

Universidad de Oriente  
Facultad de Construcciones  
Departamento de Arquitectura y Urbanismo



**Tesis presentada en opción al título académico de Máster en “Hábitat y Medio Ambiente en Zonas Sísmicas”**

**PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL SUELO ANTE FUERZAS DINÁMICAS. CASO DE ESTUDIO: EMCOMED**

**Mención I: Conservación físico ambiental del patrimonio edificado en zonas sísmicas**

**Autor: Luis Felipe Caballero Cornier**



**UNIVERSIDAD DE ORIENTE**  
**FACULTAD DE CONSTRUCCIONES**  
**DEPARTAMENTO DE ARQUITECTURA Y URBANISMO**

**Tesis presentada en opción al título académico de Máster en “Hábitat y Medio Ambiente en Zonas Sísmicas”**

**“PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL SUELO ANTE FUERZAS DINÁMICAS. CASO DE ESTUDIO: EMCOMED”**

**Autor: Luis Felipe Caballero Cornier**

**Tutores: Dr.C. Tomás Jacinto Chuy Rodríguez**

**Dr.C. Francisco Calderín Mestre**

**Santiago de Cuba, julio de 2017**

**“Año 59 de la Revolución”**

## DEDICATORIA

**A dios:** por ser mi guía y redentor.

**A mis tres hijas:** por constituir una razón de ser y lucha.

**A mi padre, quien no está físicamente:** por haberme enseñado a tener desde pequeño el espíritu de sacrificio.

**A mi madre:** por su apoyo incondicional.

**A mi hermana y sobrina:** por su comprensión y orgullo hacia mí.

**A mi novia Avril:** por su apoyo y preocupación en la confección del trabajo.

## **AGRADECIMIENTOS**

Se le agradece a los doctores Tomás Jacinto Chuy Rodríguez y Francisco Calderín Mestre por su tiempo, dedicación y asesoría para la presente investigación.

Agradecimientos especiales a la doctora y coordinadora de la maestría Maritza Ocallaghan por sus consejos, apoyo, oportunidades y confianza durante el periodo de estudios.

A los másters Darío Candebat Sánchez y Zulima Caridad Rivera Álvarez por su valiosa y oportunas observaciones para dar más calidad al trabajo.

Al licenciado Rafael Oñate Verdeja e Ingeniero Candido Montenegro Moracén por contribuir en las mediciones de campo.

Al doctor José Alejandro Zapata Balanqué por haberme iniciado en la maestría.

Al doctor en Eduardo Álvarez Deulofeo por transmitirme sus conocimientos acerca de la dinámica de las estructuras y haber aceptado la oposición del presente trabajo investigativo.

A todo el claustro de profesores de la Maestría “Hábitat y Medio Ambiente en Zonas Sísmicas” en su tercera edición: por su exigencia y transmisión de conocimientos a un alto nivel profesional.

A todo mis compañeros de trabajo que de alguna forma u otra apoyaron y aconsejaron para el desarrollo de esta investigación.

A mi familia: por su apoyo incondicional.

## RESUMEN

Ante la incertidumbre que existe respecto al conocimiento del comportamiento dinámico del suelo que se encuentra por debajo de una cimentación sometido a la acción de cargas dinámicas relevantes, se establece el diseño de un procedimiento que permita estimar el comportamiento de ese depósito. Se llevaron a cabo pasos para la estimar el comportamiento de los suelos apoyado en mediciones instrumentales, a través de los métodos de campo de los microsismos, tomografía eléctrica y refracción sísmica; conjugando esos resultados con las calas ingeniero-geológicas. A través del primer método se determinó el período de suelo ( $T_s$ ) con el propósito de analizar las características dinámicas del suelo. Los resultados de los dos últimos métodos permitieron obtener cómo estaban distribuidos geoméricamente los depósitos geológicos en los primeros metros de la superficie, a partir de determinación de la velocidad de las ondas primarias ( $V_p$ ) por capa y los diferentes valores de resistividad eléctrica ( $\rho$ ) de los suelos, el agua y las rocas. Los parámetros de mediciones de los microsismos y la sísmica de refracción constituyeron la base en el análisis de la respuesta del suelo y la estructura. La investigación sirvió para demostrar la no probabilidad de la ocurrencia de la licuación de suelo generada por un terremoto de gran intensidad y se determinó el nivel de la amplificación sísmica del suelo. Se obtuvieron registros de sismos artificiales compatibles con la sismicidad de la zona de estudio, así como los registros de sismos reales El Centro y Gilroy1, catalogados como referentes en los estudios sismológicos. El procedimiento fue validado con el estudio del suelo del edificio donde se emplaza la Empresa Comercializadora y Distribuidora de Medicamentos (EMCOMED), ante la ocurrencia de estos dos sismos fuertes escalados al valor de la aceleración pico en el sitio.

## ABSTRACT

Given the uncertainty that exists regarding the knowledge of the dynamic behavior of the soil that is below a foundation under the action of relevant dynamic loads, a design of a procedure which allows for the estimation of the behavior of that soil has been established. Steps were taken to estimate soil behavior supported by instrumental measurements, using field methods like microseismics, electrical tomography, and seismic refraction. These results were combined with those of the engineering-geological covers. Through the first method the soil period ( $T_s$ ) was determined to analyze the dynamic characteristics of soil. The results of the last two methods allowed for the geometrical distribution of the geological deposits in the first meters of the surface. This is to be obtained from the determination of the velocity of the primary waves ( $V_p$ ) per layer and the different values of electrical resistivity ( $\rho$ ) of the soils, water and rocks. Microseismics and refractive seismic parameters were the basis for the analysis of soil response and structure. The research was used to demonstrate the non-probability of occurrence of soil liquefaction generated by a high-intensity earthquake and the level of soil seismic amplification was determined. Records were obtained of artificial earthquakes compatible with the seismicity of the study area, as well as the records of the real earthquakes - El Centro and Gilroy1 - cataloged as referents in the seismological studies. The procedure was validated by the study of the building located at the Marketing and Distribution Company of Medicines (EMCOMED), given the occurrence of these two strong earthquakes, scaled to the value of peak acceleration at the site.

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I. ESTADO DEL ARTE EN LA ESTIMACIÓN DE LAS CONDICIONES DE SUELO ENFATIZANDO EL USO DE ENSAYOS DE SUELO</b> .....	<b>8</b>
Introducción.....	8
1.1 Relación entre la geofísica y la arquitectura .....	8
1.2 Evolución de los métodos geofísicos en Cuba.....	9
1.2.1 Métodos sísmicos .....	9
1.2.1.1 Método de sísmica de reflexión .....	10
1.2.1.2 Método de sísmica de refracción.....	11
1.2.1.3 Método de sísmica de Pasiva.....	13
1.2.2 Métodos eléctricos .....	14
1.2.2.1 Métodos de sondeos eléctricos verticales (SEV).....	14
1.2.2.2 Método de tomografía eléctrica .....	15
1.2.3 Métodos electromagnéticos.....	15
1.2.3.1Método de georadar .....	16
1.2.4 Métodos de los microsismos .....	17
1.2.4.1 Método 1. Observación con arreglos de sensores y registro simultáneo .....	19
1.2.4.2 Método 2. Observación con una estación de referencia en roca.....	19
1.2.4.3Método 3. Observaciones con una sola estación (usando una componente tres componentes del movimiento).....	19
1.3 Uso de los métodos geofísicos en Cuba.....	20
1.4 Riesgo, vulnerabilidad y peligro sísmico .....	21
1.5 Fenómenos inducidos por los terremotos .....	24
1.6 Dinámica de suelo .....	24
1.6.1Propagación de ondas sísmicas .....	24
1.6.2 Velocidad de ondas sísmicas.....	25
1.6.3 Velocidad de las ondas de cuerpo .....	25
1.6.4 Velocidad de las ondas superficiales .....	26
1.6.5 Relación entre velocidades .....	27
1.6.6 Razón de amortiguamiento .....	27

1.6.7 Factores que influyen en las propiedades dinámicas del suelo .....	29
1.6.8 Amplificación de la aceleración sísmica debida a la existencia de depósitos de suelos blandos .....	30
1.6.9 Efectos de los sismos en el suelo .....	31
1.7 Diseño de cimentación de una máquina o de un edificio sometido a cargas dinámicas.....	31
1.8 Conclusiones parciales.....	34

**CAPÍTULO 2. PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL SUELO ANTE LA ACCIÓN DE LAS CARGAS DINÁMICAS ..... 35**

Introducción.....	35
2.1 Recepción de la solicitud del estudio para el suelo del área bajo estudio .....	36
2.2 Búsqueda de información de afectaciones del sitio por terremotos fuertes en épocas anteriores .....	36
2.3 Búsqueda de información geológica regional, y puntual a través de las investigaciones ingeniero-geológicas del suelo donde descansa la obra bajo estudio .....	36
2.4 Empleo de métodos instrumentales por etapa de trabajo .....	37
2.4.1 Etapa de organización de los trabajos .....	37
2.4.1.1 Recorrido por el área de estudio .....	37
2.4.1.2 Selección de los métodos geofísicos a emplear .....	37
2.4.1.3 Comprobación y mantenimiento a la instrumentación a emplear en el campo ..	40
2.4.2 Etapa de trabajo de campo .....	40
2.4.2.1 Emplazamiento de los equipos sobre el terreno... ..	41
2.4.3 Etapa de gabinete... ..	41
2.4.3.1 Procesamiento de las señales obtenidas a través de los diferentes métodos ...	41
2.4.3.2 Correlación e interpretación de los perfiles geofísicos con la información geológica.....	42
2.4.3.3 Correlación de los resultados obtenidos entre los perfiles geofísicos .....	43
2.5 Probabilidad de ocurrencia de fenómenos inducidos en el sitio como licuación y los deslizamientos .....	43
2.5.1 Licuación de suelo .....	43
2.5.2 Deslizamiento de suelo .....	47
2.6 Valoración de las condiciones del suelo para determinar la respuesta ante la acción de cargas dinámicas .....	49
2.7 Validación del cumplimiento de los objetivos para el procedimiento .....	49



2.8 Conclusiones parciales .....	50
----------------------------------	----

**VALIDACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL SUELO QUE SUBYACE EL EDIFICIO EMCOMED .....** 51

Introducción.....	51
-------------------	----

3.1 Recepción de la solicitud del estudio para el suelo del área bajo estudio .....	51
---	----

3.2 Búsqueda de información de afectaciones del sitio por terremotos fuertes en épocas anteriores .....	54
---	----

3.3 Búsqueda de información geológica regional, y puntual a través de las investigaciones ingeniero-geológicas del suelo donde descansa la obra bajo estudio .....	55
--	----

3.3.1 Geología del área de estudio .....	55
--	----

3.3.2 Investigaciones ingeniero-geológicas del área .....	55
---	----

3.4 Empleo de métodos instrumentales por etapa de trabajo .....	57
---	----

3.4.1 Etapa de organización de los trabajos .....	58
---	----

3.4.1.1 Recorrido por el terreno del sitio seleccionado .....	58
---	----

3.4.1.2 Selección de los métodos geofísicos a emplear .....	58
---	----

3.4.1.3 Comprobación y mantenimiento de la instrumentación a emplear .....	58
--	----

3.4.2 Etapa de trabajo de campo .....	59
---------------------------------------	----

3.4.2.1 Emplazamiento de los métodos instrumentales sobre el terreno .....	59
--	----

3.4.3 Etapa de gabinete.....	62
------------------------------	----

3.4.3.1 Procesamientos de las señales obtenidas a través de los diferentes métodos..	62
--	----

3.4.3.2 Interpretación y correlación de los perfiles geofísicos con la información geológica general y las calas ingeniero geológicas .....	62
---	----

3.4.3.3 Correlación entre los resultados de los métodos de tomografía eléctrica y refracción sísmica .....	66
--	----

3.5 Probabilidad de ocurrencia de fenómenos inducidos en el sitio como la licuación y los deslizamientos.....	67
---	----

3.6 Valoración de las condiciones del suelo para determinar la respuesta ante la acción de cargas dinámicas .....	68
---	----

3.6.1 Respuesta dinámica del perfil .....	69
---	----

3.6.1.1 Análisis de la señal obtenida por el programa ProShake.....	69
---	----

3.6.1.1 Análisis de la señal obtenida por el programa PShake.....	71
---	----

3.7 Validación del cumplimiento del procedimiento .....	73
---	----

3.8 Conclusiones parciales.....	74
<b>CONCLUSIONES GENERALES .....</b>	<b>75</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>76</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>77</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>82</b>

## Índice de relación de figuras

Fig. 1.1 Esquema de la trayectoria de los rayos de reflexión sísmica .....	11
Fig.1.2 Sismograma de la reflexión y refracción; b) Esquema de la refracción y reflexión .....	11
Fig. 1.3 Esquema de la sísmica de refracción .....	13
Fig. 1.4 Ejecución de mediciones sísmicas en Madrid .....	14
Fig. 1.5 Esquema básico del Sondeo Eléctrico Vertical. ....	15
Fig. 1.6 Comparación de la relación frecuencia-período entre sismos y microsismos .....	17
Fig. 1.7 Mapa de intensidades sísmicas reportadas en el período 1528-2015.....	23
Fig. 1.8 Respuesta de un suelo sometido a una carga cíclica .....	28
Fig. 1.9 Curva de reducción del módulo de corte y variación de la razón de amortiguación con el nivel de deformación de corte .....	29
Fig. 1.10 Variación del módulo de corte en función de la tensión de confinamiento, del índice de plasticidad y la deformación cíclica .....	30
Fig. 1.11 Variación del módulo de corte y de la razón de amortiguamiento en función de la profundidad y la deformación .....	30
Fig. 1.12 Requerimientos de desempeño típicos para las cimentaciones de máquinas .....	33
Fig. 2.1 Partes principales del equipamiento utilizado en la sísmica de refracción.....	38
Fig. 2.2 Partes del equipamiento utilizado en la tomografía eléctrica.....	39
Fig. 2.3 Partes del equipo para la medición de microsismos .....	40
Fig. 2.4 Norma China Modificada para la evaluación de la licuación de suelos con presencia de finos .....	47
Fig. 2.5 Principales tipos de deslizamientos .....	48
Fig. 3.1 Vista del edificio EMCOMED.....	51
Fig. 3.2 Planos del edificio EMCOMED .....	53
Fig. 3.3 Daños producidos por el terremoto de 1932 frente a la Alameda Michaelsen.....	54
Fig. 3.4 Mapa geólogo-tectónico de la ciudad de Santiago de Cuba: 1: 25 000.....	55
Fig. 3.5 Ubicación del área de estudio y las mediciones realizadas .....	59
Fig. 3.6 Emplazamiento para el método de sísmica de refracción.....	60
Fig. 3.7 Emplazamiento para el método de tomografía eléctrica.....	61

Fig. 3.8 Punto de medición del método de los microsismos.....	62
Fig. 3.9 Perfil sísmico de velocidades ondas longitudinales ( $V_p$ ) .....	63
Fig. 3.10 Perfil geoelectrico realizado en áreas de la droguería.....	65
Fig. 3.11 Medición de microsismos de tres componentes .....	66
Fig. 3.12 Acelerograma del terremoto El Centro .....	70
Fig. 3.13 Acelerograma del movimiento Gilroy1 .....	70
Fig. 3.14 Espectros de aceleraciones de respuesta para los movimientos de Gilroy1 y El Centro y el espectro de diseño.....	71
Fig. 3.15 Espectro de respuesta del suelo a partir de la información de los resultados del informe de investigación ingeniero-geológico (ENIA, 2014) .....	73
Fig. 3.16 Espectro de respuesta del suelo a partir de la información de los resultados del informe de investigación ingeniero-geológico (ENIA, 2015) .....	73

## Índice de relación de tablas

Tabla. 1 Terremotos reportados en la parte suroriental de Cuba con intensidades mayores o iguales que 7,0 (MSK) .....	2
Tabla. 2.1 Velocidad de las ondas longitudinales en distintos medios.....	43
Tabla. 3.1 Propiedades físico-mecánicas de los suelos de emplazamientos obtenidas a partir de los resultados de laboratorio .....	57
Tabla. 3.2 Resultados de las mediciones sísmicas realizadas en las áreas sobre el suelo de la Droguería.....	64
Tabla. 3.3 Valoración de la probabilidad de ocurrencia de la licuación de suelo en el área de la Alameda utilizando las condiciones del criterio chino .....	67
Tabla. 3.4 Parámetros extraídos de los informes de la ENIA 2014 y 2015 y la velocidad de la onda cortante ( $V_s$ ) por el método sísmico empleado .....	68
Tabla.3.5 Factor de amplificación del sitio.....	69
Tabla.3.6 Parámetros que caracterizan los movimientos sísmicos a nivel del estrato rígido (estrato 3) .....	71

## Índice de relación de siglas

Sigla	Significado
CENAIIS	Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas
EMCOMED	Empresa Comercializadora y Distribuidora de Medicamentos
OPS	Organización Panamericana de la Salud
PVR	Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo

## INTRODUCCIÓN

La génesis y consecuencias de los terremotos sobre el medio son dos puntos muy importantes a la hora de hacer cualquier tipo de investigación. Estas consecuencias por el impacto de los terremotos pueden o no constituir un desastre, dependiendo de la envergadura de los daños en edificaciones y personas.

En la mayoría de los países subdesarrollados expuestos a terremotos se aprecia un incremento cada vez mayor de pérdidas económicas y de vidas humanas por la no aplicación adecuada de normas sismorresistentes y por el aumento desproporcionado de sus poblaciones. El factor económico constituye un indicador del nivel del riesgo sísmico, es decir a medida que este aumente el riesgo sísmico disminuye.

“El incremento de las pérdidas económicas y vidas humanas a través del tiempo debido a situaciones de desastres, manifiesta una tendencia realmente alarmante, donde se muestra que las políticas y estrategias aplicadas para la prevención y mitigación de estos hechos no han sido totalmente efectivas, y siguen siendo los países subdesarrollados los que más números de muertos aportan y a los que les cuesta más trabajo recuperarse” (Guasch, F. *et al.*, 2014).

Estas pérdidas son alarmantes ya que mucha información no llega a la población por diferentes causas, unas de ellas por el periodo de tiempo prolongado que no ha ocurrido un terremoto desastroso, bajo nivel económico y/o social para construir estructuras sismorresistentes o simplemente hay poca voluntad para enfrentar las consecuencias de estos fenómenos. Se impone la necesidad de aprovechar los resultados de las investigaciones científicas realizadas y las lecciones de las experiencias de desastres en regiones con similares características.

