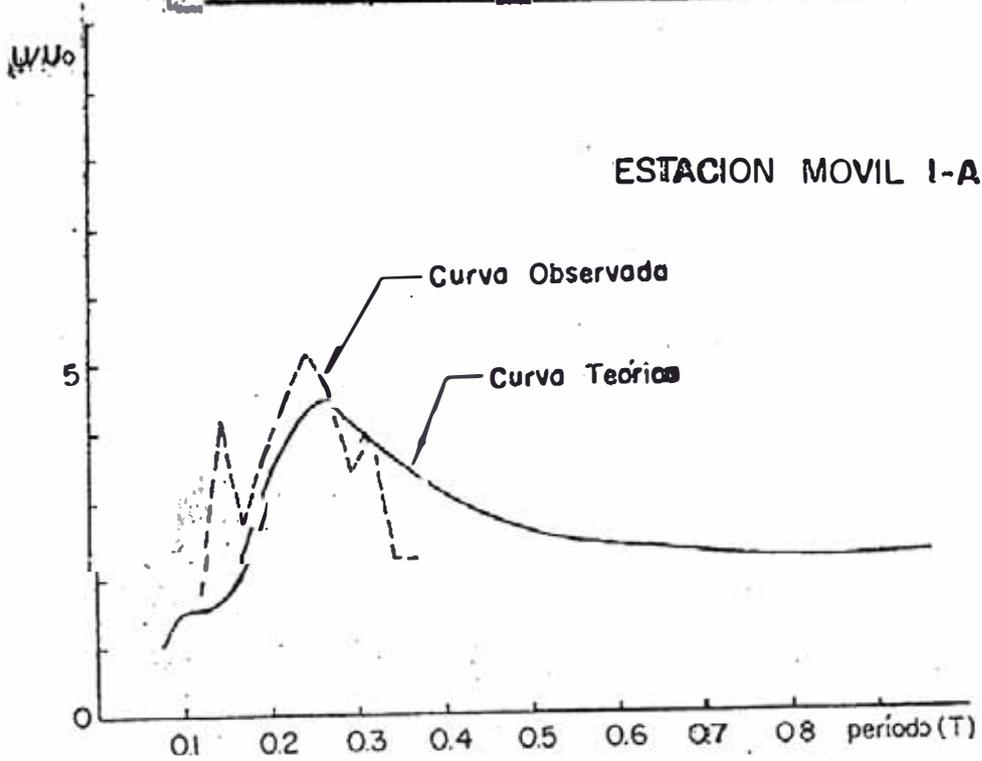
$$\alpha = 0.127 \text{ y } \zeta = 0.017$$

En general, se tiene que para períodos cortos (0.20 seg.) los valores de la impedancia sísmica oscilan entre 0.1 y 0.7 y los del coeficiente de amortiguamiento entre 0.01 y 0.03 respectivamente. De igual forma para períodos largos (0.50 seg.) los valores de α oscilan entre 0.1 y 0.3 y los de ζ entre 0.08 y 0.10

Siguiendo la metodología expuesta en 3.22, para la ciudad de Huaráz se han calculado los valores de α y ζ que hacen coincidir mayormente las curvas de razón de amplitud-período teóricas con las ~~observadas~~ observadas, ambas se muestran graficadas en las páginas 99 a 102 que siguen, asimismo, los valores de las ordenadas respectivas y su correspondiente raíz media cuadrática (RMS) son mostradas en las Tablas I a VII de las páginas 103 a 109.

En los lugares seleccionados para el estudio, se ha intentado elaborar modelos dinámicos del suelo de acuerdo a lo indicado en 3.13; para lo cual, toda la información proporcionada por las diferentes investigaciones realizadas, lo mismo que la información obtenida por el presente método