La parte suroriental de Cuba es la de mayor peligro sísmico y dentro de esta región, Santiago de Cuba es la de mayor nivel de amenaza. La causa de lo anterior es la proximidad a la falla Oriente, límite entre las placas tectónicas de América del Norte y la del Caribe. Desde la fundación de la ciudad de Santiago de Cuba se han generado 22 sismos de gran intensidad en esta estructura (ver tabla 1), estremeciendo fuertemente a esta localidad, causando pérdidas de vidas humanas y cuantiosos daños económicos.

La historia sísmica documental de Cuba comenzó a partir del siglo XVI, donde algunos terremotos destruyeron de forma parcial a la ciudad de Santiago de Cuba. Estos terremotos fueron generados en la zona de fallas Oriente, a lo largo de la costa y la mayoría mar adentro

(Chuy, 1999). La mayor concentración de la actividad sísmica puede ser observada alrededor de Santiago de Cuba donde los terremotos más fuertes han sido sentidos: 1766 y 1852, ambos con intensidad 9,0 MSK, así como, 1932 con 8,0 MSK. El resto del país es afectado con menor frecuencia, destacándose el terremoto de San Cristóbal de 1880, en la antigua provincia Pinar del Río, hoy Artemisa, cuya intensidad máxima alcanzada fue de 8,0 MSK.

**Tabla 1.** Terremotos reportados en la parte suroriental de Cuba con intensidades mayores o iguales que 7,0 (MSK), (Chuy, 1999).

Año	Latitud N	Longitud W	Magnitud	Intensidad	Localidad
1578	(19.90)	(76.00)	(6,8)	8,0	Santiago de Cuba
1580	(19.90)	(76.00)	(5,8)	7,0	Santiago de Cuba
1675	(19.90)	(76.00)	(5,8)	7,0	Santiago de Cuba
1678	(19.90)	(76.00)	(6,8)	8,0	Santiago de Cuba
1682	(19.90)	(76.00)	(5,8)	7,0	Santiago de Cuba
1752	(19.90)	(76.00)	(5,8)	7,0	Santiago de Cuba
1760	(19.90)	(76.00)	(6,8)	8,0	Santiago de Cuba
1766	(19.80)	(76.10)	(7,6)	9,0	Santiago de Cuba
1775	(19.90)	(76.00)	(5,8)	7,0	Santiago de Cuba
1826	(19.90)	(76.00)	(5,8)	7,0	Santiago de Cuba
1842	(19.90)	(76.00)	(6,0)	7,0	Santiago de Cuba
1852	(19.77)	(75.35)	(7,3)	9,0	Santiago de Cuba
1852	(19.50)	(76.25)	(7,0)	8,0	Santiago de Cuba
1858	(19.90)	(76.00)	(6,5)	7,0	Santiago de Cuba
1903	(19.90)	(76.00)	(5,7)	7,0	Santiago de Cuba
1906	(19.65)	(76.25)	(6,2)	7,0	Santiago de Cuba
1914	(19.45)	(76.30)	(6,7)	7,0	Santiago de Cuba
1930	(19.90)	(76.00)	(5,8)	7,0	Santiago de Cuba
1932	19.80	75.80	6,75	8,0	Santiago de Cuba
1947	19.90	75.30	6,75	7,0	Santiago de Cuba
1976	19.87	76.87	5,7	8,0	Pilón
1992	19.62	77.70	7,0	7,0	Cabo Cruz

**NOTA:** Los valores entre paréntesis son estimados. La intensidad se determina por los daños causados y la magnitud mide la energía del sismo.

En la tabla 1 se muestra como promedio de 84.6 años ocurre un terremoto en Santiago de Cuba. El cálculo se hace desde el terremoto de 1678, 1766, 1852 y 1932. Desde 1932 hasta 2017 han transcurrido 85 años. Entonces hay que seguir intensificando los estudios para mitigar del riesgo sísmico.

“Durante el sismo del 3 de febrero de 1932 se reportaron grietas moderadas en el pavimento y la pérdida de sustentación de algunas viviendas en la zona del puerto de Santiago de Cuba, lo cual podría ser un reflejo del fenómeno de la licuación por ser estos licuables” (Fernández *et al.*, 2000).

La pérdida de sustentación del suelo en la zona de la Alameda, durante el terremoto del 3 de febrero de 1932 pudo ser producto a la ocurrencia del fenómeno de la licuefacción del suelo. En el terremoto del 7 de agosto de 1947 y el 20 de agosto de 1852 hubo varios edificios con pérdidas de sustentación en la zona portuaria (Rivera *et al.*, 2003).

Al analizar la zona de la Alameda y el puerto de Santiago de Cuba, los impactos de las fuertes ondas sísmicas producen un aumento de la intensidad, y apareciendo el fenómeno de la licuación. Unas de las condiciones para que aparezca este fenómeno son: presencia de suelos arenosos, con granos redondeados, poca profundidad del nivel freático, intensidades mayores de 8.0 grados y en algunos tipos de arcillas y gravas. Como parte del diseño del procedimiento se encuentra la posible aparición del fenómeno de la licuación de suelo, haciendo un análisis en la información geológica del sitio y las propiedades físico-mecánicas llevado a cabo en el laboratorio.

Según Candebat y Chuy (2012), los estudios de Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo (PVR) en Santiago de Cuba reflejan que la vulnerabilidad es alta en el Consejo Popular Guillermon Moncada, que es donde está ubicada el área objeto de estudio, donde los valores de intensidad sísmica podrían alcanzar los 10 grados en la escala MSK, debido a las características del tipo de suelo, el cual está formado por sedimentos y los niveles del manto freático son superficiales.

Los riesgos a que están expuestas las ciudades, especialmente aquellas localizadas muy cerca de la línea de costa, constituyen uno de los grandes desafíos que enfrenta la humanidad en el siglo XXI (Milanés y Pacheco, 2011).

La ciudad de Santiago de Cuba limita con la línea de costa, aflorando sedimentos blandos debajo de una buena parte de sus edificaciones. La tarea de conservación de ese patrimonio construido es colosal porque se enfrenta a un medio agresivo que incrementa sus acciones con el tiempo, y si a eso se le adicionan los fuertes sismos ocurridos que han dañado las edificaciones del área, entonces aumentarían exponencialmente esta tarea.

Se ha podido notar que a partir del año 2010 hay un mayor interés de las autoridades competentes en las actividades de prevención ante la aparición repentina de estos



fenómenos, con la ocurrencia del terremoto de Haití y posterior a este el del 20 de marzo del propio año en Santiago de Cuba (magnitud 5.5), así como un mayor interés de las personas en la parte oriental del país por tener información acerca de estos fenómenos.

Una vez que un terremoto grande ocurre, el daño puede ser enorme en término humano y económico. Un conjunto de ensayos llevado a cabo en zonas sísmicas, donde están emplazados asentamientos poblacionales e instalaciones sociales y económicas se hace necesario para conocer con más detalle las posibles afectaciones que se producirán ante la ocurrencia de este fenómeno natural extremo y tomar las medidas necesarias encaminadas a la reducción del riesgo sísmico.

El diagnóstico realizado contempló la aplicación de las investigaciones geoelectricas, sísmica de refracción, métodos de microsismos, calas ingeniero- geológicas y la influencia de los suelos de emplazamiento sobre las respuestas dinámicas de los suelos.

**Problema de la investigación.** La incertidumbre existente en cuanto al conocimiento del comportamiento dinámico del suelo que está debajo de una cimentación ante la acción de las cargas dinámicas relevantes.

El **objeto de estudio** está dado por la caracterización del suelo subyacente a la cimentación sometido a la acción de cargas dinámicas.

**Objetivo general:** mediante esta investigación se pretende diseñar un procedimiento que permita estimar el comportamiento del suelo subyacente a la cimentación ante la acción de cargas dinámicas relevantes.

Los **objetivos específicos** trazados son los siguientes:

- Realizar la fundamentación teórica y conceptual del conocimiento y tratamiento de comportamiento de los depósitos de suelos sometidos a cargas dinámicas relevantes, mediante métodos geofísicos y otros métodos.
- Caracterizar la hipótesis, métodos de ensayos, condiciones de suelos y pasos que constituyen el procedimiento para la estimación del comportamiento de suelo ante cargas dinámicas relevantes.
- Validar el comportamiento del suelo subyacente al edificio de la Empresa Comercializadora y Distribuidoras de Medicamentos (EMCOMED) mediante los métodos geofísicos y otros métodos.

Para lograr el objetivo trazado se emplearon los siguientes **métodos de investigación:**

**Método histórico-lógico:** se empleó para conocer la evolución de los métodos geofísicos en las diferentes etapas dirigido a la estimación de las condiciones del suelo, para de esta forma tenerlo en cuenta en la respuesta dinámica de la cimentación

**Método de análisis y síntesis:** se utiliza para la definición del marco teórico conceptual, teórico y metodológico mediante la revisión de bibliografía existente acerca de los diferentes ensayos empleados para el procedimiento, dinámica de suelo y fenómenos inducidos por terremotos.

**Método de observación:** fue realizado junto con el trabajo de campo obteniendo la información de los diferentes ensayos, características superficiales del depósito de suelo, estado del edificio.

**Método de experimentación:** Consiste en la aplicación de ensayos como herramienta fundamental para extraer información del suelo de forma práctica. Usando como base esta información se dan las condiciones para estimar el comportamiento del suelo ante cargas dinámicas relevantes.

**Método de inducción-deducción:** mediante la inducción se hace alusión al caso de estudio del edificio EMCOMED y la deducción se refiere a la respuesta de otros suelos con condiciones geológicas similares.

**Hipotético-deductivo:** Se aplica en la interpretación de los resultados obtenidos en la validación del procedimiento y la respuesta a la hipótesis de la investigación.

En el procedimiento se utilizaron técnicas para el procesamiento de la información, revisión bibliográfica y análisis documental

La utilización de métodos geofísicos en el estudio de depósito de suelo para diseñar un procedimiento mediante el cual se estime el comportamiento del mismo desde el punto de vista dinámico (sísmico), constituye el **campo de acción**.

Se plantea como **hipótesis**, que si se diseña un procedimiento para estimar el comportamiento dinámico de los suelos, fundamentado en la aplicación de ensayos de campo y laboratorio, permitirá estimar su comportamiento debajo de una estructura sometida a la acción de cargas dinámicas relevantes.

Esta investigación se inserta en la estrategia del país encaminada a la mitigación del peligro sísmico en la República de Cuba. Cumple con lo establecido en la Directiva 1 del Presidente

del Consejo de Defensa Nacional. Lo anterior expuesto le da la **actualidad** a esta investigación.

Su **importancia** radica en que será un referente para el estudio de cimentaciones presentes o futuras, permitiendo caracterizar las condiciones de los suelos en el emplazamiento.

La **novedad** consiste en que se establece un procedimiento que a partir de los resultados de las mediciones geofísicas y otros métodos permite caracterizar los suelos desde el punto de vista dinámico, para de esta forma estimar el comportamiento de los mismos

### **Aporte práctico-metodológico**

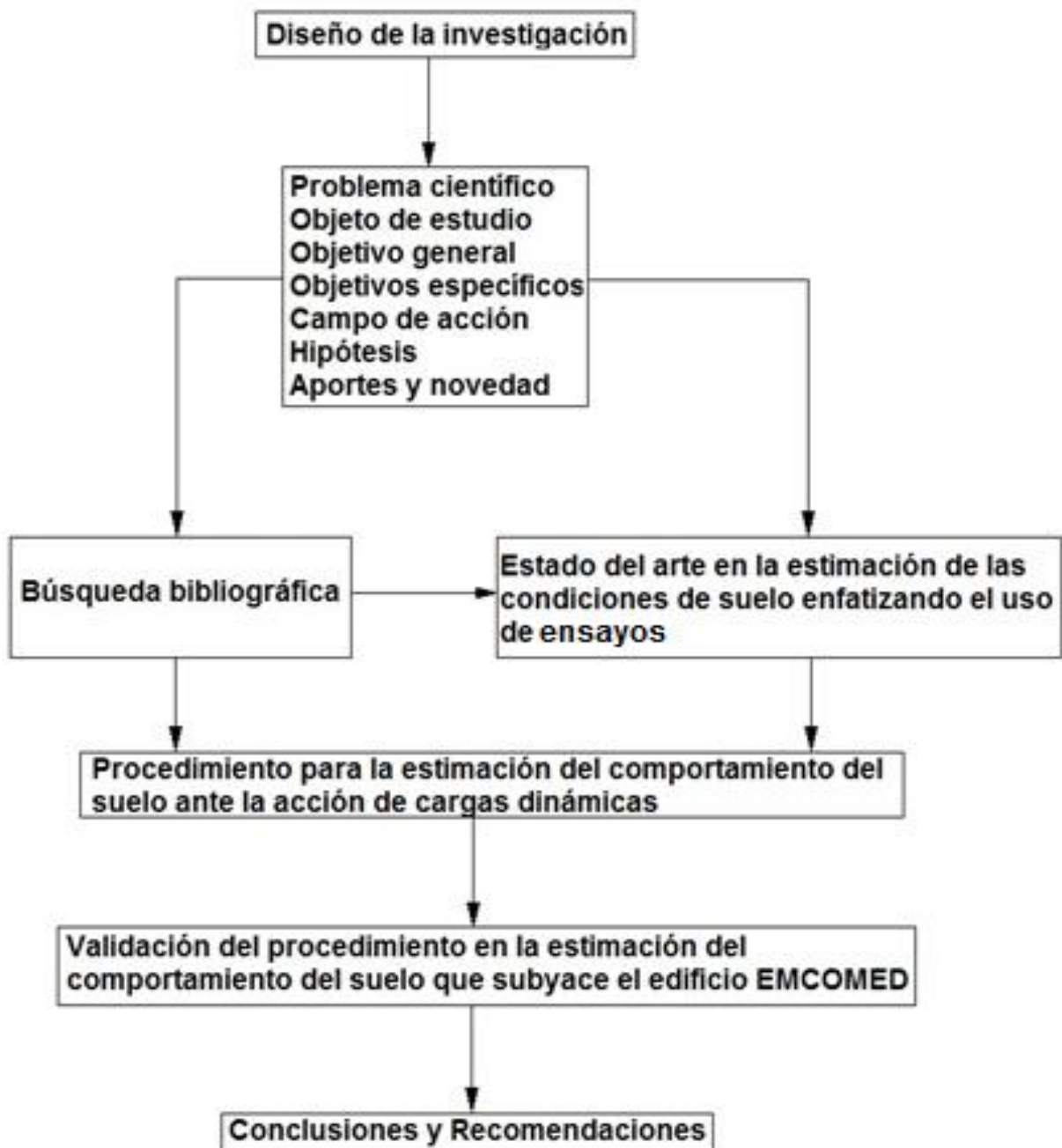
- Actualización y análisis del estado del conocimiento con respecto a métodos y procedimientos para la estimación del comportamiento del suelo en el sitio sometido a cargas dinámicas.
- Un procedimiento para estimar el comportamiento del suelo en el sitio ante cargas dinámicas.
- Se obtienen variables geofísicas como la resistividad del suelo, período del suelo y velocidad de las ondas P, que luego son utilizadas en la caracterización dinámica de suelo.
- Se valora la probabilidad de ocurrencia de la licuación de suelos empleando los resultados de las propiedades físico-mecánicas realizadas por ensayos de laboratorio.

### **Estructura del trabajo:**

**Capítulo I: Estado del arte en la estimación de las condiciones de suelo enfatizando el uso de los métodos geofísicos.** El capítulo aborda diferentes conceptos, métodos, fenómenos inducidos por terremotos y pasos para un procedimiento de forma general cuando un suelo está sometido a la influencia de cargas dinámicas relevantes.

**Capítulo II: Procedimiento para la estimación del comportamiento del suelo ante la acción de las cargas dinámicas relevante.** Se diseña un procedimiento por pasos para estimar el comportamiento del suelo ante la acción de cargas dinámicas para demostrar la probabilidad de ocurrencia de fenómenos inducidos por terremotos como la licuación y deslizamientos de suelos, además se analiza la dinámica de suelo enfatizando el efecto de sitio de las ondas sísmicas.

**Capítulo III: Validación del procedimiento en la estimación del comportamiento del suelo que subyace el edificio EMCOMED.** Se validó el procedimiento planteado en el capítulo número dos, demostrando la limitación a la licuación de suelo y las condiciones favorables para que surja el efecto de sitio al paso de las ondas sísmicas.



# **CAPÍTULO I. ESTADO DEL ARTE EN LA ESTIMACIÓN DE LAS CONDICIONES DE SUELO ENFATIZANDO EL USO DE ENSAYOS DE SUELO**

## **Introducción**

Este capítulo es considerado la base teórica de la investigación, abordándose diferentes conceptos básicos de la ingeniería geotécnica, con el objetivo de estimar las condiciones de los suelos donde están emplazadas las edificaciones situadas en zonas sísmicas. También se trata el empleo de la prospección geofísica través de los métodos geofísicos y calas ingeniero-geológicas para los estudios del suelo, con el objetivo de ver cómo influyen las características geológicas sobre las edificaciones bajo acción de cargas dinámicas relevantes.

El tema tratado no va dirigido solamente a los profesionales de la geofísica, sino también a los interesados, como geólogos, arquitectos, ingenieros civiles y otros especialistas, con un único objetivo que es el de resolver incógnitas geológicas y geotécnicas que se presentan en el terreno que soporta el peso de la estructura de una edificación bajo estudio.

### **1.1 Relación entre la geofísica y la arquitectura**

Se parte primero de definir dos conceptos y ver qué puntos de coincidencias existen entre ellos. A partir de esa relación se proyecta un trabajo conjunto encaminado a resolver o tomar decisiones acerca de los problemas existentes en cualquier tipo de obra o sitio.

Siendo así, definimos como arquitectura al arte y la ciencia de proyectar y construir edificaciones, plantas industriales e infraestructuras públicas y otras obras o sistemas semejantes (Análogo 1). Todas estas obras son proyectadas y construidas sobre el suelo.

Por otra parte la geofísica es la ciencia que se ocupa del estudio de los suelos en cuanto a sus principios físicos se refiere; su objetivo comprende el estudio e investigación de los fenómenos que se relacionan a la estructura, la historia de la evolución del planeta Tierra y condiciones físicas del mismo. Esta ciencia, en específico, se ocupa de examinar los fenómenos naturales y su relación en el mundo terrestre interior; estando entre estos, los flujos de calor, el campo magnético terrestre, la fuerza de la gravedad y la propagación de ondas.

La arquitectura y la geofísica tienen un punto en común, y este es el suelo. Por lo tanto para saber cuáles son las causas que inciden en el deterioro de un determinado patrimonio construido, es necesario realizar un estudio que monitoree las condiciones del suelo. De esta

forma se toman las medidas necesarias y decisiones encaminadas a la conservación de una obra arquitectónica.

Y de eso se trata, aplicar un estudio de carácter geofísico, específicamente en zonas sísmicas, para estimar cómo se comporta el suelo ante un evento sísmico extremo, así como las acciones a implementar para mitigar los posibles daños de este evento.

## **1.2 Evolución de los métodos geofísicos**

La geofísica es una ciencia relativamente joven a nivel global, la que tuvo un fuerte avance a mediados del siglo XX. Sus objetivos principales son ayudar a localizar y explorar yacimientos de petróleo, gas y minerales, detección de mantos acuíferos, evaluar condiciones geotécnicas favorables para erigir construcciones, apoyar las investigaciones arqueológicas y detectar posibles áreas de riesgos y de desastres naturales.

Los métodos geofísicos se utilizan para analizar las características geotécnicas del suelo. El objetivo es evaluar las características del terreno a partir de magnitudes físicas que son adquiridas principalmente en la superficie. Los métodos geofísicos son rápidos y económicos, destinados para investigar áreas extensas o alineaciones de gran longitud.

Estos métodos deben ser considerados métodos complementarios, que deben estar acompañados por prospecciones directas como las calas ingeniero-geológicas, las cuales dan en profundidad las características litológicas, propiedades y espesor de los estratos en el suelo investigado.

Los métodos geofísicos se dividen en cuatro grupos: sísmicos, eléctricos, electromagnéticos y gravimétricos. Pero para este tipo de estudios son empleados con mayor frecuencia y mejores resultados los 3 primeros.

### **1.2.1 Métodos sísmicos**

Estos métodos sísmicos se subdividen en dos grupos: la sísmica activa y la pasiva. El método de la Sísmica de Refracción y Reflexión (sísmica activa) se basa en la distribución de velocidades sísmicas originadas por una fuente artificial (golpeo o explosión sobre la superficie del suelo). La velocidad sísmica aumentará en aquellos materiales de mayor densidad permitiendo distinguir entre distintos tipos de materiales. La sísmica pasiva consiste en determinar la distribución de los valores de la velocidad de transmisión de las ondas de cizalla ( $V_s$ ) a través del terreno hasta varias decenas de metros de profundidad. Este proceso se lleva a cabo a partir del análisis espectral de las ondas superficiales del tipo Rayleigh,

incluidas en el ruido sísmico ambiental producido por el tráfico y por otras actividades características de los medios urbanos. Las aplicaciones de estos tipos de métodos son las siguientes:

En relación al medio ambiente se utilizan en la definición de zanjas y suelos de relleno y para delimitar y ubicar vertederos; en la geología e hidrogeología se emplea para localizar el nivel freático y la estratigrafía del terreno; en las obras civiles se emplean para la detección de las condiciones del terreno, detección de cavidades y fisuras en el terreno, y por último en la excavabilidad del terreno en la estabilidad de taludes.

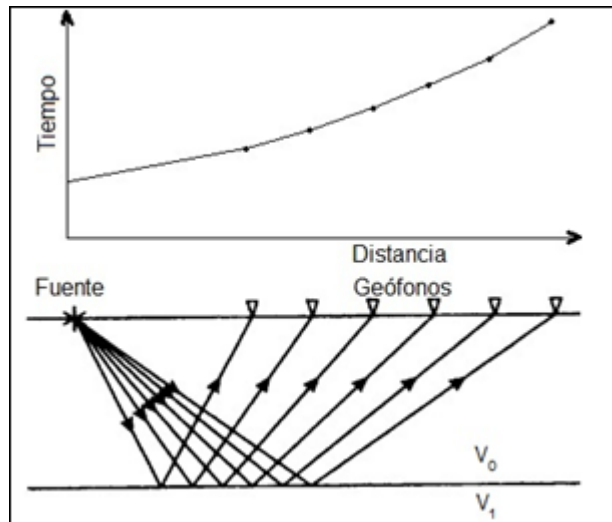
### **1.2.1.1 Método de sísmica de reflexión**

La sísmica de reflexión es una técnica ampliamente utilizada en exploración geofísica que permite obtener información del subsuelo controlando los tiempos de llegada de ondas elásticas (pulsos), generadas artificialmente mediante explosiones, impactos mecánicos o vibraciones cerca de la superficie. El retorno de estas ondas elásticas a la superficie después de reflejarse en las distintas interfaces, se registra en sismómetros o receptores. Por tanto el objetivo básico de la sísmica de reflexión es obtener información sobre la arquitectura interna del subsuelo, deducir información (propiedades mecánicas) acerca de las estructuras (rocas) en profundidad, especialmente de las distintas capas que lo constituyen, a partir de los tiempos de llegada de las ondas y extraer una imagen que lo represente. También es posible obtener información de las amplitudes y frecuencias de estas ondas.

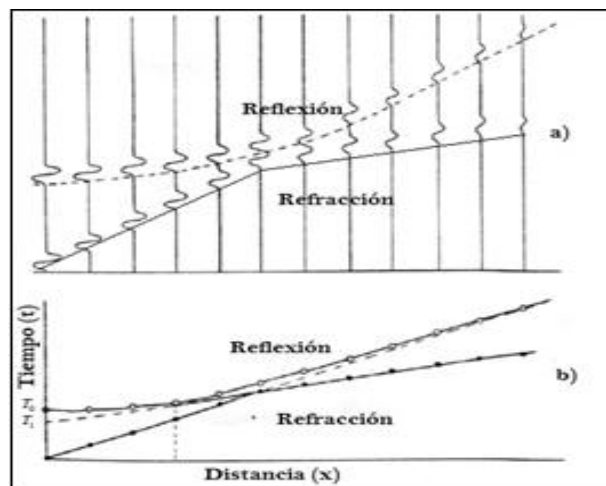
En la Fig. 1.1 se observa el esquema de la sísmica de reflexión. Al generarse en la superficie un impulso desde la fuente, el rayo choca con la interface de dos medios ( $V_0$  y  $V_1$ ), llega a la superficie donde están los geófonos o sismómetros, la señal mecánica se transforma en eléctrica, luego a analógica y por último al ser enviada al sismógrafo es convertida en digital. Esta última se va observar en forma de un sismograma, para el cual son tomadas las primeras llegadas de la onda longitudinal P y luego construir el perfil. Este tipo de investigación por la gran profundidad de estudio en detectar estructura geológica es poco utilizada en la sísmica somera. Su uso es muy empleado en la búsqueda y exploración de petróleo, para el estudio de deslizamientos profundos, etcétera.

Tanto el método sísmico de refracción como el de reflexión son procesos que se gobiernan por las leyes de la óptica (las ondas se comportan como rayos luminosos). Las ondas refractadas y reflejadas no tienen el mismo comportamiento en los registros sísmicos. En la

Fig. 1.2 se muestra que en la refracción, la onda directa y refractada dibuja una trayectoria recta, mientras que en la reflexión esta trayectoria es una hipérbola.



**Fig.1.1.** Esquema de la trayectoria de los rayos de reflexión sísmica (Reynolds, 2011).



**Fig. 1.2.** a) Sismograma de la reflexión y refracción; b) Esquema de la refracción y reflexión (Chelotti *et al.*, 2010).

### 1.2.1.2 Método de sísmica de refracción

El método de sísmica de refracción consiste en obtener primeras llegadas de las ondas longitudinales en un sismograma, a partir de la excitación del terreno en la superficie por impactos de pequeñas cargas explosivas, martillo, caída de peso o viradores. Una vez golpeado el terreno parte de las ondas longitudinales se desplazan por la interface entre dos medios y sube hasta la superficie donde están los geófonos o receptores, estos reciben esta



señal mecánica del terreno para convertirla en eléctrica, por un mecanismo de un imán con una espira. La señal eléctrica es transmitida hacia el sismógrafo, donde se transforma en digital y se obtiene los registros en forma de sismogramas, para los cuales son visualizados los primeros arribos de las ondas longitudinales P. Cada sismograma constituye un fichero que será extraído del equipo de medición, procesándose en una computadora que posee un programa especializado para obtener un perfil sísmico dividido por capas de velocidades de las ondas longitudinales del terreno estudiado.

Estas velocidades deben correlacionarse con el tipo de suelo y la roca existente, con el objetivo de hacer la interpretación, haciendo una caracterización de las condiciones geológicas existentes. Esta caracterización conduce a la investigación científica, donde se emiten criterios de cómo influyen estos suelos sobre las edificaciones al ser sometidos por cargas dinámicas.

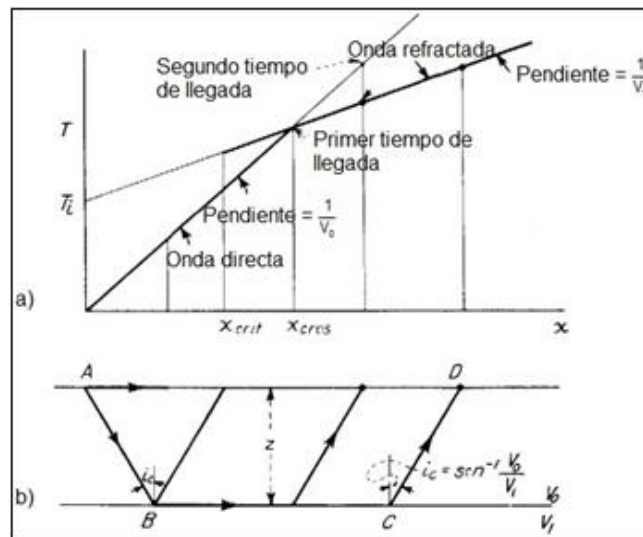
La Fig. 1.3 a) es la representación en un sismograma, donde la primera recta es la onda directa y simboliza la primera capa, la segunda recta la segunda capa y la primera onda refractada. En el caso b) se muestra un esquema de la trayectoria de los rayos en la refracción sísmica, desde A (fuente) en dirección B se genera la onda directa, el rayo parte desde A hacia la interface de dos medios ( $V_0$  y  $V_1$ ) incidiendo con un ángulo crítico ( $i_c$ ) en relación a la normal, se desplaza por la interface y se refracta en la superficie, esta constituye la primera onda refractada.

“La sísmica de refracción fue la primera técnica usada en la prospección del petróleo. A principio de 1923 la refracción fue introducida en la exploración de hidrocarburo. Por los siguientes 7 años este método fue aplicado en esta dirección, esto fue responsable del éxito espectacular de los geofísicos en encontrar domos salinos someros del Golfo de México, mucho de ellos asociados con grandes acumulaciones de petróleo” (Dobrin y Savit, 1998).

Lo anterior expuesto muestra que el método de refracción sísmica es una herramienta muy fuerte utilizada para la detección de cuerpos anómalos en el terreno, con resultados que se ajustan a la realidad, es decir al comportamiento real del terreno encaminado a lograr el objetivo de un trabajo de prospección geofísica.

“La técnica de refracción sísmica había sido usada por primera vez por algunos sismólogos en determinar la estructura interna de la tierra por medio de registros de terremotos. Tal información hizo posible la distribución de las velocidades de las ondas sísmicas en función de la profundidad, entonces obtener pistas acerca de la constitución interna de la tierra. En

1912 Gutenberg había descubierto el núcleo de la tierra y había calculado su profundidad (3000 km)” (Dobrin y Savit, 1998).



**Fig. 1.3.** Esquema de la sismica de refracción (Chelotti *et al.*, 2010).

### 1.2.1.3 Método de sismica pasiva

La sismica pasiva, que consiste en determinar la distribución de los valores de la velocidad de transmisión de las ondas de cizalla ( $V_s$ ) a través del terreno hasta varias decenas de metros en profundidad. Este proceso se lleva a cabo a partir del análisis espectral de las ondas superficiales del tipo Rayleigh, incluidas en el ruido sísmico ambiental producido por el tráfico y por otras actividades características de los medios urbanos. En la Fig. 1.3 se muestra un arreglo de geófonos en la ciudad de Madrid. El importante significado geotécnico de los valores de  $V_s$  del terreno justifica el interés de este tipo de estudios, especialmente en zonas urbanas en las que se proyecten o ejecuten obras subterráneas de cierta importancia. Dado el elevado nivel del ruido sísmico ambiental y otras interferencias de diversa naturaleza no es factible la aplicación de métodos geofísicos convencionales en este tipo de medios (Análoga 2).

El objetivo del método de sismica pasiva es evaluar de forma indirecta y no destructiva la consistencia del terreno, determinando para ello la velocidad  $V_s$  de los materiales a partir del análisis de las ondas superficiales del tipo Rayleigh incluidas en el ruido sísmico ambiental.



**Fig. 1.4.** Ejecución de mediciones sísmicas en Madrid (Análoga 2).

### **1.2.2 Métodos eléctricos**

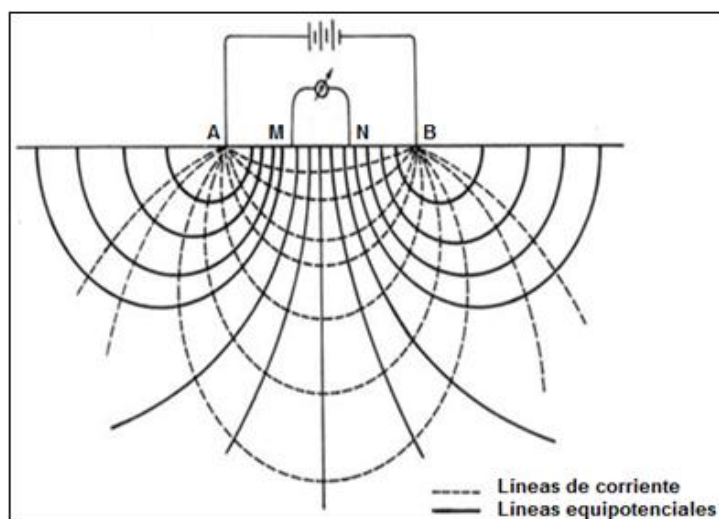
Los métodos eléctricos son la modalidad de investigación geofísica más antigua y la utilizada por geólogos, geofísicos e ingenieros para distinguir y caracterizar el subsuelo. Los métodos eléctricos se basan en la medición de las propiedades eléctricas del subsuelo. Todos los materiales de la Tierra oponen resistencia al flujo de la corriente eléctrica. Esta propiedad se llama resistividad geoelectrica, la cual nos permite diferenciar entre distintos materiales.

Los métodos eléctricos surgen a partir del descubrimiento de Watson en 1746 planteando que la tierra actuaba como un conductor, notó una corriente errática que pasaba entre dos electrodos clavados en la superficie, distanciados uno del otro a varios kilómetros. El uso comercial de los métodos eléctricos se debe a Marcel y a Conrad Schlumberger en 1913 durante la primera guerra mundial, en la detección de minas y boyas marinas (Álvarez, 2003).

Los métodos más utilizados son el sondeo eléctrico vertical (SEV) y la tomografía eléctrica o geoelectricidad.

#### **1.2.2.1 Método de sondeo eléctrico vertical (SEV)**

Para poder identificar contrastes de la resistividad geoelectrica a distintas profundidades, es decir, la realización de un sondeo eléctrico vertical, se realiza mediante una formula, así: intensidad ( $I$ ), por medio de unos electrodos (AB), el cual nos permite medir una diferencia de potencial ( $\partial V$ ) entre dos electrodos (MN). La resistividad geoelectrica se obtiene por aplicación de la Ley de Ohm según la siguiente expresión:  $R = K\partial V / I$  donde  $K$  =configuración geoelectrica. La Fig. 1.5 muestra un esquema del funcionamiento del SEV.



**Fig. 1.5.** Esquema básico del Sondeo Eléctrico Vertical (Análogo 3).

### 1.2.2.2 Método de tomografía eléctrica

La tomografía eléctrica es una técnica geofísica de modelación 2-D para el estudio del subsuelo, que consiste en determinar la distribución de un parámetro físico (resistividad eléctrica) dentro de un ámbito espacial limitado, a partir de un número muy elevado de medidas realizadas desde la superficie del terreno (López, 2000).

El método de la tomografía eléctrica ha tomado un desarrollo notable en estos últimos años. Hay varios ejemplos que demuestran lo anteriormente expresado a través de las contribuciones de varios autores: Corwin y Lesch (2003), Besson *et al.* (2004), Samuëlian *et al.* (2005), Wentthoth *et al.* (2006), entre otras. Una de las ventajas radica en ser una técnica no nociva para el medio ambiente y de rápido avance. Los modernos equipos utilizados, así como los softwares permiten obtener resultados satisfactorios que caracterizan las condiciones reales del subsuelo en un área dada.

### 1.2.3 Métodos electromagnéticos

Esta es una de las técnicas más empleadas para la detección de objetos metálicos. Este tipo de prospección se realiza con dos bobinas de cobre una llamada bobina transmisora y otra bobina receptora separadas a una distancia determinada. Se aplica una corriente alterna sobre la bobina trasmisora creando un campo magnético alterno llamado campo primario, que a su vez se transmite por todas partes incluido al subsuelo. Este campo magnético alternativo induce una corriente alterna a través del conductor creando un nuevo campo magnético llamado campo secundario. Lo que la bobina receptora recibe es la combinación del campo primario y secundario. Ambos campos magnéticos a su vez inducen una corriente alterna a

través de la bobina receptora. Esta corriente es medida la cual es usada para determinar la intensidad del campo magnético combinado y la conductividad eléctrica en el punto donde se ha producido la medición.

Las aplicaciones de este método son las siguientes: en medio ambiente tiene cuatro, la primera consiste en la localización de bidones y/o depósitos enterrados, la segunda acerca de la detección de plumas de contaminación, la tercera en la localización de servicios enterrados y la cuarta se usa para delimitar vertederos; arqueología se aplican para la localización de estructuras antiguas, localización de cementerios y por último en vestigios ancestrales; obra civil se emplea para la localización de servicios conductores metálicos, localización de servicios magnéticos, detección de cavidades y fisuras del terreno y en el control de mallas metálicas.

### **1.2.3.1 Método del georadar**

Es uno de los métodos electromagnéticos, no invasivo de análisis de materiales basado en la transmisión de ondas electromagnéticas de banda ultra ancha en los materiales. Una parte de la onda electromagnética se refleja cuando se alcanza un límite entre dos materiales con diferentes propiedades eléctricas. La señal reflejada se graba en la fuente de la onda electromagnética y se muestra para el operador y con frecuencia registrada para su posterior análisis.

Las aplicaciones del georadar de subsuelo como técnica ecológica, no destructiva y de alta resolución están ampliamente documentadas, también por la gran versatilidad que lo caracteriza. Uno de los desafíos a los que se enfrenta esta técnica es ser capaz de obtener información a mayor profundidad de la que se obtiene actualmente, así como métodos de representación de los datos obtenidos que sean más fáciles de interpretar.