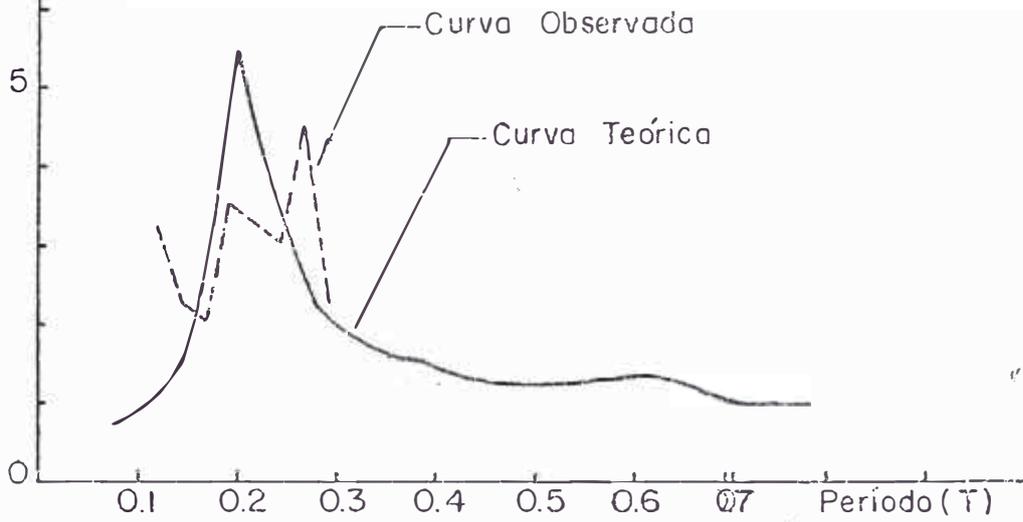
ESPECTROS DE AMPLIFICACION



ESPECTROS DE AMPLIFICACION

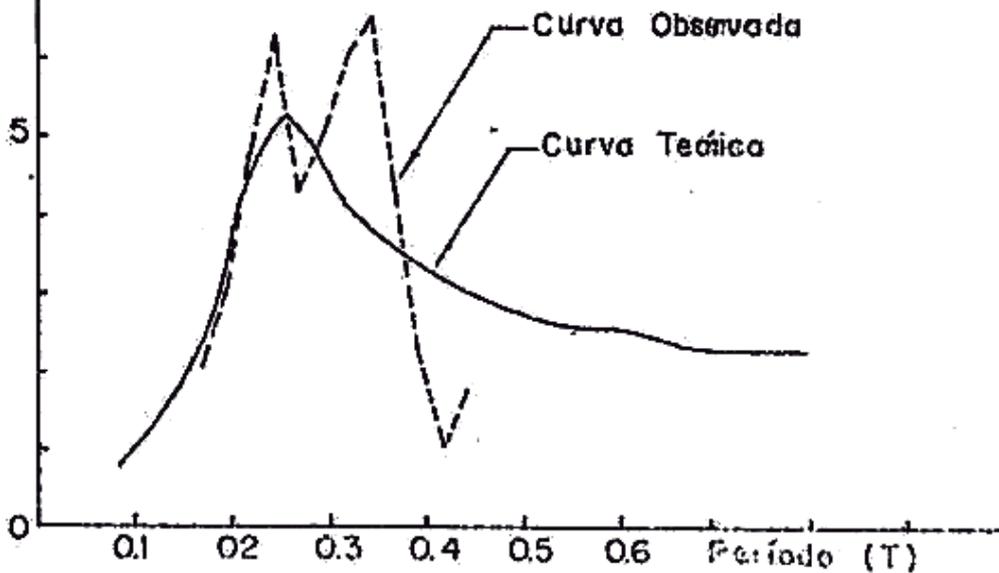
U/U_0

ESTACION MOVIL 5-B

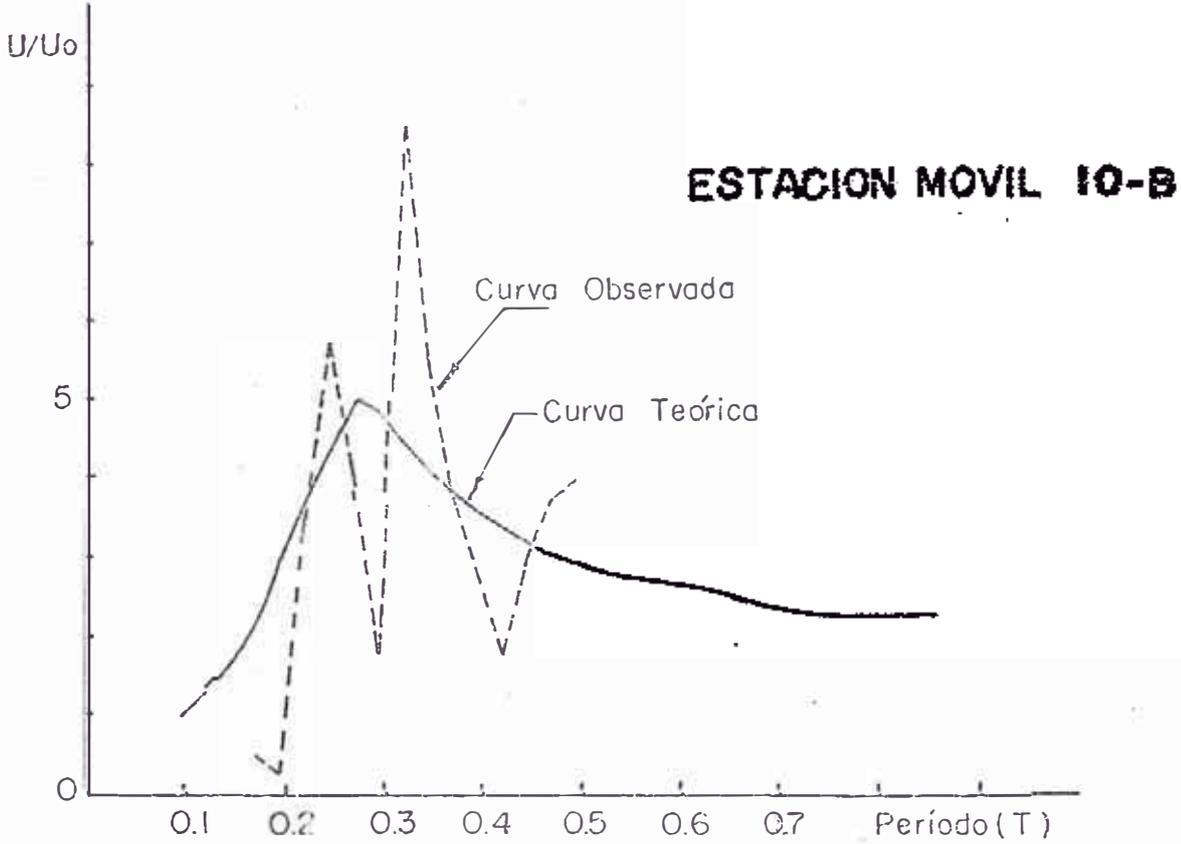


U/U_0

ESTACION MOVIL 6-A



ESPECTROS DE AMPLIFICACION



ESPECTROS DE AMPLIFICACION

ESTACION MOVIL 12-C

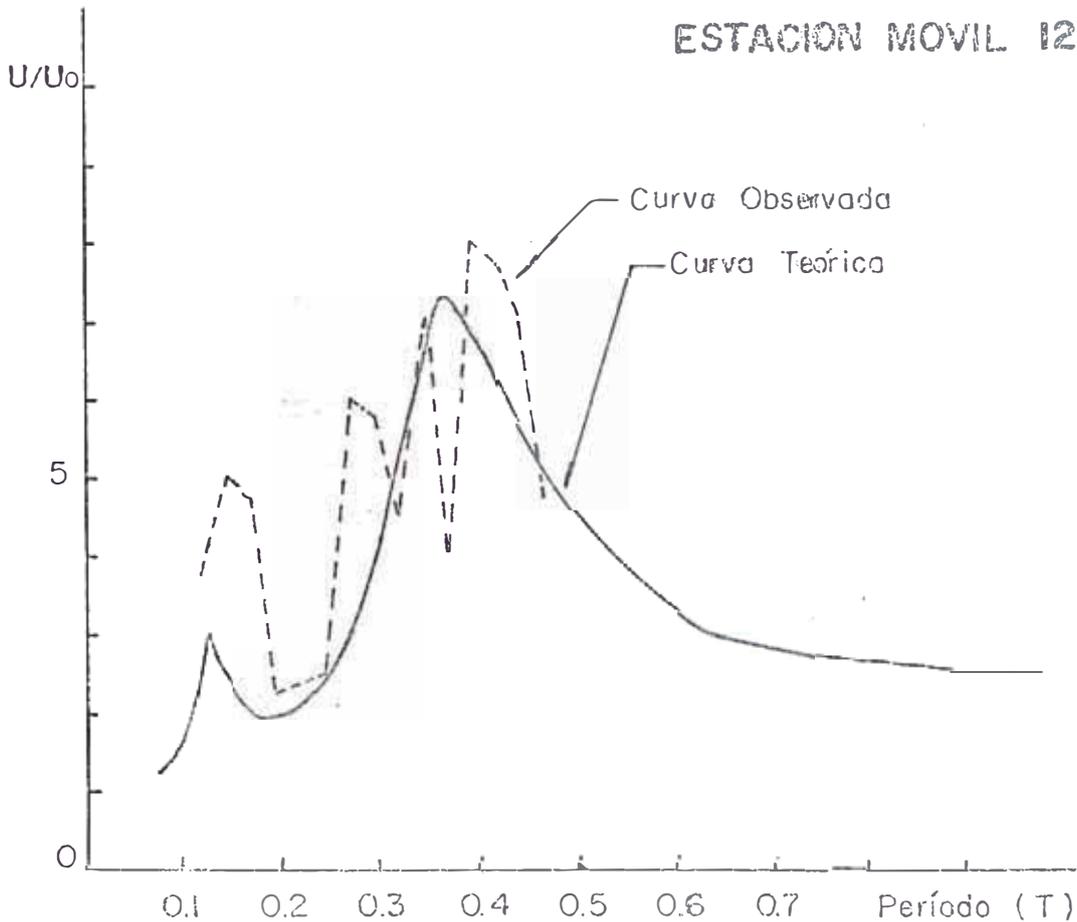


TABLA II

ESTACION MOVIL 3 - B

$T_0 = 0.24$

FAC. = 2.00

PUNTO	PERIODO SEG.	RAZON DE AMPL. OBS.	RAZON DE AMPL. CAL	DIFFERENCIA
1	0.025	0.0	0.18	- 0.018
2	0.050	0.0	0.162	- 0.162
3	0.075	0.0	0.448	- 0.448
4	0.100	1.500	0.766	- 0.734
5	0.125	0.580	1.056	- 0.476
6	0.150	0.990	1.345	- 0.355
7	0.175	0.770	1.651	- 0.881
8	0.200	2.380	1.959	0.421
9	0.225	2.400	2.234	0.166
10	0.250	3.660	2.441	1.219
11	0.275	1.130	2.568	- 1.438
12	0.300	3.720	2.625	1.095
13	0.325	2.940	2.632	0.308
14	0.350	1.380	2.610	- 1.230
15	0.375	2.400	2.574	- 0.174
16	0.400	3.500	2.531	- 0.969
17	0.425	2.370	2.488	- 0.118
18	0.450	1.440	2.447	- 1.007

DIFERENCIA MAX. = 1.438

RMS = 0.762

ALF = 0.547

TAU = 0.088

TABLA II

ESTACION MOVIL 3 - B

To = 0.24

FAC. = 2.00

PUNTO	PERIODO SEG.	RAZON DE AMPL. OBS.	RAZON DE AMPL. CAL	DIFFERENCIA
1	0.025	0.0	0.18	- 0.018
2	0.050	0.0	0.162	- 0.162
3	0.075	0.0	0.448	- 0.448
4	0.100	1.500	0.766	- 0.734
5	0.125	0.580	1.056	- 0.476
6	0.150	0.990	1.345	- 0.355
7	0.175	0.770	1.651	- 0.881
8	0.200	2.380	1.959	0.421
9	0.225	2.400	2.234	0.166
10	0.250	3.660	2.441	1.219
11	0.275	1.130	2.568	- 1.438