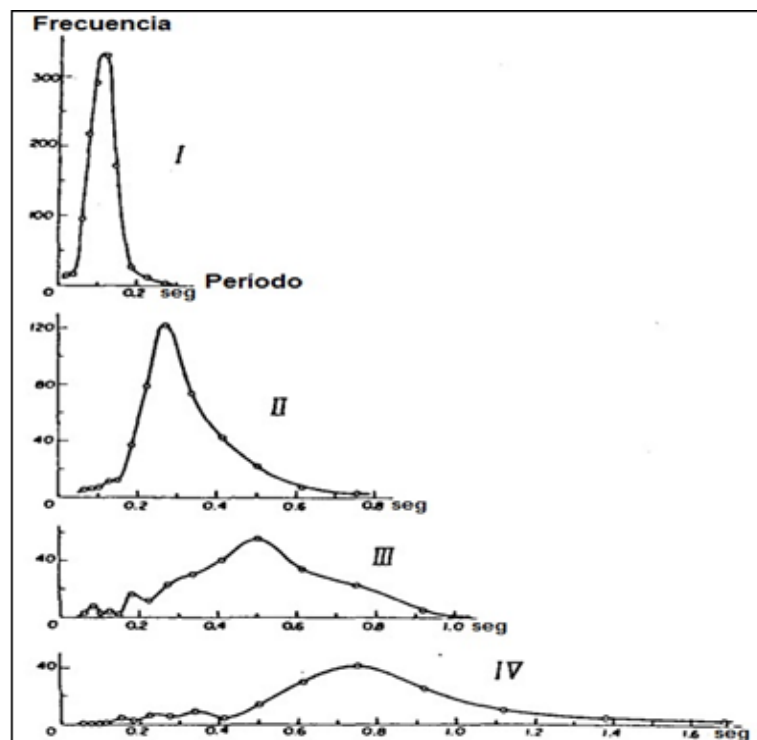
Algunas de las aplicaciones son: medio ambiente en la localización de bidones y/o depósitos enterrados, detección de plumas de contaminación, localización de servicios enterrados y delimitación de vertederos; geología y medio ambiente se aplica para la localización del nivel freático, estratigrafía del terreno e intrusión de aguas salobres y marinas; arqueología tiene tres aplicaciones la primera consiste en la localización de estructuras antiguas, la segunda permite la localización de cementerios y la tercera en vestigios ancestrales; obra civil tiene seis aplicaciones que se componen de la localización de servicios enterrados metálicos y no metálicos, detección de cavidades y fisuras del terreno, control de mallado metálico, control del pavimento en carreteras, fugas de agua y patologías en la construcción.

### 1.2.4 Método de los microsismos

Los microsismos son vibraciones generadas por eventos artificiales producto de la actividad humana tales como tráfico, maquinaria industrial y explosiones de dinamita. Están compuestos principalmente por ondas de Rayleigh y S son de período corto (Aki, 1957 y Akamatsu, 1961).

El rango de períodos para medición de microsismos es menor a 1 ó 2 segundos. Sin embargo, existe una excepción en Ciudad de México, en donde microsismos de período mayor a 5 segundos han sido originados por acción humana debido a la existencia de sedimentos muy blandos (Seo, 1995).

Kanai y Tanaka (1961) concluyen que el período predominante de un movimiento sísmico está muy relacionado con el período más frecuente de los microsismos y que el registro de microsismos en superficie permite obtener el período de resonancia que se obtiene con el sismo. Además, en lugares en los que la curva de distribución para microsismos tiene un solo pico, dicho período coincide claramente con el período predominante de los movimientos sísmicos. La Fig. 1.6 es un ejemplo que muestra una buena correlación de las curvas de frecuencia-período entre el movimiento sísmico fuerte y los microsismos.



**Fig. 1.6.** Comparación de la relación frecuencia-período entre sismos y microsismos (Kanai y Tanaka, 1961).

Lermo y Chávez-García (1993) hicieron un mapa detallado de los períodos dominantes, así como de factores de amplificación para la Ciudad de México, usando registros de movimientos fuertes y microsismos como se muestra en el anexo 1.1. Usaron la relación empírica entre el período dominante y amplificaciones relativas en un rango de períodos entre 0,5 a 2 sec., como se muestra en el anexo 1.2. Indicaron que los períodos dominantes fueron controlados principalmente por la velocidad de ondas S, y no por el espesor de depósitos sedimentarios.

Stewart *et al.* (1995) trazaron el mapa de contorno de la aceleración horizontal máxima del sismo de Northridge, California de 1994 tal como se muestra en el anexo 1.3. Los datos de aceleraciones extremadamente altas observadas en la presa de Tarzana y Pacoima se excluyeron en la figura debido a los posibles efectos de amplificación topográfica en estos sitios. Los contornos indican algunos efectos de directividad en la dirección Norte (Stewart *et al.*, 1995) así como posibles efectos de sitio en algunos lugares, tales como Santa Mónica, Sherman Oaks, entre otros. También sugirieron las diferencias significativas de aceleraciones pico entre roca y suelo, incluso a distancias cortas.

Desde finales de los años cincuenta en Japón se han realizado numerosas publicaciones sobre medidas de los microsismos y recientemente en todo el mundo. Las ventajas de usar microsismos o ruidos ambientales del suelo para evaluar efectos de sitio durante un terremoto pueden ser invaluable, siempre y cuando los resultados sean fiables desde el punto de vista teórico y estable en la práctica.

Recientemente se han desarrollado, aplicado y probado metodologías para el análisis de los microsismos que buscan la determinación de parámetros dinámicos de los suelos; entre las más investigadas están el período fundamental del suelo y su factor de amplificación, y otros menos explorados han sido la profundidad a basamento y las velocidades de la onda S.

Estas metodologías se pueden clasificar en tres según el número de estaciones de observación involucradas en los análisis:

- Método 1. Observación con arreglos de sensores y registro simultáneo.
- Método 2. Observación con una estación de referencia en roca.
- Método 3. Observaciones con una sola estación (usando una componente o tres componentes del movimiento).

#### **1.2.4.1 Método 1. Observación con arreglos de sensores y registro simultáneo**

Consiste en la observación de los microsismos a través de arreglos, desarrollados para conocer la estructura del subsuelo y la naturaleza de la propagación de los microsismos. Los trabajos pioneros fueron los de Aki (1957), Toksöz (1964) y Lacosset *et al.* (1969).

Este método se ha empleado en Cuba para estudios de suelo en todo el país. Un ejemplo a citar fueron los trabajos realizados en el área de la nueva fábrica de cemento en Santiago de Cuba en el año 2012 por un grupo de especialistas de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA), encabezado por Martínez (2012). Este proceso se llevó a cabo a partir del análisis espectral de las ondas superficiales del tipo Rayleigh, incluidas en el ruido sísmico ambiental. Se obtuvieron perfiles 2D de la distribución de los suelos mediante las velocidades de las ondas S por capas.

#### **1.2.4.2 Método 2. Observación con una estación de referencia en roca**

De igual forma que se hace con los movimientos fuertes y débiles, esta metodología busca compensar los efectos de fuente y trayectoria. Esta comparación supone que las ondas sísmicas no sufren los efectos de amplificación en roca o que éstas pueden ser despreciables. Esta metodología requiere de un sitio de referencia óptimo en cercanías de la ciudad (o en cercanías del sitio de medición).

El procedimiento más común, introducido por Borchardt (1970), es dividir el espectro observado en el sitio en cuestión por el espectro en un sitio de referencia. Si los dos sitios tienen efectos similares de fuente y trayectoria y, en el sitio de referencia hay una respuesta de sitio despreciable, el cociente espectral resultante corresponde a una estimación del efecto de sitio.

Una aplicación de este método tuvo lugar durante los trabajos de “Microrregionalización sísmica de la ciudad de Santiago de Cuba” (González *et al.*, 1985). Por aquel tiempo el trabajo tuvo gran impacto en la ciencia cubana ya que por primera vez se realizaba un trabajo de esta envergadura en el país, logrando una mayor precisión de las máximas aceleraciones del suelo.



### **1.2.4.3 Método 3. Observaciones con una sola estación (usando una componente o tres componentes del movimiento).**

En términos de costos este es el más barato de los tres métodos, no sólo porque sólo usa un sensor (de tres componentes), sino porque no requiere de un sitio de referencia, que a veces puede no existir en cercanías de entornos urbanos sobre llanuras sedimentarias (p. ej. New Madrid, Field & Jacob, 1995). Este es el caso de ciudades como Palmira y Candelaria en el Valle del Cauca.

Nakamura (1989) introdujo una metodología novedosa basada en que la relación espectral entre las componentes horizontales y la vertical, registradas en un mismo sitio, podían considerarse como la función de transferencia del suelo. Como se verá más adelante, esta función de transferencia está relacionada con la función de transferencia de las ondas SH. Konno y Ohmachi (1998) con base en argumentación teórica sobre la naturaleza de los microsismos han presentado una modificación a la metodología de Nakamura, basados en argumentación teórica sobre la influencia de las ondas R en los microsismos, y en especial, en el cociente espectral H/V.

Esta variante de los microsismos es la que se utiliza en el presente trabajo, donde se ha utilizado también en numerosas investigaciones y trabajos de tesis doctorales en el CENAIIS. Un ejemplo de estos tipos de trabajos son las investigaciones aplicadas en la fábrica de acumuladores de Manzanillo (Hernández *et al.*, 2014), donde trabajaron un grupo de especialistas del CENAIIS. Como resultado se obtuvo que el valor de período obtenido en el suelo nos indica que es un suelo rígido o sea que sus valores son menores 0.3 s., esto corrobora los valores obtenidos de  $V_P$  y  $V_S$  de las mediciones geofísicas y del elevado número de golpes obtenido de los ensayo de laboratorio SPT hecho por la ENIA-Holguín.

## **1.3 Uso de los métodos geofísicos en Cuba**

En nuestro país los métodos geofísicos antes de 1959 eran prácticamente desconocidos. La aplicación de estos surge de la necesidad de explorar el territorio nacional, resaltando el esfuerzo extraordinario del gobierno revolucionario.

“Para la implementación de estos métodos es necesario destacar la carrera de geofísica, que desde 1963 ha contribuido con el conocimiento y graduación de varios centenares de ingenieros geofísicos cubanos y de otros países” (Miró, 2011). También se imparten cursos de

diplomado y maestría, así como el asesoramiento a especialistas para un mejor desempeño en sus investigaciones científicas.

Miró y Pérez (2011) en su artículo plantean que “sería muy difícil enumerar, todos los aportes que han hecho en Cuba los egresados de la Escuela de Ingeniería de Geofísica, no obstante deben ser resaltados algunos logros significativos”, tales como:

- La realización de importantes estudios sobre la estructura geológica profunda del territorio cubano para la prospección petrolera.
- La detección de anomalías vinculadas a la ubicación de yacimientos minerales metálicos y no metálicos a lo largo de todo el país.
- La búsqueda y hallazgo de agua subterránea como fuente de abasto para diferentes fines.
- El estudio del subsuelo en distintas regiones del territorio nacional, con fines ingeniero-geológicos para el establecimiento de obras estructurales.
- La realización de importantes contribuciones vinculadas al estudio y protección del medio ambiente.
- Las asesorías docentes brindadas en diferentes países para la formación y superación de profesionales en el campo de la ingeniería geofísica.
- El desarrollo de algunos softwares originales propios y la exploración de otros extranjeros para el procesamiento matemático y la cartografía digital de la información geológica y geofísica.
- La búsqueda y el exitoso hallazgo de los restos del guerrillero heroico Ernesto Che Guevara y sus compañeros de guerrilla caídos en Bolivia.

Las investigaciones geofísicas demuestran que su desarrollo se inserta a los niveles internacionales, también los conocimientos son expandido a los de los países subdesarrollados como una forma de colaboración. A pesar de las limitaciones, se han realizado innovaciones científicas para resolver la carencia de equipos y softwares.

## 1.4 Riesgo, vulnerabilidad y peligro sísmico

Según Barbat (1998), el riesgo se define como las pérdidas esperadas que sufren las estructuras durante el lapso de tiempo que permanecen expuestas a la acción sísmica; dicho lapso de tiempo se denomina período de exposición o período de vida útil de las estructuras.

El análisis del riesgo incluye el análisis de la amenaza, de la vulnerabilidad y el costo de las afectaciones. El análisis de la vulnerabilidad es considerado como parte del análisis de Riesgo. Mediante la fórmula  $R=A*V*C$ , se muestra la dependencia lineal de los cuatro factores: R es el riesgo, A la amenaza, V vulnerabilidad y C el costo económico.

“Durante los últimos 30 años las pérdidas de vidas humanas en el mundo han aumentado progresivamente, posiblemente debido al crecimiento rápido en zonas urbanas vulnerables y a que los procesos de desarrollo han causado destrucción ambiental en zonas vulnerables. Los desastres aumentan la pobreza porque dañan sustentos rurales y urbanos, así como capital, social y productivo. Los daños tienen un impacto a largo plazo, sobre el crecimiento macroeconómico y la infraestructura social, afectando el desarrollo de los países afectados y reduciendo la eficacia de la ayuda que presta el Banco en la región” (Cardona, 2005).

Para mitigar el riesgo sísmico es necesario detectar a fondo todas las vulnerabilidades presentes en las edificaciones y en las personas, con vista a realizar acciones que fortalezcan la continuidad de los edificios y mejor actuación de esas personas en caso de un evento sísmico extremo.

Los movimientos que se producen en la superficie de la tierra generados por un sismo, puede conformar un riesgo geológico, que podría afectar la actividad humana dependiendo de varios factores como la intensidad del sismo, características del suelo, condiciones de las edificaciones, preparación de las personas ante esta emergencia sísmica.

La mitigación del riesgo sísmico constituye una parte importante para disminuir los impactos de los desastres provocados por un evento de mediana a gran intensidad. Para reducir este riesgo es necesario que el propio hombre sea quien tome conciencia de enfrentarlo de forma positiva, tomando en cuenta que el peligro está latente y se debe llevar a cabo una serie de acciones dirigido a disminuir las vulnerabilidades presentes en el medio.

“La vulnerabilidad es el grado de daño o pérdidas potenciales en un elemento o conjunto de elementos como la consecuencia de la ocurrencia de un fenómeno de intensidad determinada” (González de Vallejo *et al.*, 2002). Muchas veces la estructura aparenta ser



ciudadelas sin una planificación física adecuada. Existe una inadecuada concientización por parte de los decisores para que se apliquen las estrategias de forma preventiva en la reducción de desastres.

“Hoy Cuba cuenta con un pueblo organizado, educado y solidarizado con el enfrentamiento a situaciones de peligros inminente (huracanes, depresiones tropicales, TLS, intensas lluvias, inundaciones, penetraciones del mar, incendios, etcétera) gracias al amplio programa de preparación y capacitación que sobre estos temas se han llevado a cabo, sin embargo debemos lograr ese mismo nivel de percepción sobre el peligro y los riesgos asociados a otros fenómenos naturales como la sequía, los deslizamientos y los terremotos” (Guaschet *et al*, 2014).

Se tiene todas las cualidades abordadas en el párrafo precedente, a pesar de que Cuba es un país en vía de desarrollo, pero deben intensificarse más las medidas preventivas ante un desastre natural que pueda causar un terremoto de intensidad extrema. Es sabido que el último desastre dejado por un evento sísmico fue el del año 1932, trayendo como consecuencia la destrucción del 80 % de las construcciones, 14 muertos, más de 200 heridos, 6.75 de magnitud Richter y una intensidad en la escala MSK de 8.0. Este hecho quedó en el pasado y la gran mayoría de los habitantes del país no habían nacido para esa época, por lo que no está en la mente de ellos que ocurra un terremoto de gran magnitud capaz de producir un desastre mucho mayor por la utilización de malas prácticas en terrenos fundamentalmente susceptibles a fenómenos como la licuación y deslizamientos, que hacen vulnerables a sus estructuras y al individuo en sí.

### **1.5 Fenómenos inducidos por los terremotos**

Un terremoto no es más que la relajación repentina de la energía producto del choque entre dos bloques dentro del interior de la tierra. Esta energía se disipa en forma de energía química y ondas elásticas. Cuando llegan estas últimas a la superficie pueden provocar grandes movimientos causantes de daños al patrimonio de una región determinada.

Al llegar las ondas de cuerpo (primaria P y secundaria S) y superficiales (Love y Rayleigh) a un sitio determinado el suelo oscila a determinada amplitud. En dependencia de las condiciones del suelo fundamentalmente se comienza a generarse otros fenómenos llamados inducidos. Como ejemplos de los fenómenos inducidos, contamos con la licuación y los deslizamientos de suelos. Otros ejemplos de estos efectos secundarios, aunque no

directamente del terreno son los grandes incendios, escapes de gases y otras sustancias peligrosas.

## **1.6 Dinámica de suelo**

### **1.6.1 Propagación de ondas sísmicas**

Una onda mecánica se puede definir como la propagación de una perturbación, generalmente de tipo vibratorio a través de un medio elástico. También existen ondas que no necesitan de un medio para propagarse, llamadas ondas electromagnéticas. En esta tesis nos referiremos solamente a las ondas mecánicas y en particular a las ondas sísmicas, que se propagan a través de las rocas y del suelo.

Las características del movimiento ondulatorio son modificadas por las propiedades dinámicas del medio a través del cual se propagan las ondas. En el caso que interesa, el medio de propagación de las ondas sísmicas es el suelo, el cual filtra el movimiento y lo transforma, amplificando las componentes de ciertas frecuencias y atenuando otras, haciéndolo así, potencialmente más destructivo para aquellas estructuras cuyas frecuencias propias son cercanas a las frecuencias predominantes del movimiento del suelo (Troncoso, 1992).

Así mismo, la ingeniería y la dinámica de suelos están interesadas en los períodos característicos de vibración de los suelos y los edificios. La respuesta de los edificios depende de la frecuencia predominante del movimiento sísmico y de las frecuencias naturales de la columna estratigráfica del suelo y del edificio. La respuesta del edificio se verá afectada si las dos frecuencias coinciden (Rosales, 2001), o sea si entran en resonancia.

### **1.6.2 Velocidad de ondas sísmicas**

La velocidad de propagación de las ondas sísmicas depende de la densidad del medio y de sus propiedades elásticas. Las ondas elásticas generan fuerzas y deformaciones que obedecen la teoría de la elasticidad, en la cual los cuerpos sólidos tienen la propiedad de resistir cambios de tamaño o de forma, y de regresar a la condición no deformada cuando se eliminan las fuerzas externas (Rosales, 2001).

### 1.6.3 Velocidad de las ondas de cuerpo

Cuando se genera una perturbación en un medio elástico infinito, las tensiones y las deformaciones producidas por este evento pueden transmitirse a través del medio, como ondas primarias de compresión, que tienden a comprimir y dilatar los elementos, o como ondas secundarias, o de corte, que los distorsionan sin cambiar sus volúmenes (Troncoso, 1992).

Al respecto Caicedo y Mora (2004) señalan que la teoría predice la existencia de dos modos de propagación independientes (ondas P y S) correspondientes a ondas longitudinales y transversales. Por esta razón, es importante diferenciar entre estos dos tipos de ondas.

Consideremos una masa tridimensional de un material elástico, homogéneo (densidad constante) e isotrópico (constantes elásticas independientes de la dirección). Las propiedades mecánicas que interesan son la densidad de masa ( $\rho$ ), la constante de Lamé ( $\lambda$ ) y el módulo de corte ( $G$ ). La ecuación que describe el movimiento de una onda longitudinal de dilatación cúbica (Troncoso, 1992) es:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \frac{\lambda + 2G}{\rho} \nabla^2 \theta \quad (1.1)$$

Entonces la velocidad de la onda longitudinal queda de la siguiente forma:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \quad (1.2)$$

En el caso de las ondas transversales los términos de la ecuación de onda son vectoriales, pues la perturbación es perpendicular a la dirección de propagación, sin embargo el análisis se simplifica bastante si se considera la onda en una dimensión. La ecuación diferencial de movimiento ondulatorio de dirección transversal, en una dimensión (Alonso y Finn, 1986) es la siguiente:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \quad (1.3)$$

Debido a que el movimiento transversal en tres dimensiones se puede separar en dos componentes de una dimensión, además de la dirección de propagación, la velocidad de propagación de la onda transversal es:

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1.4)$$

#### 1.6.4 Velocidad de las ondas superficiales

Cuando el medio elástico no es infinito, como ocurre en la realidad, se producen ondas que se propagan a través de la superficie del medio. La ecuación de onda, resuelta para condiciones de frontera en un espacio finito, superficie donde no hay fuerzas (ni tensiones), nos da que existe un tipo de onda que viaja a través de la superficie de igual forma que el oleaje en el mar. La oscilación de las partículas al paso de la onda será en forma elíptica. Una expresión aproximada de la velocidad de propagación (Moreno, 2006) de las mismas es:

$$V_R = \frac{0.87 + 1.12 \cdot \mu}{1 + \mu} V_S \quad (1.5)$$

Donde  $V_R$  es la velocidad de la onda Rayleigh y  $\mu$  es el coeficiente de Poisson.

#### 1.6.5 Relación entre velocidades

La velocidad de una onda P es siempre mayor que la velocidad de una onda S, como lo indica la razón (Troncoso, 1992) es:

$$\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{G}} \quad (1.6)$$

Si se reemplaza el módulo de corte y la constante de Lamé:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (1.7)$$

$$\lambda = \frac{\mu \cdot E}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \quad (1.8)$$

Donde  $E$  es el módulo de Young y  $\mu$  el coeficiente de Poisson del material. La razón de las velocidades se puede escribir en función de un solo parámetro:

Asimismo, la relación entre la velocidad de la onda R y la velocidad de la onda S se obtiene reordenando la ecuación de velocidad de la onda R:

$$\frac{V_R}{V_S} = \frac{0.87 + 1.12 \cdot \mu}{1 + \mu} \quad (1.9)$$

El coeficiente de Poisson es la razón entre la deformación unitaria transversal y la deformación unitaria longitudinal. Para materiales elásticos, el coeficiente de Poisson varía



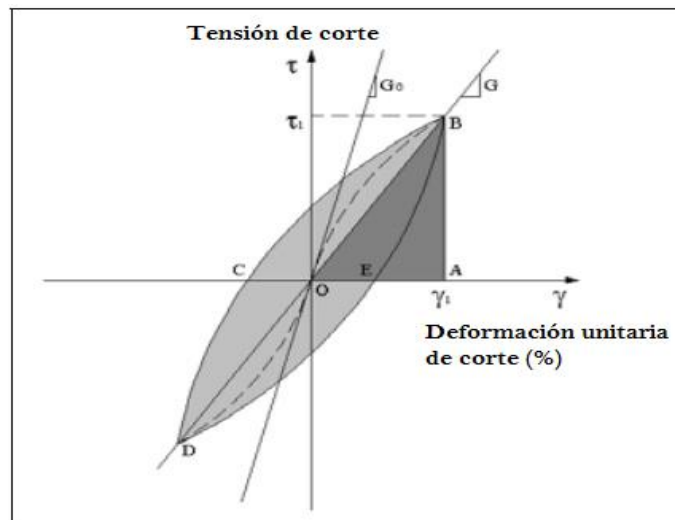
entre 0 y 0,5. En el caso de las rocas, valores en el rango  $0 < \mu < 0,05$  corresponden a rocas muy duras; y rocas alrededor de 0,45 son muy blandas (Rosales, 2001).

### 1.6.6 Razón de amortiguamiento

La razón de amortiguamiento ( $D$ ) expresa la capacidad del material para disipar la energía. Se calcula según Rodríguez (2005):

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{A_L}{A_T} = \frac{1}{2\pi} \frac{A_L}{G \cdot \gamma_1^2} \quad (1.10)$$

Donde  $A_L$  es el área del ciclo de carga – descarga, que equivale a la energía perdida o área del lazo BCDE en la Fig. 1.8, y  $A_T$  es el área del triángulo OAB, que equivale a la energía entregada al suelo, por unidad de volumen, para causar la deformación máxima.



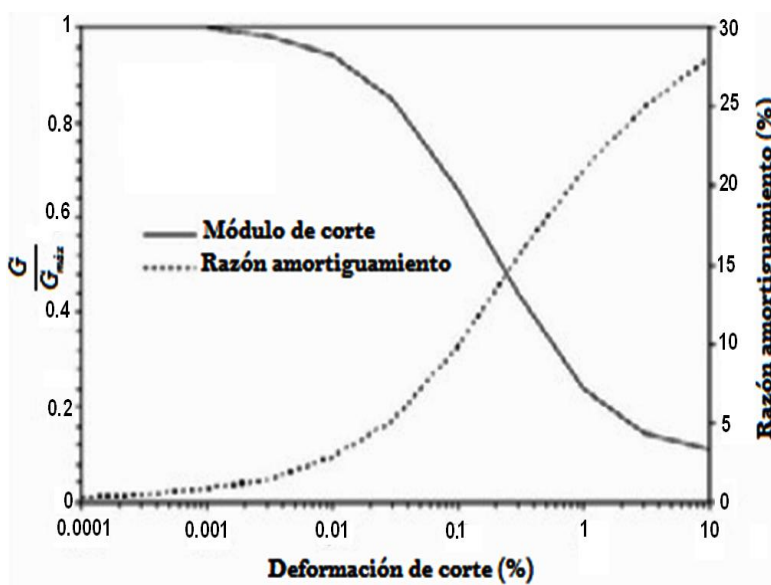
**Fig. 1.8.** Respuesta de un suelo sometido a una carga cíclica (Troncoso, 1992).

Al contrario de lo que ocurre con el módulo de corte, la razón de amortiguamiento aumenta cuando la deformación máxima aumenta. Esto significa que la respuesta del suelo es una función del nivel de sollicitación y que mientras mayor sea la tensión solicitante más deformable será el suelo y mayor será su capacidad de amortiguamiento (Troncoso, 1992).

Las variaciones del módulo de corte y de la razón de amortiguamiento en función de la deformación se representan por curvas como las mostradas en la Fig. 1.9.

Las relaciones entre las propiedades dinámicas (módulo de corte y razón de amortiguamiento) y la deformación unitaria, se pueden obtener en el laboratorio, pero no siempre se cumplen en

el terreno, debido a la dependencia de factores que no se conocen o no se pueden reproducir fielmente en el laboratorio, como la estructura, la edad y la trayectoria de tensiones del suelo.



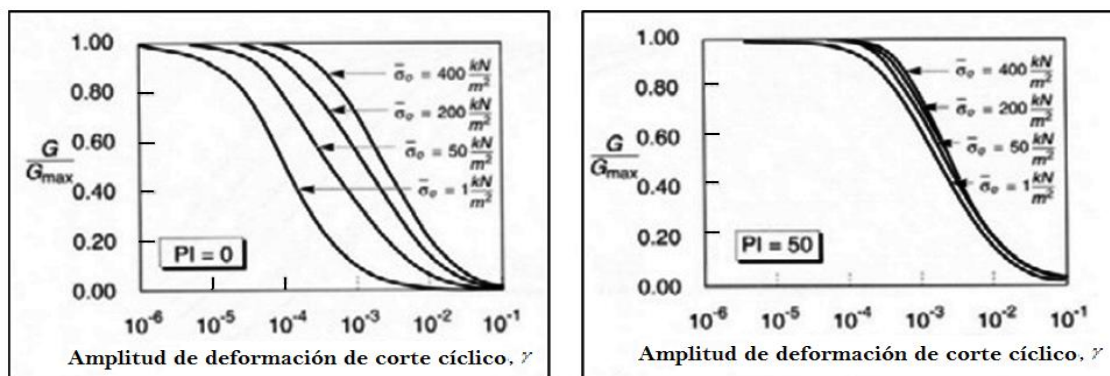
**Fig. 1.9.** Curva de reducción del módulo de corte y variación de la razón de amortiguación con el nivel de deformación de corte (Rodríguez, 2005).

### 1.6.7 Factores que influyen en las propiedades dinámicas del suelo

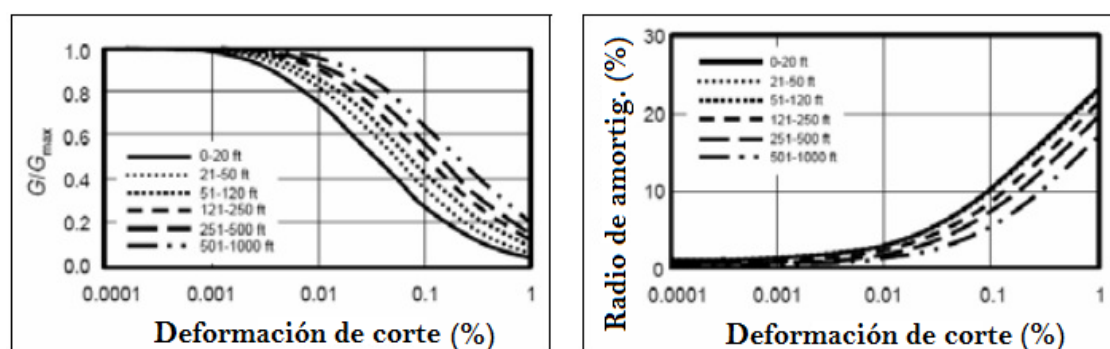
De acuerdo a Rodríguez (2005), los factores clave que influyen en las propiedades dinámicas del suelo son la tensión efectiva de confinamiento, el nivel de tensiones en el suelo, el índice de poros y la plasticidad del suelo.

El comportamiento del módulo de corte usualmente se expresa gráficamente con curvas de reducción de módulo en función de algún parámetro importante. Al respecto Kramer y Stewart (2004) señalan que este comportamiento depende fuertemente del esfuerzo efectivo para suelos no cohesivos y de baja plasticidad (Fig. 1.10). La influencia de la tensión de confinamiento efectiva es menor cuando se incrementa el índice de plasticidad y generalmente no es significativa para  $IP \geq 30$ , como se observa en dicha figura.

Por otro lado, Kramer y Stewart (2004) indican que la razón de amortiguamiento es afectada por los mismos factores que afectan el comportamiento del módulo de corte, pero en sentido contrario, es decir que los factores que causan la disminución de la curva de módulo causan el incremento de la curva de amortiguamiento, como se observa en la Fig. 1.11.



**Fig. 1.10.** Variación del módulo de corte en función de la tensión de confinamiento, del índice de plasticidad y la deformación cíclica (Rodríguez, 2005).



**Fig. 1.11.** Variación del módulo de corte y de la razón de amortiguamiento en función de la profundidad y la deformación (Kramer y Stewart, 2004).

### 1.6.8 Amplificación de la aceleración sísmica debida a la existencia de depósitos de suelos blandos

Las regiones situadas a una misma distancia del epicentro deben experimentar la misma intensidad de movimiento del terreno durante un terremoto. No obstante esto no siempre es así debido al tipo de suelo sobre el cual están construidas las estructuras.

La amplificación del movimiento del terreno se produce cuando el suelo tiene un período natural de vibración que coincide con el período de las ondas sísmicas, lo que se conoce como resonancia y que puede generar un aumento considerable en la amplitud de las vibraciones.

El terremoto de México de 1985 es el ejemplo más emblemático de amplificación sísmica. Aunque el epicentro de este terremoto se ubicó en la costa del Pacífico mexicano y las ondas sísmicas se debilitaron progresivamente al aumentar la distancia, en la sección central de la ciudad de México, a casi 400 kilómetros del epicentro, las vibraciones se intensificaron hasta

5 veces más que las experimentadas en las afueras de la ciudad. Este movimiento amplificado puede atribuirse a los sedimentos blandos, restos del lecho de un antiguo lago, sobre el cual se construyó parte de la ciudad (Tarbuck y Lutgens, 2000).

En la ciudad de Santiago de Cuba existen áreas con sedimentos que son susceptibles a la amplificación de la señal sísmica y causar daños durante un sismo de gran intensidad, estos daños son evidenciados por terremotos ocurridos en el pasado. Un ejemplo muy señalado por diferentes autores en esta ciudad es el área que bordea la bahía que se extiende desde el noroeste hasta parte del este, donde están presente los sedimentos del cuaternarios.

### **1.6.9 Efectos de los sismos en el suelo**

Los depósitos de suelos afectados por vibraciones sísmicas pueden sufrir cambios importantes en su capacidad resistente y provocar daños considerables a las construcciones ubicadas sobre esos depósitos.

Los cambios en la estructura del suelo son causados por las fuerzas de inercia que se generan por la propagación de las ondas sísmicas. La magnitud de las deformaciones unitarias se puede estimar como la razón entre la velocidad inducida de una partícula de suelo ( $W$ ), y la velocidad de avance de la onda ( $V_s$ ) según la siguiente ecuación (Troncoso, 1992):

$$\gamma_{xz} = \frac{W}{V_s} \quad (1.11)$$

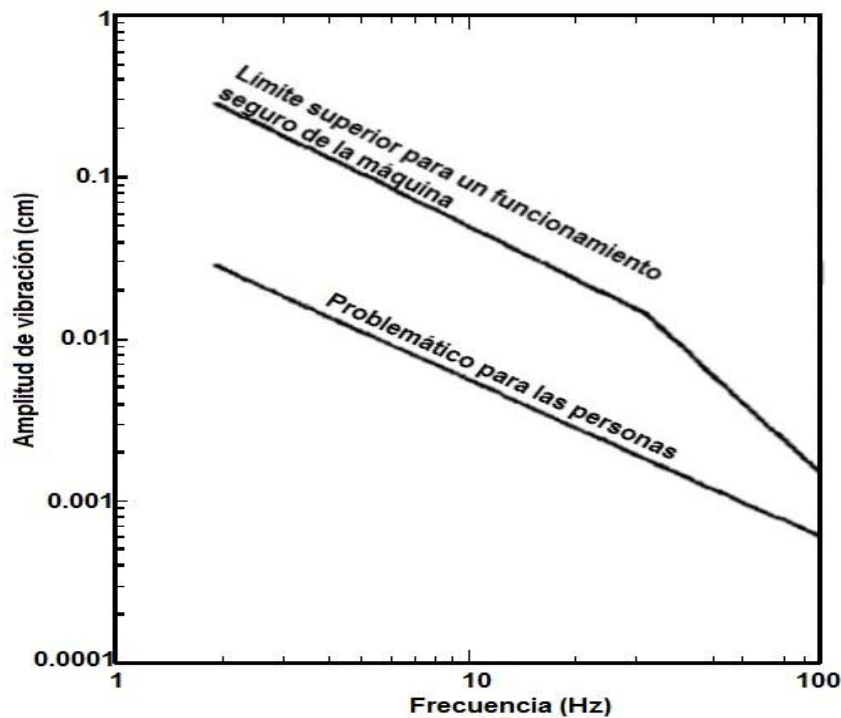
Dependiendo de la rigidez del suelo, que condiciona la velocidad de propagación de las ondas, se tiene que, para terremotos de fuerte magnitud, las deformaciones unitarias pueden alcanzar valores entre  $10^{-3}$  y  $10^{-1}$  por ciento. Estas distorsiones pueden causar la densificación del suelo, si éste puede drenar rápidamente, variar las presiones de poros en condiciones no drenadas o reducir la resistencia al corte a valores mínimos. Las consecuencias de estos comportamientos son asentamientos de fundaciones, hundimientos o flotación de obras subterráneas, volcamientos de edificios, deslizamientos de taludes y fallas de flujo de depósitos no confinados (Troncoso, 1992).

## **1.7 Diseño de cimentación de una máquina o de un edificio sometido a cargas dinámicas**

Las cargas dinámicas son fuerzas externas ejercidas sobre una estructura, que viene acompañada de cambios de posición e intensidad. Los ejemplos incluyen las cargas de

impacto, transporte, maquinarias, las olas, las ráfagas de viento y los terremotos fuertes. “Por otra parte es necesario tener en cuenta un diseño de la cimentación de una máquina o de un edificio, que es un proceso de prueba y error” (Fong y Van Nostrand Reinhold, 1991), en el que se incluyen los siguientes pasos:

1. Estimar la magnitud y características de las cargas dinámicas.
2. Establecer el perfil de suelo y determinar apropiadamente el módulo a cortante  $G$  y el amortiguamiento  $\beta$  para cada estrato de suelo. Además de los procedimientos dinámicos especiales y las técnicas de investigación de los suelos, en las normas geotécnicas aparecen procedimientos dinámicos que se usan actualmente para estimar estos parámetros del suelo tanto en el campo como en el laboratorio.
3. Seleccionar el tipo y las dimensiones de prueba de la cimentación, guiado por la experiencia, en cooperación con el criterio de desempeño establecido por como se muestra en la Fig. 1.12.
4. Estimar la respuesta dinámica de esta cimentación de prueba sometida a cargas determinadas en el paso 1 y soportada por el depósito de suelo establecido en el paso 2. Este es el paso clave del proceso de diseño que usualmente comienza con la simplificación y modelación, el perfil del suelo y la geometría de la cimentación e incluye la selección del método más adecuado de análisis de la interacción suelo-cimentación.
5. Chequear si la amplitud de la respuesta estimada en el paso 4 para la frecuencia particular de operación, coincide con el criterio de desempeño establecido en el paso 3.