12	0.300	3.720	2.625	1.095
13	0.325	2.940	2.632	0.308
14	0.350	1.390	2.610	- 1.230
15	0.375	2.400	2.574	- 0.174
16	0.400	3.500	2.531	- 0.969
17	0.425	2.370	2.488	- 0.118
18	0.450	1.440	2.447	- 1.007

DIFFERENCIA MAX. = 1.438

RMS = 0.762

ALF = 0.547

TAU = 0.088

TABLA III

ESTACION MOVIL 5-P.

<u>To = 0,20</u>		<u>FAC. = 1,0</u>		
	<u>PERIODO</u>	<u>RAZON DE</u>	<u>RAZON DE</u>	
<u>PUNTO</u>	<u>SEG.</u>	<u>AMPL. OBS.</u>	<u>AMPL. CAL.</u>	<u>DIFERENCIA</u>
1	0.025	0.0	0.024	- 0.024
2	0.050	0.0	0.363	- 0.363
3	0.075	0.0	0.822	- 0.822
4	0.100	3.750	0.876	2.874
5	0.125	3.200	1.161	2.039
6	0.150	2.250	1.823	0.407
7	0.175	1.875	3.337	- 1.452
8	0.200	3.500	5.533	- 1.998
9	0.225	3.300	4.218	- 1.918
10	0.250	2.950	2.935	0.015
	0.275	4.425	2.301	2.124
		220	1.950	0.270

DIFERENCIA MAX. = 2.874

RES = 1.441

ADP = 0.052

TAV = 0.933

TABLA IV
ESTACION MOVIL 6-A

To = 0.24

FAC. = 2.00

PUNTO	PERIODO SEG.	RAZON DE AMPL. OPS.	RAZON DE AMPL. CAL.	DIFERENCIA
1	0.025	0.0	0.026	- 0.026
2	0.050	0.0	0.243	- 0.243
3	0.075	0.0	0.661	- 0.661
4	0.100	0.0	1.068	- 1.068
5	0.125	0.280	0.456	- 1.176
6	0.150	6.800	1.961	4.839
7	0.175	1.923	2.687	- 0.764
8	0.200	2.987	3.683	- 0.696
9	0.225	4.820	4.759	0.061
10	0.250	6.160	5.318	0.842
11	0.275	4.137	5.116	- 0.979
12	0.300	5.000	4.603	0.397
13	0.325	5.967	4.114	1.853
14	0.350	6.397	3.726	2.671
15	0.375	4.240	3.430	0.810
16	0.400	2.327	3.203	- 0.877
17	0.425	1.040	3.027	- 1.987
18	0.450	1.843	2.888	- 1.045
19	0.475	0.150	2.776	- 2.626