**Fig. 1.12.** Requerimientos de desempeño típicos para las cimentaciones de máquinas (Fong y Van Nostrand Reinhold, 1991).

Es necesario repetir los pasos 3, 4 y 5 hasta que el diseño sea satisfactorio (teóricamente). En esta etapa dos tareas fundamentales deben chequearse:

- Primero: asegurarse que los movimientos transmitidos a las estructuras cercanas o a las facilidades que se encuentran debajo de la superficie, estén dentro de los niveles seguros para sus funcionamientos ininterrumpidos (una tarea usualmente acompañada con la ayuda de las relaciones atenuación-energía semiempírica) y guiada por la experiencia.
- Segundo: si el subsuelo contiene una arcilla blanda y/o arena suelta, debe investigarse el potencial para la acumulación de grandes deformaciones permanentes. Un evento improbable, requiere amplitud de deformaciones a cortante que bien excedan el 0.01 por ciento.

En la medición del módulo a cortante a bajas deformaciones: para el diseño satisfactorio de una cimentación de máquina deben conocerse:

1. El perfil del suelo, incluyendo la estratigrafía y la profundidad de la roca madre, la caracterización física y la clasificación de cada estrato, la elevación del nivel de agua y las condiciones del nivel freático y la extensión de la homogeneidad lateral.

2. La determinación a través de ensayos in situ o de laboratorio del módulo a cortante  $G_{max}$  y seleccionar apropiadamente los valores de la relación de Poisson y la relación de amortiguamiento

### **1.8 Conclusiones parciales**

- Los métodos geofísicos (geoeléctricos, sísmicos, microsismos y georadar) se proponen en el presente procedimiento, porque sus resultados serán tomados como punto de partida en el análisis de la dinámica de suelo.
- Los parámetros geofísicos (resistividad, velocidad elástica del medio, período de suelo, velocidad de la onda electromagnética del suelo) obtenidos por cada método serán correlacionados con las características reales del medio, con el objetivo de estimar el comportamiento del suelo ante las fuerzas dinámicas.

## **CAPÍTULO 2. PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL SUELO ANTE LA ACCIÓN DE LAS CARGAS DINÁMICAS**

### **Introducción**

En este capítulo se diseña un procedimiento para estimar el comportamiento de depósitos de suelos ante las cargas dinámicas, estableciendo una serie de pasos lógicos. Los mismos contemplan la selección del área de interés, buscar información de terremotos que hayan afectado el área en el pasado, buscar información geológica general y detallada del sitio, empleo de los métodos geofísicos y a partir de todos los resultados buscados y obtenidos estimar el comportamiento de los depósitos de los suelos ante cargas dinámicas. Los pasos del procedimiento pretenden demostrar la probabilidad de ocurrencia de fenómenos inducidos como la licuación y deslizamientos de suelos, también es factible demostrar el efecto de sitio en un área de estudio.

### **Procedimiento para estimar el comportamiento del suelo**

El procedimiento se diseñó para valorar las condiciones del suelo ante la acción de cargas dinámicas. Sus pasos son los siguientes:

1. Recepción de la solicitud del estudio para el suelo del área bajo estudio.
2. Búsqueda de información de afectaciones del sitio por terremotos fuertes en épocas anteriores.
3. Búsqueda de información geológica regional, y puntual a través de las investigaciones ingeniero-geológicas del suelo donde descansa la obra bajo estudio.
4. Empleo de métodos instrumentales por etapa de trabajo.

#### 4.1. Etapa de organización de los trabajos:

- Recorrido por el área de estudio.
- Selección de los métodos geofísicos a emplear.
- Comprobación y mantenimiento a la instrumentación a emplear en el campo.

#### 4.2. Etapa de trabajo de campo.

- Emplazamiento de los equipos sobre el terreno.

#### 4.3. Etapa de gabinete.

- Procesamiento de las señales obtenidas a través de los diferentes métodos.



- Correlación e interpretación de los perfiles geofísicos con la información geológica.
- Correlación de los resultados obtenidos entre los perfiles geofísicos.

5. Probabilidad de ocurrencia de fenómenos inducidos en el sitio como licuación y los deslizamientos del suelo.

6. Valoración de las condiciones del suelo para determinar la respuesta ante la acción de cargas dinámicas.

7. Validación del cumplimiento de los objetivos para el procedimiento.

Los pasos del procedimiento para estimar el comportamiento del suelo ante la acción de cargas dinámicas se explican a continuación:

### **2.1 Recepción de la solicitud del estudio para el suelo del área bajo estudio**

Se recibe la solicitud de estudio del área. Para ello las condiciones que deben cumplirse son las siguientes:

- Reunir valores históricos, patrimoniales y/o económicos.
- Los pobladores o trabajadores deben estar de acuerdo con el estudio, por el interés que este reporte.
- Presencia de población en el sitio.

### **2.2 Búsqueda de información de afectaciones del sitio por terremotos fuertes en épocas anteriores**

Búsqueda bibliográfica de la influencia de sismos de años anteriores sobre el sitio y las edificaciones. Con esta información se puede tener idea de cómo va a ser la respuesta dinámica de una instalación bajo estudio ante las ondas que generará un terremoto extremo esperado en la zona. De no haber información se deben hacer estudios indirectos como la obtención de sismogramas sintéticos.

### **2.3 Búsqueda de información geológica regional y puntual a través de las investigaciones ingeniero-geológicas del suelo donde descansa la obra bajo estudio**

Clasificar por el mapa geológico regional la formación o grupo geológico a la cual pertenece el área de estudio y búsqueda bibliográfica de la composición litológica de ese suelo, como tipo de sedimento y roca.

Los datos de las calas ingeniero-geológicas son muy importantes en este tipo de investigación ya que a través de muestras de suelo y roca, obtenida en uno o varios puntos en profundidad situados en el área de interés se obtiene información de la composición litológica real del suelo en el sitio bajo estudio. Estos resultados son llevados a cabo a través de muestras en laboratorios especializados para determinar sus propiedades físico-mecánicas muy útiles para conocer la composición del suelo y valorar la respuesta dinámica al paso de las ondas elásticas ante la acción de cualquier carga dinámica.

## **2.4 Empleo de métodos instrumentales por etapa de trabajo**

Se propone aplicar en el procedimiento cuatro métodos geofísicos para los estudios de suelos, ellos son los siguientes: sísmica de refracción, tomografía eléctrica, microsismos y georadar.

### **2.4.1 Etapa de organización de los trabajos**

#### **2.4.1.1 Recorrido por el área de estudio**

El recorrido por el área de estudio se efectúa para ver las condiciones del suelo en la superficie, así como elegir el sitio más adecuado a la hora de ejecutar las mediciones, proyectando la posición de los perfiles y puntos de medición. Estos últimos deben situarse en lugares donde el ruido existente sea lo mínimo permisible con el objetivo de no afectar la señal útil. De esta forma se agilizan los trabajos en el campo y la fiabilidad de las mediciones.

#### **2.4.1.2 Selección de los métodos geofísicos a emplear**

De acuerdo a las características del terreno, profundidad de estudio y objetivo de la investigación será la selección del método a emplear. Por ejemplo: de haber un ruido ambiental muy alto no se debe usar el método de refracción sísmica, ya que las primeras llegadas de la onda longitudinal ( $V_p$ ) no se visualizan claramente en los sismogramas, entonces no se tendrán valores reales ni de la velocidad de las ondas por capa ni de los espesores de las capas; el nivel de error de los resultados del método de tomografía eléctrica es demasiado alto en terrenos donde existe afloramiento superficial de rocas y/o arena; en terrenos arcillosos con niveles superficiales de aguas subterráneas las ondas electromagnéticas del georadar no se van a propagar hacia las profundidades ya que la señal se va atenuar.

Los ensayos geofísicos pueden clasificarse en dos categorías:

- Ensayos realizados a partir de la superficie del terreno. Estos ensayos tienen la ventaja de que son fáciles de realizar y tienen un costo comparativamente bajo. Contrariamente, es más difícil la interpretación de los resultados, la cual requiere una rigurosa esquematización del medio o un modelado numérico más sofisticado.
- Los ensayos realizados en perforaciones o entre perforaciones. Estos son más difíciles de implementar y tiene un costo mucho mayor, pero proporciona una información más comprensible y fácil de interpretar.

En el presente trabajo se usan los ensayos del primer grupo que, son más económicos y fáciles de operar. Entre ellos están los métodos sísmicos, eléctricos y el georadar.

### Método de sísmica de refracción

En la Fig. 2.1 se observan las partes que conforman la técnica del método de sísmica de refracción emplazadas en el terreno. El equipamiento usado pertenece al CENAIIS y las funciones de sus partes fundamentales son: la mandarría energiza el suelo mediante golpes generando ondas elásticas que se desplazan por el terreno y parte de ellas se refractan hacia la superficie para ser recepcionadas por los geófonos o receptores, los cuales convierten la señal mecánica de las ondas en eléctrica, estas se trasladan al equipo de medición que posee un sismógrafo especializado, las señales eléctricas son transformada en analógica primeramente, y luego en digital, que es la señal que se utiliza en los sismogramas.



**Fig. 2.1.** Partes principales del equipamiento utilizado en la sísmica de refracción, desde izquierda a derecha: equipo de medición, mandarría y geófono. Fotos tomadas por el autor.

### Método tomografía eléctrica

En la Fig. 2.2 se presentan las partes para la medición geoelectrica. Cada una tiene una función en el proceso de medición. Entonces el energizador genera corriente para ser suministrada al terreno, a través de los electrodos metálicos. La caja de conexión se encarga de unir los electrodos con el equipo. Este último está dotado por una computadora que trabaja sobre Windows 98, aquí es donde se transforma la señal enviada desde el terreno en un fichero txt, que es el utilizado para ser procesado en la obtención del perfil.

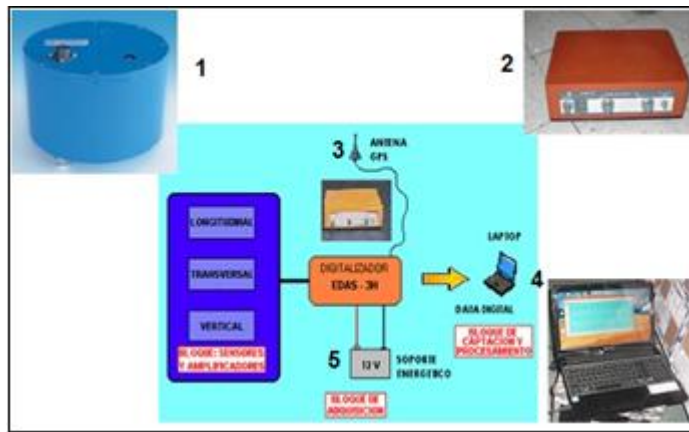


**Fig. 2.2.** Partes del equipamiento utilizado en la tomografía eléctrica, desde izquierda a derecha: equipo de medición, energizador, caja de conexiones, electrodo de acero y cable tomográfico. Fotos tomadas por el autor.

### Método de los microsismos

Un objetivo fundamental de la ingeniería en cuanto a sismos es la minimización de desastres. La experiencia y las investigaciones realizadas han observado la aplicabilidad de la medición y del análisis de microsismos para inferir las propiedades del suelo, y por tanto se consideran herramientas adecuadas para evaluar efectos de sitio y predecir las características de movimientos fuertes.

La variante del método de los microsismos empleada es el método tres de los microsismos, llamado "Observaciones con una sola estación". Este método fue abordado con más detalle en el epígrafe 1.2.4.3 y se emplea para determinar el período natural del suelo, usado para analizar sus características dinámicas. El equipamiento usado para el presente procedimiento es del CENAIIS y sus partes son mostradas en la Fig. 2.3.



**Fig. 2.3.** Partes del equipo para la medición de microsismos: 1) sismómetro Marslite 3D, 2) EDAS-3M, 3) antena GPS, 4) laptop y 5) batería 12 de volts.

Sismómetro triaxial Marslite: este provee una respuesta plana hasta los 5 segundos y mantiene características de portabilidad, robustez y buena ganancia para mediciones de campo. Su característica más notable es su bajo consumo (alrededor de 100 mW), y puede en el tiempo de medición mantener un nivel de ruido aceptable.

EDAS-3M: equipo de 16 bit, con tres canales digitales de adquisición para uso en transferencia de señales analógicas desde un sismómetro de señales digitales, las cuales deben ser fácilmente enviadas y procesadas.

Para la obtención del período fundamental de vibración del suelo y de las construcciones tomando como excitación del suelo y de las construcciones las vibraciones ambientales o microsismos, se utilizó la metodología elaborada por los investigadores del CENAI (Oliva, 2006).

#### **2.4.1.3 Comprobación y mantenimiento a la instrumentación a emplear en el campo**

Una vez elegidos los equipos de medición geofísicos a emplear se procede a comprobar la funcionalidad de estos, así como realizar el mantenimiento para su uso en el campo. De no ejecutar este punto se corre gran riesgo de que no funcione y esto incurre pérdidas económicas por gastos de combustible y traslado del personal al área de medición.

#### **2.4.2 Etapa de trabajo de campo**

Una vez seleccionados los métodos a utilizar para implementar las mediciones se procede a ejecutar los trabajos de campo. Con estas mediciones se determinan las características

dinámicas y condiciones del suelo a estudiar. Los resultados constituyen la base de la investigación a llevar a cabo a través de la interpretación geofísica.

#### **2.4.2.1 Emplazamiento de los equipos sobre el terreno**

Al estar definidas las posiciones de los perfiles y puntos de medición se emplazan la instrumentación sobre el terreno. Se enciende el equipo y comienzan a medir, obteniéndose las diferentes variables geofísicas (resistividad eléctrica, velocidad de la onda P y período natural del suelo) correspondiente a cada método.

#### **2.4.3 Etapa de gabinete**

En la etapa de gabinete se van a obtener los resultados de los trabajos de campo, procesando y analizando la información extraída en perfiles 2D generalmente, este son los casos de los métodos geoelectrónicos, sísmicos y georadar. Para el caso de los microsismos se determina el período natural del suelo en un punto.

El primer y más importante paso en la evaluación geotécnica es el uso del programa de diseño para la caracterización del sitio. Todo lo cual incluye la adquisición, síntesis e interpretación de la información cualitativa y cuantitativa del área de estudio. Esta información debe de incluir los datos históricos y actuales de la geometría tanto de la superficie como por debajo de esta, las propiedades de los suelos y rocas y la ubicación del nivel freático.

##### **2.4.3.1 Procesamiento de las señales obtenidas a través de los diferentes métodos**

Por cada método se procesará la señal obtenida con su respectivo software. Los programas utilizados son:

Para realizar el procesamiento de los perfiles sísmicos se usó como ayuda el grupo de programas de Refracción Sísmica Seislmager, de la Empresa Geometrics, en su variante **Pickwin** (2011). Este software permite realizar las lecturas de los sismogramas, mediante la conversión a un archivo SU, para luego iniciar el procesamiento de la información, construyendo un modelo de profundidad desde el archivo de datos de entrada preparado por el programa anteriormente descrito; así mismo, el programa calcula las velocidades de los estratos mediante técnicas de mínimos cuadrados, luego usa el método de tiempo de retardo para estimar las profundidades, el programa ajusta las profundidades de cada estrato por efecto de la superficie topográfica; este proceso se hace en forma iterativa hasta encontrar el modelo que se ajuste a las características geológicas del terreno investigado.

**RES2DINV** (2009) es un programa que automáticamente determina un modelo bidimensional (2D) de resistividad eléctrica para la información obtenida del estudio de imagen eléctrica en los primeros metros del corte geológico. Todos los sistemas operativos de Windows son compatibles con el programa.

**DEGTRA 2000** (Ordaz y Montoya, 2002), es un programa profesional diseñado por la UNAM (Ordaz *et al.*, 2000) y con él se obtienen los espectros de Fourier, de respuesta, la intensidad de Arias, el cociente de los espectros de Fourier, entre otros parámetros.

#### **2.4.3.2 Interpretación y correlación de los perfiles con las informaciones geológicas generales y las investigaciones ingeniero-geológicas**

Los elementos básicos de la caracterización del sitio para propósitos de la ingeniería geotécnica son los mismos que para problemas típicos de la ingeniería geotécnica: una revisión de los datos publicados disponibles, investigaciones de la superficie y reconocimiento de campo. Estas actividades se describen en numerosas normas y textos de ingeniería geotécnica con particular aplicación en la ingeniería geotécnica sísmica.

Las investigaciones de campo y de laboratorio, en general, deberían ser orientadas para definir la estratigrafía del depósito de suelo; las condiciones hidráulicas de presión de poro en el sitio; las propiedades índices de suelo, y el comportamiento tensión-deformación estático y dinámico del suelo, así como, el comportamiento postsísmico del suelo y deben de identificarse también los materiales granulares potencialmente licuables en esta etapa (Romo *et al.*, 1994).

Los perfiles 2D son correlacionados con las calas ingeniero-geológicas, es decir los valores obtenidos por los primeros van a representar la composición litológica del suelo en un corte geológico a partir de la información de los segundo. En este paso se interpreta los resultados de los métodos por perfiles, logrando información de la profundidad máxima de estudio, profundidad de las aguas subterráneas, espesores de capas, profundidad de la capa resistente, detección de fallas. Cada variable (resistividad eléctrica, velocidad de la onda volumétrica y velocidad de la onda electromagnética) tiene su rango de valores característico para diferentes tipos suelos.

La tabla 2.1 muestra las velocidades típicas de propagación de las ondas longitudinales para distintos medios de propagación. Las velocidades de los otros tipos de ondas como las de corte pueden obtenerse de las relaciones de velocidad entre las ondas.



Tabla 2.1: Velocidad de las ondas longitudinales en distintos medios (Rosales, 2001).

Medio	$V_p$ (m/s)
Gravas, arenas (secas)	468 a 915
Arena (húmeda)	610 a 1830
Arcilla	915 a 2750
Agua	1430 a 1680
Agua de mar	1460 a 1530
Arenisca	1830 a 3970
Shale (roca arcillosa que se parte en láminas)	2750 a 4270
Tiza (Chalk-arcillas)	1830 a 2970
Caliza (Limestone)	2140 a 6100
Sal	4270 a 5190
Granito	4580 a 5800
Rocas metamórficas	3050 a 7020

### 2.4.3.3 Correlación de los resultados obtenidos entre los perfiles geofísicos

Determinado los respectivos perfiles geofísicos, se procede a correlacionar los resultados entre sí. Aproximadamente estos deben coincidir en espesor de capa para indicar el tipo de material geológico (agua, suelo vegetal, arcilla, arena o roca), a menos que exista un agente externo como la presencia de agua que altere los parámetros a medir, es decir la velocidad de la onda sísmica, resistividad o velocidad de onda electromagnética.