DIFERENCIA MAX. = 4.839

RMS = 1.674

ALF = 0.124

TAU = 0.082

TARLA V

ESTACION MOVIL 10-20

To = 0.26

FAC. = 2.00

PUNTO	PERIODO SEG	RAZON DE MPL OBS	RAZON DE MPL CAL.	DIFFERENCIA
1	0.025	0.0	0.023	- 0.023
2	0.050	0.0	0.024	- 0.194
3	0.075	0.0	0.525	- 0.525
4	0.100	0.0	0.892	- 0.892
5	0.125	0.0	1.243	- 1.243
6	0.150	0.0	1.650	- 1.650
7	0.175	0.455	2.185	1.730
8	0.200	0.355	2.896	2.541
9	0.225	3.555	3.756	- 0.201
10	0.250	5.725	4.540	- 1.185
11	0.275	3.890	4.889	= 0.999
12	0.300	1.840	4.750	- 2.910
13	0.325	8.560	4.301	- 4.169
14	0.350	5.515	4.015	1.500
15	0.375	3.725	3.693	0.032
16	0.400	2.675	3.434	- 0.759
17	0.425	1.705	3.227	- 1.522
18	0.450	2.940	3.061	- 0.121
19	0.475	3.790	2.927	0.863
20	0.500	3.880	2.817	1.063

DIFFERENCIA MAX. = 4.169

RMS = 1.584

ALF = 0.130

TAU = 0.100

TABLA VI

ESTACION MOVIL 11-C

$T_0 = 0.26$

FAC. = 2.00

PUNTO	PERIODO SEG.	RAZON DE AMPL. OPS.	RAZON DE AMPL. CAI	DIFFERENCIA
1	0.025	0.0	0.009	- 0.009
2	0.050	0.0	0.107	- 0.107
3	0.075	0.0	0.335	- 0.335
4	0.100	0.333	0.623	- 0.290
5	0.125	0.250	0.878	- 0.628
6	0.150	0.800	1.080	- 0.280
7	0.175	0.573	1.290	- 0.706
8	0.200	2.00	1.457	0.543
9	0.225	2.310	1.617	0.693
10	0.250	2.317	1.753	0.563
11	0.275	2.570	1.862	0.708
12	0.300	1.433	1.945	- 0.512
13	0.325	2.607	2.005	0.601
14	0.350	1.753	2.047	- 0.294
15	0.375	1.487	2.074	- 0.588
16	0.400	2.297	2.091	0.205
17	0.425	2.853	2.101	0.752
18	0.450	1.270	2.106	- 0.836
19	0.475	1.700	2.108	- 0.408
20	0.500	1.160	2.107	- 0.947

DIFFERENCIA MAX. = 0.947

RMS = 0.557

ALF = 0.840

TAU = 0.082

TABLA VII

ESTACION MOVIL 12-C

To = 0.34

FAC. = 2.00

PUNTO	PERIODO SEG.	RAZON DE AMPL. OBS.	RAZON DE AMPL. CAL.	DIFERENCIA
1	0.025	0.0	0.003	- 0.003
2	0.050	0.0	0.350	- 0.350
3	0.075	0.0	1.231	- 1.231
4	0.100	0.0	1.624	- 1.624
5	0.125	3.867	3.070	0.878
6	0.150	4.967	2.243	2.724
7	0.175	4.733	1.901	2.832
8	0.200	2.350	1.957	0.393
9	0.225	7.233	2.224	5.009
10	0.250	2.600	2.621	- 0.021
11	0.275	6.033	3.359	2.674
12	0.300	5.623	4.314	1.369
13	0.325	4.483	5.540	- 1.057
14	0.350	6.250	6.730	0.211
15	0.375	4.017	7.245	- 3.228
16	0.400	7.917	6.857	1.060
17	0.425	7.690	6.100	1.590
18	0.450	7.023	5.377	1.646
19	0.475	4.820	4.795	0.025
20	0.500	7.613	4.343	3.270

DIFFERENCIA MAX. = 5.009

FMS = 2.040

ALF = 0.232

TAV = 0.021

ha sido resumida en la Tabla VIII de la página 111 , en la cual:

T_0 = Período predominante del suelo (seg).....de microtrepidaciones.

H = Espesor de los depósitos aluviales (mt)....de Gravimetría.
Tipo de suelo superficial de Estudios de Geología y Mecánica de suelos.

α = Impedancia sísmica de Estudios de Amplificación.

ζ = Factor de amortiguamiento de Estudios de Amplificación.

3.70 FORMULA SEMIEMPIRICA PARA MOVIMIENTOS FUERTES

3.71 RELACION ENTRE: AMPLITUD, PERIODO, MAGNITUD Y DISTANCIA EPICENTRAL

Como se mencionó en 3.41 el movimiento sísmico en la superficie depende de las características vibratorias del suelo y de las características de las ondas incidentes en el basamento rocoso.

Para examinar las características de las ondas incidentes, se parte de la fórmula establecida por C. Tsuboi (8) :

$$\text{Log. } A_m = M - 1.73 \log \Delta + 0.83 \dots\dots\dots i$$

TABLA VIII

MODELOS DINAMICOS DE LOS SUELOS

ESTACION	UBICACION	SUELO SUPERFICIAL	H(mt)	T ₀ (Seg.) α		τ
1-A	Barrio Centenario (Pallasca y A.B.Legua)	Depósitos aluviales antiguos. Ver Calicata 8.	30	0.26	0.340	0.036
6-A	Palmira	Depósitos fluvioglaciares		0.24	0.124	0.082
3-B	Barrio San Francisco	Depósitos aluviales antiguos. Ver Calicata 7	60	0.24	0.547	0.088
5-B	Huarupampa (Frente al estadio)	Depósitos fluviales. Ver Calicatas 17 y 5	60	0.20	0.052	0.033
10-B	Hualcán	Depósitos aluviales recientes. Ver Calicatas 4 y 23	100	0.26	0.130	0.100
11-C	Hotel de Turistas	Depósitos aluviales antiguos. Ver Calicata 6.	60	0.26	0.840	0.082
12-C	Barrio Relén	Depósitos gravitacionales. Ver Calicatas 9 y 11.	40	0.34	0.232	0.021

En la cual :

M = Magnitud de Richter

Δ = Distancia epicentral

Am = Máxima amplitud del desplazamiento en micrones

Considerando :

$$\Delta = 100 \text{ kms.}$$

Entonces :

$$\text{Log. Am} = M - 2.63 \dots\dots\dots 2$$

Tomando logaritmos a la fórmula de Kanai y Yoshizawa :

$$\text{Log. Am} = \text{log. } 53 + 2.56 \text{ Log } T_m \dots\dots\dots 3$$

Igualando las expresiones 2 y 3 :

$$M - 2.63 = \text{Log } 53 + 2.56 \text{ Log } T_m$$

$$\text{Log } T_m = 0.39 M - 1.70 \dots\dots\dots 4$$

Restando la expresión 4 de la 1 :

$$\text{Log} \left(\frac{Am}{T_m} \right) = 0.61 M - 1.73 \text{ Log } \Delta + 2.53 \dots\dots\dots 5$$

Considerando que la distribución uniforme de energía es aplicable a las ondas sísmicas, (según 3.41) esto es que :

$$\left(\frac{Am}{T_m} \right) = \text{cte.} = \frac{U}{T}$$

Entonces, la amplitud U, medida en cms. la cual corresponde a cada período T de las ondas sísmicas, puede ser expresada por :

$$U = (10^{0.61 M - 1.73 \text{ Log } \Delta^{-1.47}}) T \dots\dots\dots 6$$

De manera similar se obtiene :

$$V = 2 \pi 10^{0.61 M - 1.73 \text{ Log } \Delta^{-1.47}} \dots\dots\dots 7$$

$$a = \frac{(2 \pi)^2}{T} 10^{0.61 M - 1.73 \text{ Log } \Delta^{-1.47}} \dots\dots\dots 8$$

Donde :

V = velocidad espectral en cm/seg.

a = aceleración espectral en cm/seg.²

Las magnitudes y distancias epicentrales de terremotos futuros pueden ser estimados aplicando el buen juicio ingenieril a análisis estadísticos de la sismicidad, de esta manera se pueden obtener el espectro aproximado de las ondas sísmicas en la roca base. Adicionando a este espectro las características vibratorias del suelo, puede determinarse el coeficiente de fuerza lateral sísmica para las estructuras

3.72 CARACTERISTICAS VIBRACIONALES DEL SUELO

Basándose en observaciones de sismos y de microtrepidaciones y realizando análisis estadísticos de daños sísmicos y estudios teóricos de ondas sísmicas, Kanai (7 y 9) ha obtenido la siguiente fórmula semi-empírica, para un suelo de un estrato yaciendo sobre un medio semi-infinito :

$$G(t,q) = 1 + \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{1+\alpha}{1-\alpha} \left\{1 - \left(\frac{T}{T_0}\right)^2\right\}\right]^2 + \left\{\frac{0.3}{\sqrt{T_0}} \left(\frac{T_0}{T_0}\right)\right\}^2}} \dots 9$$

Donde :

T y T₀ representan respectivamente en segundos, el período de las ondas sísmicas y el período predominante del suelo.

$$\alpha = \frac{\rho_1 v_1}{\rho_2 v_2} = \text{Impedancia sísmica}$$

La fórmula anteriormente mencionada es simplificada, cuando se presentan los casos siguientes :

- 1) Caso de un estrato no superficial ó períodos de onda bastante largos :

$$T_0 \rightarrow 0 \quad \delta \quad T \rightarrow \infty \text{ entonces: } G(t,q) \rightarrow 1$$

- 2) Caso de un estrato superficial potente ó períodos de onda muy cortos

$$T_0 \rightarrow \infty \quad \delta \quad T \rightarrow 0 \quad \text{entonces: } G(T,q) \rightarrow \frac{2}{1+\alpha}$$

- 3) Caso de resonancia :

$$T_0 = T, \text{ entonces: } G(T,q) = 1 + \frac{\sqrt{T_0}}{0.3}$$

3.73 FORMULAS DE KANAI PARA LA RESPUESTA ESPECTRAL

Integrando las expresiones obtenidas en 3.71 y 3.72 conforme a lo expuesto anteriormente, se llega a las siguientes fórmulas para el movimiento espectral de la superficie del suelo :

$$U = T \times 10^{0.61 M - 1.73 \text{ Log } \Delta - 1.47} \times G(T, q) \dots \dots \dots 10$$

$$V = 10^{0.61 M - 1.73 \text{ Log } \Delta - 0.67} \times G(T, q) \dots \dots \dots 11$$

$$a = \frac{10^{0.61 M - 1.73 \text{ Log } \Delta + 0.13}}{T} \times G(T, q) \dots \dots \dots 12$$

En estas fórmulas, la magnitud y la distancia epicentral ~~pueden predecirse~~ pueden predecirse en base a estudios estadísticos de la sismicidad del lugar, la impedancia sísmica puede ser obtenida por el método expuesto en el presente trabajo y el período predominante puede determinarse desde las Micro-trepidaciones.

Respecto a la distancia del lugar hasta la zona de liberación de energía, en general puede decirse que las amplitudes del movimiento decrecen con el incremento de la distancia, aunque otros factores tales como la estructura

geológica y orientación influirán en mayor ó menor grado.

Si la falla es pequeña en longitud y el lugar está localizado a una distancia considerable desde la falla, la distancia significativa del lugar hasta la zona de liberación de energía puede ser expresada por la distancia epicentral.

En el caso de una falla grande y un lugar localizado cerca de la falla, la distancia del lugar hasta la zona de energía liberada es más apropiadamente caracterizada por la distancia hasta la falla causante; por que el epicentro simplemente indica la posición en el plano del punto donde la ruptura de la falla comienza.

Algunas veces resulta más apropiado determinar la distancia hipocentral del lugar hasta el foco; pués se ha observado que para profundidades focales pequeñas se producen grandes aceleraciones en la superficie del suelo para puntos localizados cerca de la falla ó región epicentral.