## 2.5 Probabilidad de ocurrencia de fenómenos inducidos en el sitio como licuación y los deslizamientos

Para determinar la probabilidad de ocurrencia de fenómenos inducidos en el sitio como la licuación y los deslizamientos de suelo son empleadas diferentes metodologías que tienen en cuenta diversos aspectos como la información ingeniero-geológica, granulometría, nivel del manto freático, tipo de suelo, afectaciones anteriores de estos fenómenos bajo la acción de cargas dinámicas, condiciones del talud, etcétera.

Para ello se analiza primero la licuación:

### 2.5.1 Licuación de suelo

En áreas donde los materiales granulares no consolidados están saturados, las vibraciones de los terremotos pueden generar un fenómeno conocido como licuación o licuefacción de suelos. Durante la licuación, las vibraciones del suelo generan una pérdida de la resistencia al corte del mismo, transformándolo temporalmente en un estado licuado. Bajo estas condiciones, lo que había sido un suelo estable se convierte en un fluido móvil que no es capaz de soportar edificios ni otras estructuras. Como consecuencia, los objetos situados bajo tierra, como tanques de almacenamiento y conducciones de alcantarillado, pueden flotar



literalmente hacia la superficie, mientras las estructuras superficiales pueden hundirse (Tarbuck y Lutgens, 2000).

De acuerdo a la Organización Panamericana de la Salud (OPS, 2003) con basamento en el Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards (Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, TC4, ISSMGE, 1999) se resumen siete factores importantes, que están relacionados con los criterios de susceptibilidad, para determinar la probabilidad de un suelo para licuarse, los cuales se detallan a continuación:

1. Distribución del tamaño de los granos. La arena uniformemente gradada, con granos pocos finos o muy gruesos (arena limpia) tiene mayor probabilidad de licuarse y es posible que se vuelva más densa. Las arenas limosas y gravas también son susceptibles a la licuación bajo cargas cíclicas muy severas.
2. Profundidad de las aguas subterráneas. Puede ocurrir licuación si existe agua subterránea en el punto de la columna del suelo donde se está produciendo la densificación. Mientras menor sea la profundidad, menor será el peso del recubrimiento del suelo y el potencial de que ocurra densificación. Por tanto, mientras menor sea el nivel de las aguas subterráneas, mayor será la probabilidad de que ocurra licuación.
3. Densidad. La licuación ocurre principalmente en suelos sueltos, saturados y no cohesivos. Ese suelo puede densificarse cuando está sujeto a una carga cíclica. La tendencia a densificarse reduce el volumen de suelo y agua e incrementa la presión de poros si los mismos se llenan de agua. Cuando la presión de poros se vuelve igual a la tensión media total, el suelo pierde su resistencia y se licua. Si el suelo es denso, habrá menos posibilidad de que se produzca la licuación.
4. Peso del recubrimiento y profundidad del suelo. Las tensiones entre partículas aumentan a medida que se incrementa la presión del recubrimiento. Mientras mayor sea la tensión entre las partículas, menor será la probabilidad de que ocurra la licuación. Por lo general, la licuación ocurre a profundidades menores 9 metros, y rara vez ocurre a profundidades mayores de 15 metros.
5. Amplitud y duración de la vibración del terreno. La capacidad del suelo para resistir una vibración provocada por un sismo sin causar fallas depende de la intensidad del movimiento del terreno, incluida tanto su amplitud como su duración. Los movimientos más fuertes tienen mayor probabilidad de causar fallas. La licuación de suelos bajo

condiciones de tensión provocadas por un terremoto puede ocurrir ya sea cerca del epicentro durante terremotos pequeños o moderados, o a cierta distancia en caso de terremotos moderados a severos.

6. Edad del depósito. Los suelos débiles y no cohesivos por lo general son jóvenes. Con el tiempo, actúan dos factores para incrementar la resistencia de un suelo típico: la compactación (que cambia la relación de vacíos) y varios procesos químicos (que actúan para cementar los granos del suelo). Una regla general es que los depósitos anteriores al pleistoceno tardío (más de 500.000 años de antigüedad) tienen poca probabilidad de licuarse excepto si sufren una vibración bastante fuerte, mientras que los depósitos del holoceno tardío (menos de 3.000 años de antigüedad) tienen mayor probabilidad de licuarse.
7. Origen del suelo. El suelo depositado por procesos fluviales se sedimenta fácilmente y sus granos tienen poca probabilidad de compactarse. De manera similar, los rellenos artificiales no compactados, generalmente por debajo del nivel del agua, pueden tener deficiencias similares. Una práctica común de décadas pasadas era la colocación de los rellenos hidráulicamente. Todos ellos se licuarán con facilidad. Por otro lado, los sedimentos depositados glacialmente, particularmente aquellos sobre los cuales ha pasado un glaciar, generalmente ya son bastante densos y tienen menor probabilidad de licuarse.

No todos los suelos son susceptibles de presentar licuación, así que el primer paso en el desarrollo de una evaluación de riesgo de licuación es la determinación de la susceptibilidad de licuación. La susceptibilidad de licuación de un suelo puede ser evaluada usando criterios históricos, geológicos y basados en su composición o según su estado; estos criterios, descritos por Kramer y Stewart (2004) se presentan a continuación:

*Criterios históricos.* Se ha observado que la licuación ocurre frecuentemente en los mismos lugares cuando las condiciones del sitio se mantienen constantes, es por esto que la evidencia de la ocurrencia histórica de licuación, observada en forma de paleo-licuación, puede ser utilizada como prueba de susceptibilidad de licuación, en un determinado lugar.

*Criterios geológicos.* Las condiciones geológicas también pueden indicar susceptibilidad de licuación, por ejemplo los suelos de depósitos fluviales y eólicos, cuando se encuentran saturados, tienen una alta probabilidad de ser susceptibles de presentar licuación. También se

ha observado licuación en depósitos de abanicos aluviales, playas y estuarios, pero no de manera tan evidente como en los casos anteriores. Otro criterio geológico es la edad del depósito, en general los depósitos de suelo jóvenes son más susceptibles de licuación que los depósitos más antiguos.

*Criterios basados en la composición del suelo.* La composición física de un suelo juega un importante papel en la determinación de su susceptibilidad de licuación. Las arenas uniformemente gradadas y limpias, compuestas principalmente de partículas redondeadas son intrínsecamente más susceptibles, mientras que los suelos bien gradados y los suelos con partículas angulares son menos susceptibles. La presencia de finos, particularmente finos plásticos ( $IP > 10$ ), tiende a disminuir la susceptibilidad de licuación.

*Criterios basados en el estado del suelo.* El potencial de licuación de un suelo también depende de su estado, como las tensiones efectivas a las que está sometido y su densidad in situ, ya que la tendencia de un terreno a densificarse, bajo condiciones de carga cíclicas, depende de su densidad y de las tensiones efectivas. Los suelos sueltos son bastante más susceptible de licuación que los suelos densos y, para una densidad dada, los suelos bajo tensiones de confinamiento efectivas altas son más susceptible que los suelos bajo tensiones de confinamiento efectivas bajas.

El fenómeno de licuación generalmente se asocia con suelos no cohesivos o granulares, como resultado de una carga sísmica de suficiente intensidad y duración. Ocurre más comúnmente en suelos sueltos, saturados, granulares, uniformemente gradados y con un bajo contenido de finos. Aunque las arenas son especialmente susceptibles, la licuación también se puede desarrollar en algunos limos y gravas.

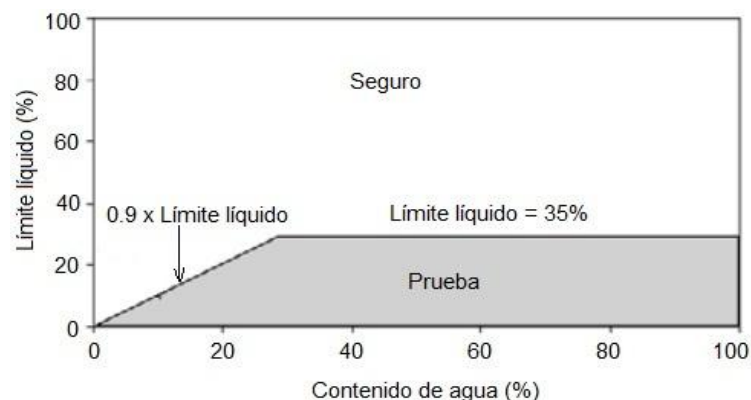
Las dos condiciones necesarias para que ocurra la licuación son, la presencia de suelos de densidad suficientemente baja, los que tienden a experimentar reducción de volumen, y un estado de saturación completa o casi completa. Bajo estas condiciones, los terrenos no cohesivos tienden a densificarse cuando están sometidos a esfuerzos de corte cíclico, pero el cambio de volumen es impedido debido al drenaje restringido. Como resultado, el exceso de presión de poros se acumula, las tensiones efectivas se reducen, y el suelo pierde resistencia convirtiéndose a un estado licuado.

Los suelos con presencia de finos también pueden exhibir un comportamiento similar a la licuación de arenas, cuando son sometidos a cargas sísmicas, el cual puede producir fallas

que tienen muchas de las mismas características de las fallas por licuación. En 1979 Wang propuso los siguientes cuatro criterios:

1. Fracción de arcilla (finos menores de 0,005 mm)  $\leq 15\%$
2. Límite líquido, LL  $\leq 35\%$
3. Contenido de humedad natural,  $w \geq 0,9 LL$
4. Índice de liquidez, LI  $\leq 0,75$

Estos criterios han sido adaptados en la Norma China Modificada. El potencial de licuación para suelos finos puede ser evaluado tomando como referencia esta norma, la que se muestra en la Fig. 2.4. Según estos criterios, los suelos pueden licuarse si la fracción de arcilla es menor de 15 % (usando la definición china de tamaño de arcilla como partículas menores de 0,005 mm), el límite líquido es menor que 35 %, y el contenido de agua es mayor que 0,9 veces el límite líquido (Brandes, 2003).



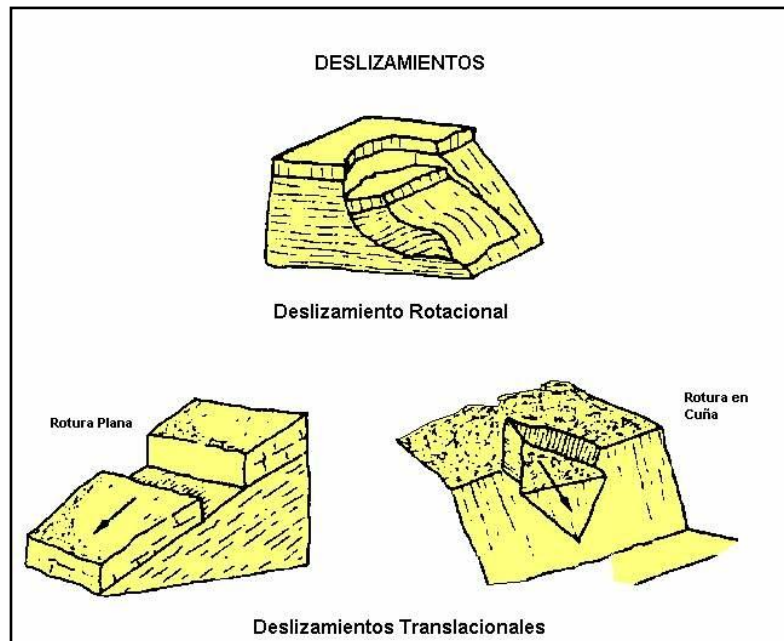
**Fig. 2.4.** Norma China Modificada para la evaluación de la licuación de suelos con presencia de finos (Brandes, 2003).

### 2.5.2 Deslizamientos de suelo

Existen varios conceptos de deslizamientos, entre ellas se encuentran la de Lomtadze (1986) que los divide en: Deslizamientos propiamente, Derrumbes y Desprendimientos, y la de Corominas (1989) que se basa en la realizada por Varnes (1978) e incorpora diversas observaciones realizadas por Hutchinson (1988).

Según Corominas (1989), los deslizamientos son movimientos descendentes relativamente rápidos de una masa de suelo o roca, que tiene lugar a lo largo de una o varias superficies definidas que son visibles o pueden ser inferidas razonablemente o corresponder a una franja

relativamente estrecha. Esta masa desplazada lo hace rígidamente, o aunque puede llegar a fragmentarse, se considera como un bloque único. En función de su trayectoria se clasifican en deslizamientos rotacionales y deslizamientos traslacionales. En la Fig. 2.5 se muestran tres tipos de deslizamientos clasificado por Corominas (1989).



**Fig. 2.5.** Principales tipos de deslizamientos según Corominas (1989). Extraído de Reyes (2002). De acuerdo a la investigación de Reyes (2002), las causas fundamentales de su origen están dadas por:

- a acción de la fuerza de gravedad.
- un ascenso del nivel de las aguas subterráneas.
- alterarse y perder resistencia las rocas o suelos que conforman un macizo montañoso, por efecto de la meteorización.
- acción del hombre.
- al ser sometido a vibración por un terremoto.
- acción de las lluvias o precipitaciones intensas.

Todas estas causas son las que se van analizar en el procedimiento, es decir sí algunas de estas están presentes en el terreno se comienza a investigar la probabilidad de que ocurra el fenómeno de deslizamiento en el sitio estudiado.

## **2.6 Valoración de las condiciones del suelo para determinar la respuesta ante la acción de cargas dinámicas**

Tomando en cuenta los resultados de la información estratigráfica, geotécnica y métodos geofísicos, entonces se analiza la amplificación sísmica como causante del efecto de sitio haciendo una modelación por diferentes software, en el caso particular del este procedimiento son usados el **ProShake (versión 1.1)** y **PShake**(Sanó, 1991). Para ello se describe en que consiste cada método y los aportes para investigaciones de este tipo.

**ProShake** es un programa de computación para el análisis de respuesta sísmica del suelo horizontalmente estratificado. ProShake fue desarrollado de EduShake un programa de dominio público para ayudar a que los estudiantes de ingeniería comprendan el mecanismo de la respuesta sísmica del terreno. ProShake está acompañado por una interface gráfica para el usuario de Windows que simplifica y agiliza el análisis y la interpretación de la respuesta sísmica.

El programa de computo ProShake utiliza una aproximación en el dominio de la frecuencia para resolver el problema de la respuesta del terreno. En términos simples, el movimiento introducido se representa como la suma de una serie de senos de ondas de diferentes amplitudes, frecuencias y ángulos de fase. Una solución relativamente simple para la respuesta del perfil del suelo a los senos de las ondas de diferentes frecuencias (en forma de una función de transferencia) se utiliza para obtener la respuesta del depósito de suelo para cada una de los senos de onda introducidos.

**Pshake** (Sanó y Pugliese, 1991) al igual que ProShake es un programa para analizar la respuesta dinámica del sitio. Este programa es una un equivalente lineal de análisis 1-D, ampliamente usado para el cálculo no lineal de la respuesta de sitio. Su función es calcular la respuesta local sísmica de un semiespacio viscoelástico estratificado, viajando a través de él las ondas de corte en la dirección vertical. El método se basa en la solución continua de la ecuación de la onda de corte y sobre la teoría de la vibración aleatoria.

## **2.7 Validación del cumplimiento de los objetivos para el procedimiento**

El cumplimiento de los objetivos del procedimiento se cumple cuando estén realizados todos los pasos, de tal forma que demuestre las condiciones de generarse fenómenos inducidos por terremotos como la licuación y/o deslizamientos de suelos, así como la amplificación de la señal sísmica del suelo que da lugar al efecto de sitio. Además, con este procedimiento se llega a estimar si la estructura entra en resonancia con el movimiento del suelo.

## 2.8 Conclusiones parciales

- Se diseñó un procedimiento para estimar el comportamiento del suelo ante la acción de cargas dinámicas desarrollan pasos lógicos.
- Las variables empleadas en el procedimiento son las siguientes: Litología del depósito suelo, características de la edificación, terremotos, nivel del manto freático, velocidad de la onda longitudinal ( $V_p$ ), resistividad eléctrica ( $\rho$ ) y período natural del suelo ( $T_s$ ).
- Se estimó el comportamiento del suelo analizando las condiciones para que exista la licuación y los deslizamientos de suelo, así como el efecto de sitio provocado por las oscilaciones mecánicas de las ondas sísmicas.

## CAPITULO 3. VALIDACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL SUELO QUE SUBYACE EL EDIFICIO EMCOMED

### Introducción

El objetivo del capítulo consiste en validar un procedimiento para estimar el comportamiento del suelo a través de un caso práctico, y este es el estudio del suelo que subyace el edificio EMCOMED. Para ello se tienen informaciones ingeniero-geológicas detalladas del sitio ejecutada por la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas de Santiago de Cuba (ENIA). Luego se implementan un complejo de métodos geofísicos para obtener las características in situ del lugar. Teniendo en cuenta las 7 condiciones de la OPS (2003) y el criterio chino (Brandes, 2003), además con el apoyo de la información dada por la ENIA se analiza la probabilidad de la ocurrencia de la licuación de suelo en el sitio si se genera un sismo extremo. Otro aspecto importante es que se realizan dos modelaciones de suelo para investigar las características dinámicas del suelo.

### 3.1 Recepción de la solicitud del estudio para el suelo del área bajo estudio

El área seleccionada para el estudio es la del Edificio de la Empresa Comercializadora y Distribuidora de Medicamentos (EMCOMED), que en su momento se denominó Droguería “Mestre y Espinosa”. Está ubicada en la esquina de la Ave. Jesús Menéndez y la calle San Rita, limita al Nordeste con el Servicentro de Combustible “Alameda”, al Oeste distanciado aproximadamente 25 m se encuentra el Paseo de la Alameda, en esta misma dirección a 118 m, está situada la bahía de Santiago de Cuba rodeada por su malecón y al Este con la calle Carlos Dubois. En la Fig. 3.1 se muestra una vista del área donde está emplazado el edificio.