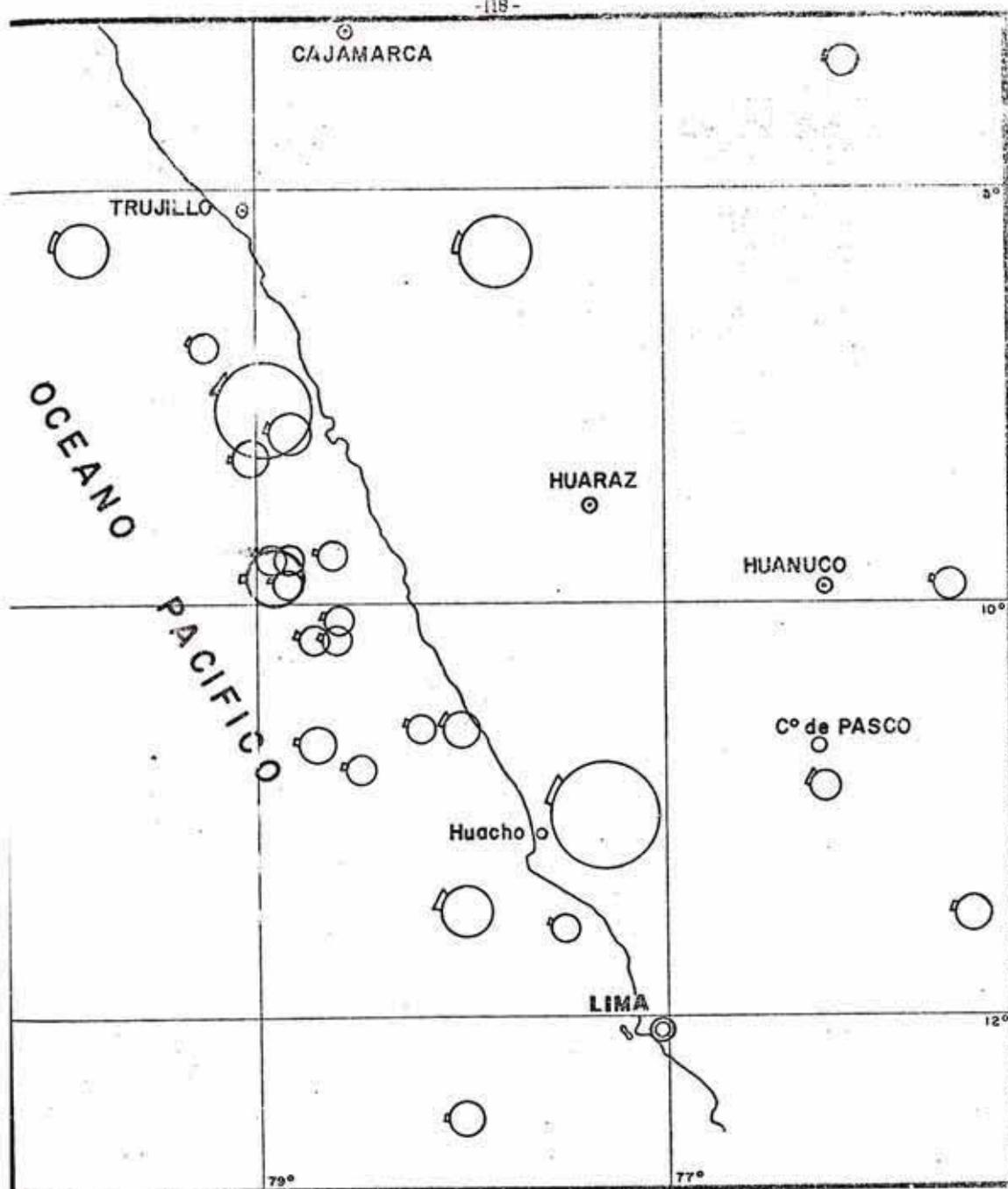
Cuando la distancia en planta de un lugar hasta la falla causante es un tanto grande, dicha distancia no difiere apreciablemente de la distancia hipocentral.

En cuanto a la magnitud, se conoce que a más grande longitud de rotura de falla, corresponderá una magnitud de sismo más grande. Aunque no hay proporcionalidad directa entre la longitud de ruptura de falla y la cantidad de energía liberada, en general puede decirse, que la amplitud de la aceleración inducida aumenta con el incremento de la magnitud.

La magnitud también influye sobre la duración del sismo, desde que la sacudida continúa siendo la misma, mientras la rotura de falla está ocurriendo. Por estudios realizados por Housner se conoce que sismos de magnitudes iguales a 7 durarán de 25 a 30 segundos; los de magnitud igual a 6 durarán 15 segundos y los de magnitud igual a 5 durarán 5 segundos.

Para la ciudad de Huaráz, la magnitud y la distancia epicentral se han estimado desde el mapa de sismos fuertes elaborado por el Departamento de Sismología del Instituto Geofísico del Perú; se han considerado tres sismos de magnitudes iguales a 6.5, 7.7 y 8.0 con sus correspondientes distancias epicentrales iguales a 100, 130 y 160 kms. respectivamente, como los que podrían afectar más seriamente la ciudad.

Estos datos adicionados a los valores de impedancia sísmica y período predominante mostrados en la Tabla VIII han sido intro-

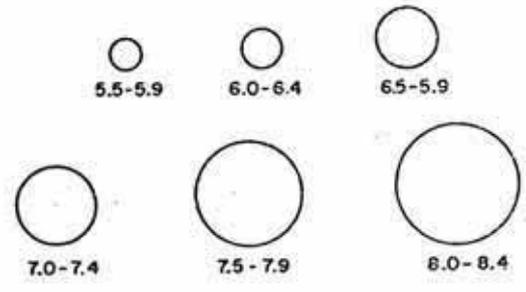
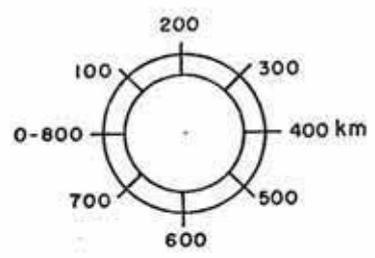


SISMOS FUERTES DEL PERU

ESCALA : 1/3'000,000

ESCALA DE PROFUNDIDAD

ESCALA DE MAGNITUDES



ducidos al Programa de Computadora 360-40 elaborado para el cálculo de aceleraciones según la fórmula (12) habiéndose obtenido los valores de los espectros de aceleraciones para los lugares en estudio.

El diagrama de Flujo y el Programa de Computadora se encuentran detallados en el Apéndice y los gráficos de los espectros son mostrados en la página 120.

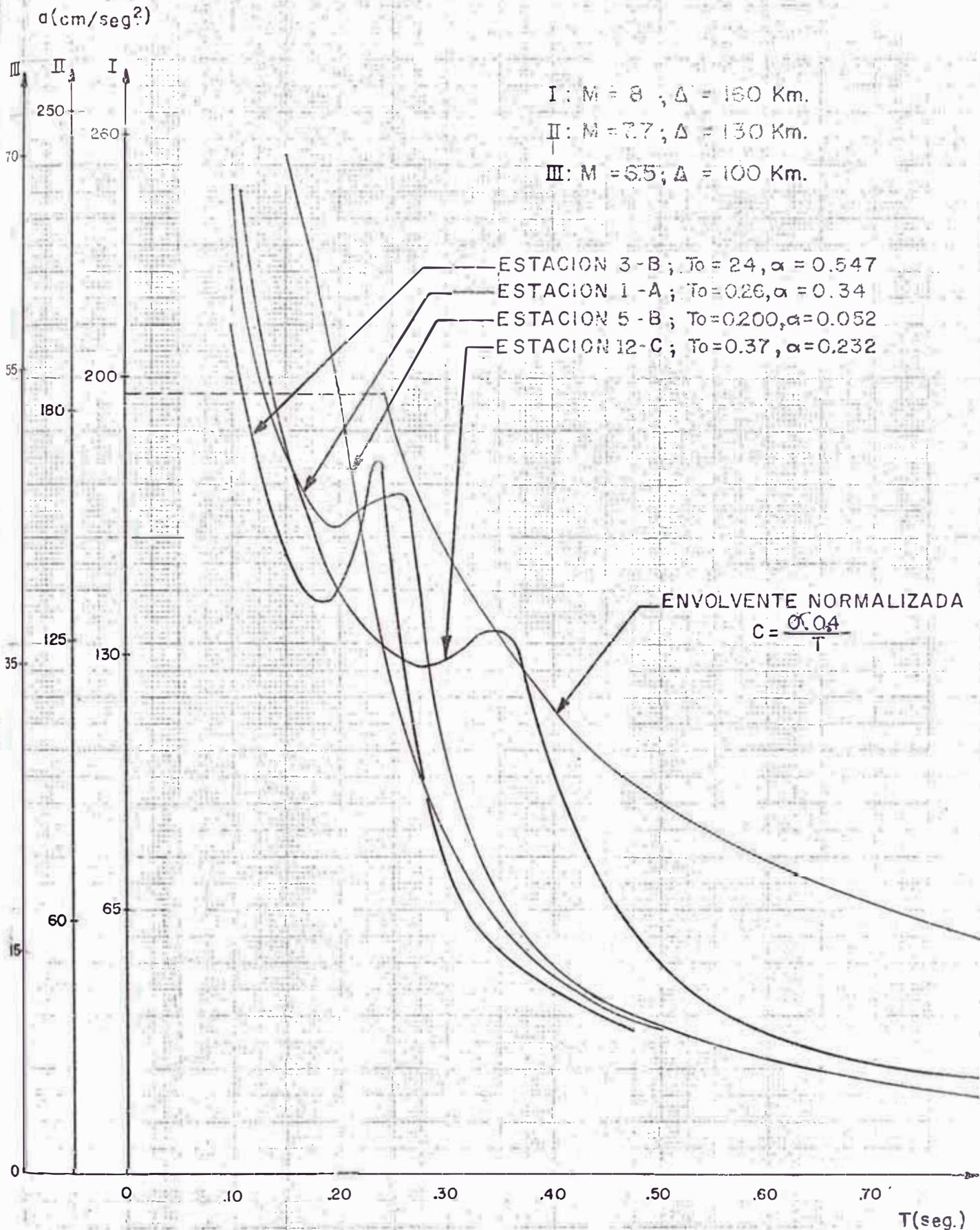
En la misma figura, se muestra la envolvente de los espectros correspondientes a las estaciones 1-A, 5-B, 3-B y 12-C; los espectros de las demás estaciones no se han considerado por haber dado resultados que no concuerdan con sus correspondientes de las anteriores por lo que se presume que han ocurrido errores de tipo instrumental ó humano.

Para el cálculo de la ley matemática que rige a la envolvente de aceleraciones, se ha considerado su semejanza con una hipérbola equilátera cuya expresión es :

$$xy = \text{constante} = K$$

de esta manera se obtiene el valor de

$$K = \frac{0.2}{T}$$



ESPECTRO DE ACELERACIONES

Si se considera que la envolvente normalizada del espectro teórico de las Normas Peruanas, tiene un valor máximo de 0.2 g., entonces se tendrá que el Coeficiente Sísmico "C" para la ciudad de Huaráz, será

$$C = \frac{0.20}{T} \times 0.2$$

$$C = \frac{0.04}{T}$$

CAPITULO IV

C O N C L U S I O N E S

Y

R E C O M E N D A C I O N E S

- 1.- Los suelos de Puaráz presentan modos de vibración que van desde períodos cortos de 0.10 seg. hasta períodos largos del orden de 0.50 seg.
- 2.- En el área estudiada los suelos se encuentran estratificados en su mayor parte, presentando hasta tres lechos con propiedades físicas variables; la excepción se presenta en las zonas de Pedregal bajo y Palmira donde podría decirse que los suelos están compuestos de un solo estrato.
- 3.- Las amplificaciones que estos suelos introduzcan a un movimiento sísmico serán más notorias para vibraciones cuyos períodos sean similares a los predominantes de cada lugar.
- 4.- Se ha observado que la amplificación de las ondas sísmicas es del orden de 2 a 5 veces, ocurriendo las mayores en los suelos donde el período predominante es grande, como en el caso de la Estación 12-C. Esto se debe a que el período de la onda sísmica, el cual incrementa con la

distancia epicentral, se hace similar al período predominante del suelo.

- 5.- El período de las edificaciones a construir sobre determinado lugar, deberá ser diferente del período predominante del suelo, para de esa manera evitar el fenómeno de la amplificación dinámica de las vibraciones.

- 6.- El cálculo de la fuerza horizontal sísmica

$$H = W'CP$$

Actuante sobre las edificaciones será efectuado considerando como coeficiente sísmico "C" el valor dado por:

$$C = \frac{0.004}{T}$$

donde T es el período de la estructura en segundos, que será calculado según lo indicado en el Artículo V-IV - 10.4.02 del Reglamento Nacional de Construcciones.

- 7.- Se ha comparado el espectro obtenido con el recomendado por el Reglamento Nacional de Construcciones $C=0.05/\sqrt[3]{T}$ habiéndose observado que los valores del espectro obte-

nido son un tanto mayores que los indicados por la Norma Peruana, esto se debe a que estos últimos han sido obtenidos para suelo duro.

- 8.- La zona adyacente al río Quilcay es recomendable que sea destinada ha áreas verdes, debido a que es una zona aluviónica en potencia, lo cual está de acuerdo a lo recomendado por el Reglamento Nacional de Construcciones (Artículo V-IV-10.1.05)

- 9.- Las nuevas construcciones a realizar deberán de efectuarse teniendo presente las recomendaciones antisísmicas, tanto sobre la calidad de los materiales como también sobre su disposición y conveniente refuerzo dentro de la edificación. (Ver los Artículos V-IV-3 y V-IV-10.10.05 y el Apéndice "B" del Reglamento Nacional de Construcciones).

- 10.- Dado que los valores del Coeficiente Sísmico recomendado por el Reglamento Nacional de Construcciones son de carácter general y quizás demasiado conservadores

en el caso de edificios altos en terrenos duros más no así en el caso de terrenos blandos; estudios similares al presente podrían ser realizados para otras ciudades en forma particular, determinándose el valor del coeficiente sísmico de una manera más adecuada.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Deza, E.; Ibarra, G.; Cáceres, A
"Informe de la Prospección por Gravedad de la ciudad de
Huaráz - Ancash"
Cryrza; Sub-Comisión Técnica; Lima-Perú - Set. 1971

- 2.- Dobrin, M
"Introduction to Geophysical Prospecting"
I.C.N.S.I.A.; Lima-Perú; Set. 1969

- 3.- Ibañez, J.
"Vibración Libre de depósitos sedimentarios"
I.C.N.S.I.A.; Lima-Perú; Set. 1969

- 4.- Idriss, I.M.; Seed, H.B.; Kiefer, F.W.
"Characteristics of rock motions during Earthquakes;"
E.F.R.C.; Report No. 68.5; Set. 1968

- 5.- Kanai, K.
"Relation between the nature of the Superficial Layer
and the Amplitude of earthquake motions "
Bulletin of the E.R.I.; University of Tokyo (Japan);
Vol. 30; March 1952

6.-

"Relation between the nature of the Superficial Layer
and the Amplitude of earthquakes motions II "
Bulletin of the E.R.I.; University of Tokyo (Japan)
Vol. 31; Set. 1953

7.-

"Semiempirical formula of the Characteristics seismic
of the Ground"
Bulletin of the E.R.I.; University of Tokyo (Japan);
Vol. 35; June 1957

8.-

"An Study of strong earthquake motions"
Bulletin of the E.R.I.; University of Tokyo (Japan);
Vol. 36; 1958

9.-

"An Empirical Formula for the Spectrum of Strong
Earthquake Motions"
Bulletin of the E.R.I.; University of Tokyo (Japan);
Vol. 39; 1961

10.-

"On the Predominant Period of Earthquake Motions"

Bulletin of the E.R.I.; University of Tokyo (Japan);

Vol. 40; 1962

11.- Kanai, K; Osada, K.; Yoshizawa, S.

"Relation between the Amplitude and the Period of a
earthquake motions"

Bulletin of the E.R.I.; University of Tokyo (Japan);

Vol. 31; March 1953

12.- Kanai, K. Suzuki, M.

"Analitics results of aceleration Seismographs obtained
on Tokyo and Yokohama"

Bulletin of the E.R.I.; University of Tokyo (Japan);

Vol. 32; July 1954

13.- Kanai, K; Tanaka, T.; Osada, K.

"Measure of the Microtremor I :

Bulletin of the E.R.I.; University of Tokyo (Japan);

Vol. 32; July 1954

- 14.- Kanai, K.; Takahasi, R.; Kawasumi, H.
"Seismic Characteristics of the Ground"
Proceedings of the Second World Conference on Earth-
quake Engineering; Berkeley, California; June 1956
- 15.- Kanai, K.; Yoshizawa, S.
"The Amplitude and the Period of a earthquake
motion II"
Bulletin of the F.R.I.; University of Tokyo;
Vol. 36; Set. 1958
- 16.- Kanai, K.; Tanaka, T.; Yoshizawa, S.
"Study Comparative of earthquake motions on the
ground and the underground"
Bulletin of the F.R.I.; University of Tokyo (Japan);
Vol. 37; March 1959
- 17.- Merino, C.A.
"Influencia del suelo en el Comportamiento Sísmico
de las Estructuras"
Tesis de Grado; P.A.I.C.-U.N.I.; Lima-Perú; 1971

- 18.- Poblete, M.; Dobry, R.
"Modelo dinámico del sub-suelo de Concepción-Chile"
Revista del I.D.I.E.M.; Universidad de Chile-Chile;
Vol. 7; Dic. 1969
- 19.- Retamal, E; Ortigosa, P.; Norambuena, C.; Veiga, J.
"Microregionalización de Valdivia-Chile"
Revista del I.D.I.E.M.; Universidad de Chile-Chile;
Vol. 8; Dic. 1969
- 20.- San Lucas, F.
"Microtrrepidaciones en la ciudad de Guayaquil-Ecuador"
Tesis de Magister en Estructuras; U.N.I.; Lima-Perú;
1972
- 21.- Smith, F.; Long, J.
"Earthquake Engineering by the Practising Engineer"
I.C.M.S.I.A.; Lima-Perú; Set. 1969

22.- Tanaka, T.

"Analyzer of distribution Periods for irregular motions"

Bulletin of the F.R.I.; University Tokyo-Japan; Vol. 40;

1962

23.- Terzaghi, K. Peck, P.

"Mecánica de suelos en la Ingeniería Práctica"

Edición El Ateneo S.A., 1968

24.- Wiegel, P.J.

"Earthquake Engineering"

Edición Prentice-Hall, Inc., 1970