**Fig. 3.1.** Vista del edificio EMCOMED. Foto tomada por el autor.

Es un edificio que presenta una tipología de nave industrial metálica de tres luces con ocho intercolumnios, con una pared perimetral de pórticos mixtos y cimentación de pilotes de



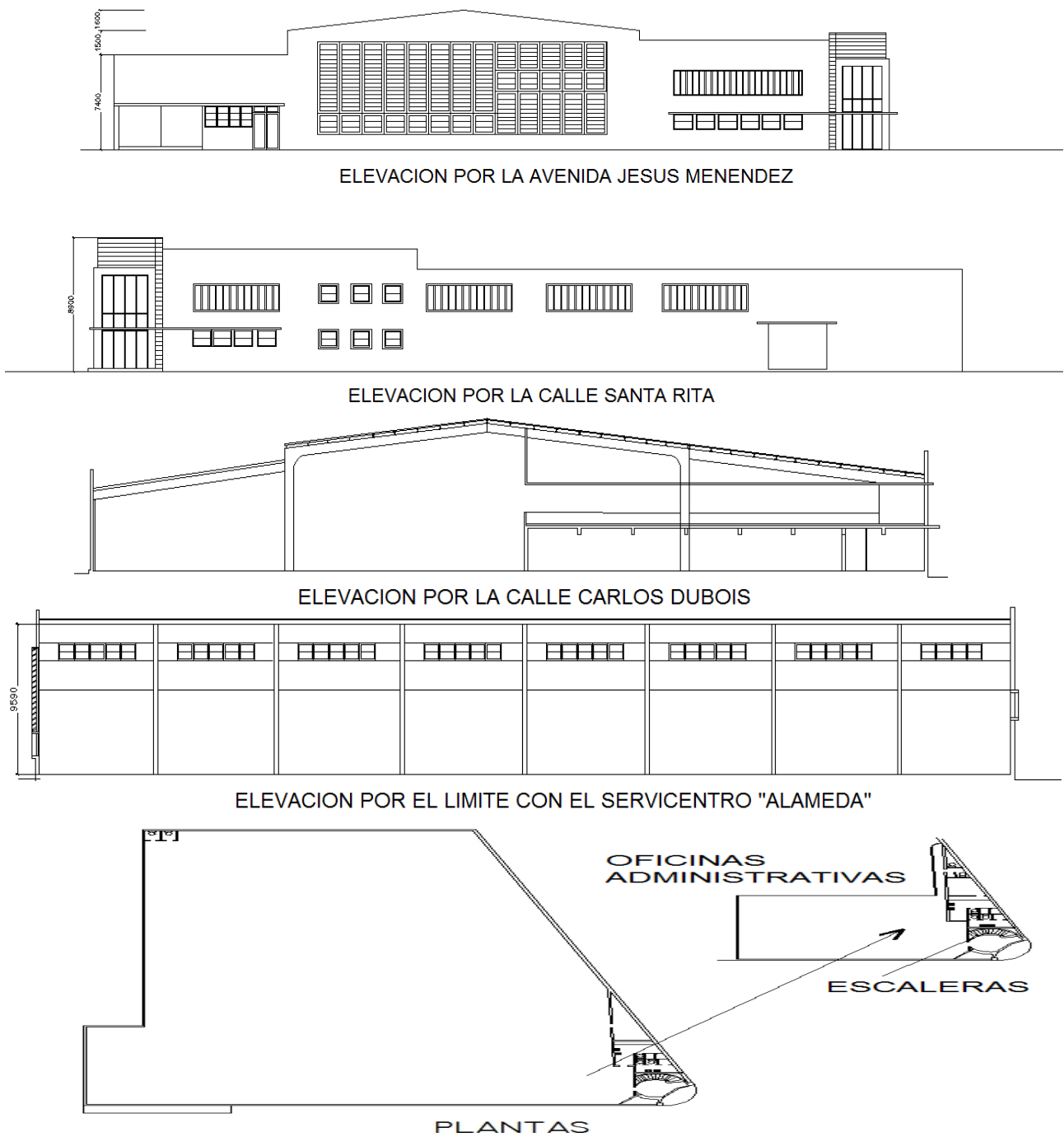
madera (Fig. 3.2), también representa la arquitectura industrial de mediados del siglo XX alrededor de la Bahía de Santiago de Cuba.

“Según los anuncios que se publicaron en un diario de la época, la droguería El Comercio fue construida en 1858 en la calle Marina baja No. 43 esquina a Factoría, en la ciudad Santiago de Cuba, con un laboratorio químico farmacéutico que era el mejor organizado y el más reconocido en la región. Esta droguería-farmacia tuvo siempre gran venta de mostrador de productos farmacéuticos que incluían perfumería, inyectables, tabletas y granulados, además de efectos dentales y representaciones de casas extranjeras, fundamentalmente de los Estados Unidos de América” (Zúñiga, 2014).

Por las informaciones anteriores el edificio siempre estuvo situado en el mismo lugar, sufriendo cambios en la estructura, necesarios para su mejor desempeño social y económico.

A mediados de los años 50 el edificio sufre una transformación total de su estructura de acuerdo a la memoria descriptiva encontrada en el Archivo Histórico Provincial de Santiago de Cuba. En la actualidad se mantiene esa misma estructura del edificio.

Según la memoria descriptiva del Archivo Histórico Provincial de Santiago de Cuba: A grosso modo, estaba planteado que la cimentación sería por pilotes de madera (júcaro negro) y sobre ellos se construiría una base de hormigón armado de acuerdo con los cálculos; sobre los cimientos se fundirían unos pedestales de hormigón armado, diseñados de acuerdo con la carga a soportar. Sobre los pedestales del perímetro del edificio, se fundiría una zapata de hormigón armado, con las dimensiones necesarias para soportar los muros del edificio. Debido a la mala calidad del terreno, se extraerían las capas que sean necesarias, sustituyéndolas por material rocoso, libre de materia orgánica, que será apisonado en capas de 20 centímetros; de momento sólo se usaría la cubierta de hormigón en las naves laterales. En la nave central se usaría una cubierta de fibrocemento acanalado y en las cubiertas de hormigón se utilizaría el refuerzo de malla de tipo Steeltex; se levantarían muros de bloques huecos de hormigón de 6” x 8” x 16” (15.2 cm x 20.3 cm x 40.6 cm). Los muros interiores serían de 0.15 m (15 cm) de ladrillos.



**Fig. 3.2.** Planos del edificio EMCOMED (Plano extraído del Archivo Provincial, Santiago de Cuba).

EMCOMED es una empresa de vital importancia para la distribución de un sensible producto como son los medicamentos, los que son almacenados para luego entregarse en las distintas instituciones de la salud de la provincia, de manera que constituye la única de su tipo en la provincia. Este edificio por su categoría ocupacional, el autor la clasifica como una obra ordinaria según la nueva propuesta de la Norma Sísmica Cubana (2017).

### 3.2 Búsqueda de información de afectaciones del sitio por terremotos fuertes en épocas anteriores

De acuerdo al Magazine “La Noticia”, esta instalación fue azotada por un terremoto en la madrugada del 3 de febrero de 1932, donde se dice que se echó a perder mucha mercancía – en la Droguería de Mestre y Espinosa, solamente, hubo una pérdida de cerca de cuarenta mil pesos (moneda de la época).

Lo anterior expuesto constituye un dato importante en nuestra evaluación porque sabemos que los terremotos de gran intensidad ocasionaron daños en el sitio, por lo que se hace necesario focalizar las vulnerabilidades sísmicas con el objetivo de neutralizarlas, y por consiguiente mitigar el riesgo sísmico. En la Fig. 3.3 se puede observar una imagen de daños producidos por el terremoto del 3 de febrero de 1932 en Santiago de Cuba. Este lugar se encuentra a unos 10 metros del área de estudio.



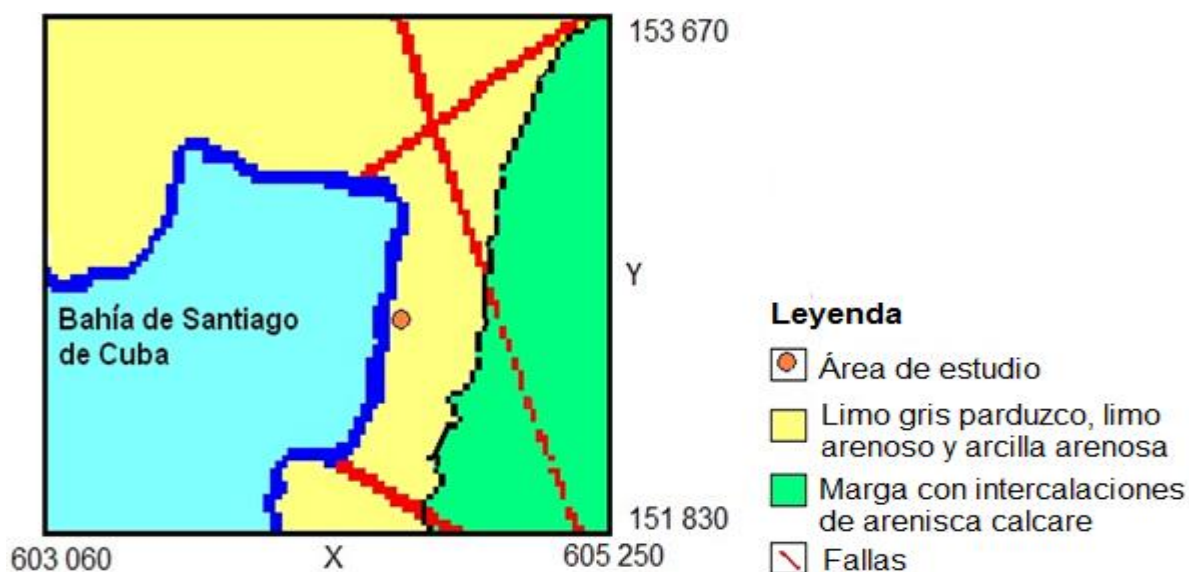
**Fig. 3.3.** Daños producidos por el terremoto de 1932 frente a la Alameda Michaelsen. Foto Archivo CENAI.

Existen muchas imágenes fotográficas del terremoto de 1932 que fueron tomadas alrededor del área de estudio, las cuales demuestran la susceptibilidad del suelo a las amplificaciones de las ondas sísmicas. Desde el anexo 2.1 al 2.3 se pueden observar más imágenes de daños generados por el terremoto de 1932 alrededor del área de estudio.

### 3.3 Búsqueda de información geológica regional, y puntual a través de las investigaciones ingeniero-geológicas del suelo donde descansa la obra bajo estudio

#### 3.3.1 Geología del área de estudio

Por información del Léxico Estratigráfico 4.01 del 2005, geológicamente el área de emplazamiento del edificio EMCOMED está sobre los depósitos marinos del cuaternario ( $MQ_{1v}$ ) formado por depósitos marinos de playas: arenas calcáreas y cuarzosas con restos de conchas, guijarros de playa y bancos de tormenta. En la Fig. 3.4 se ilustra un mapa geológico-tectónico del área de estudio.



**Fig. 3.4.** Mapa geológico-tectónico de la ciudad de Santiago de Cuba: 1: 25 000 (Medina *et al.*, 1999).

#### 3.3.2 Estudios ingeniero-geológicos del área

Los estudios de las investigaciones ingeniero-geológicas se realizan a partir de perforaciones en el terreno, obteniendo testigos o muestras de ese suelo y son llevados al laboratorio para determinar una serie de parámetros, muy útiles para estimar el comportamiento del suelo.

Para validar los resultados de la prospección geofísica por los métodos empleados en la presente investigación, se apoya de dos informes referenciados a partir de trabajos de perforación tomados de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA- Santiago de Cuba), durante los meses de diciembre y abril de 2014 y 2015 respectivamente, en el área cercana al Paseo Alameda. Estos informes recogen una información detallada de la litología del terreno, así como las propiedades físico-mecánicas del suelo presente.

El informe de investigación del año 2014 recoge los resultados de tres calas ingeniero-geológicas llevadas a cabo por la ENIA en la minifábrica de cerveza “Puerto del Rey”, que se encuentra a unos 60 m del edificio EMCOMED. Sus coordenadas son: Y=604427, X=152377 Hoja: 792-22-02, escala 1:2000 y profundidad de estudio de 10 m. Estas muestras tienen la siguiente composición litológica y espesor:

- ✓ Losa de hormigón masivo, entre 0.19 a 0.45 m de espesor.
- ✓ Capa de relleno heterogéneo formado por arena arcillosa con grava con resto de ladrillo y capa vegetal y su compactación es baja. Espesor promedio 1.38m.
- ✓ Capa 1: Arcilla muy plástica arenosa: arcilla de granos finos de plasticidad muy alta, arena de granos finos a medios, húmeda de consistencia baja, resto de fósiles marinos en los primeros intervalos. Espesor promedio igual a 5.30 m.
- ✓ Capa 2: Arcilla muy plástica con arena, arena de granos finos a medios, húmeda de consistencia dura. Espesor no determinado en la perforación.

El informe del año 2015 recoge los resultados de 2 calas, sus coordenadas son: X = 604438, Y = 152324, escala 1:25 000 y profundidad de estudio 15 m. Este estudio de dos calas ingeniero-geológicas tiene la siguiente composición litológica y espesor:

- ✓ Losa de hormigón masivo de 0.10 m de espesor.
- ✓ Capa de relleno heterogéneo formado por arena arcillosa con grava con resto de ladrillo y capa vegetal y su compactación es baja. Espesor de 1 m
- ✓ Capa 1: Arcilla muy plástica arenosa: arcilla de granos finos de plasticidad muy alta, arena de granos finos a medios, húmeda de consistencia baja, resto de fósiles marinos en los primeros intervalos. Espesor promedio igual a 3.85 m.
- ✓ Capa 2: Arcilla muy plástica, granos finos de plasticidad alta, arena de granos finos a medios, húmeda de consistencia dura. Espesor de 7.10 m.
- ✓ Capa 3: Arcilla muy plástica arenosa, finos de alta plasticidad, arena de granos finos y medio, gravas duras, compactación muy alta y densidad alta. Espesor no determinado.

La profundidad de estudio alcanzada en las investigaciones de 2014 fue de 10 m y las del 2015 15 m. Los resultados de ambas son los que se correlacionaron con las mediciones geofísicas.

**Tabla 3.1.** Propiedades físico-mecánicas de los suelos de emplazamientos en el área del “Paseo la Alameda” obtenidas a partir de los resultados de laboratorio (Informe de la ENIA Santiago de Cuba, 2015).

<i>Propiedades</i>	<i>Relleno</i>	<i>Capa 1</i>	<i>Capa 2</i>	<i>Capa 3</i>
Número de golpes (SPT)	5	4	11	30
Límite líquido (LL) %	43	76	52	55
Límite plástico (LP) %	25	21	21	21
Índice de plasticidad (IP) %	18	55	31	34
Peso específico ( $\gamma_s$ ) kg/m <sup>3</sup>	2650	2720	2683	2650
Humedad natural (Wn) %	25	27.23	26	23.4
Densidad húmeda ( $\gamma_f$ ) kg/cm <sup>3</sup>	1921	1897	1927	1949
Densidad seca ( $\gamma_d$ ) kg/cm <sup>3</sup>	1537	1485	1529	1579
Densidad saturada ( $\gamma_{sat}$ ) kg/cm <sup>3</sup>	1959	1934	1962	1982
Índice de poros (e) s/d	0.72	0.84	0.75	0.68
Saturación (S) %	92	88	93	31
Módulo de deformación (E) Kpa	700	600	9000	20000
Coeficiente de Poisson ( $\mu$ ) s/d	0.35	0.40	0.40	0.41
Grava %	16	4	2	6
Arena %	20	26	24	32
Finos %	64	70	74	62

Los resultados de las propiedades físico-mecánicas de la tabla 3.1 son los que se usaron en la modelación del suelo por los programas ProShake y Pshake. Como los parámetros obtenidos en el sitio por la ENIA en los años 2014 y 2015 son similares se tomaron los del 2015. Además porque la profundidad de último estudio (15 m) alcanzada en este estudio fue mayor que la del primero (10 m).

### **3.4 Empleo de métodos instrumentales por etapa de trabajo**

Se propusieron emplear cuatro métodos de ensayos de suelo como la sísmica de refracción, tomografía eléctrica, microsismo y el georadar. Los resultados de los métodos anteriores darán las características in situ del área bajo estudio, muy importantes para ejecutar y modelar el espectro de respuesta del suelo.

### **3.4.1 Etapa de organización de los trabajos**

#### **3.4.1.1 Recorrido por el área de estudio**

Se realizó un recorrido por el área de estudio con vista hacer una exploración visual en la superficie del terreno con el objetivo de monitorear de forma preliminar las condiciones de suelo y además trazar la ubicación de los perfiles sísmicos y tomográficos, así como el punto de medición de microsismos. Para llevar a cabo la construcción de los perfiles geofísicos se seleccionó el lateral que está frente al parque de la “Alameda”, por la Avenida Jesús Menéndez y el punto del método de los microsismos fue elegido dentro del almacén y a las afueras de este por la calle Carlos Dubois entre Santa Rita y Castillo Duany. La ubicación de los métodos de tomografía eléctrica y sísmica de refracción radica en la relación que tendrán los receptores y geófonos con el suelo, que no tiene otra posición en el sitio por estar cementada y mayor longitud para el emplazamiento de los perfiles. En cuanto al método de los microsismos se ubicaron en esas posiciones para evitar el ruido no deseable.

#### **3.4.1.2 Selección de los métodos geofísicos a emplear**

En el siguiente procedimiento se seleccionaron cuatro métodos geofísicos:

- Sísmica de refracción
- Tomografía eléctrica
- Microsismos
- Georadar

La selección del complejo de métodos responde al volumen de información brindada por los cuatro métodos, que a partir de sus resultados permitieron hacer una estimación del comportamiento del suelo ante carga dinámicas en el sitio.

#### **3.4.1.3 Comprobación y mantenimiento a la instrumentación a emplear en el campo**

Antes de salir a realizar las mediciones de campo se efectuaron las comprobaciones a las baterías y funcionalidad de la técnica, y se limpiaron los contactos eléctricos previendo una mejor recepción de la señal proveniente de las profundidades del subsuelo. Al no existir deficiencias de los equipos de medición todo estuvo listo para la siguiente etapa.

### **3.4.2 Etapa de trabajo de campo**

Los métodos empleados para el estudio de suelo del área bajo estudio se organizaron de manera que el método de sísmica de refracción, tomografía eléctrica y georadar dibujaron una

línea recta, debajo de la cual se obtuvieron sus resultados hasta una profundidad determinada por cada uno, es decir perfil 2D (largo y profundidad). A diferencia de los tres métodos anteriormente mencionados, el método de los microsismos se emplazó en un punto para obtener propiedades dinámicas del suelo.

En el caso del georadar las mediciones de campo fueron realizadas por la Empresa Geominera Oriente, pero no se tomaron en cuenta sus resultados para el presente trabajo ya que la profundidad de estudio alcanzada fue de apenas casi tres metros, lo cual no representa suficiente información, tomando en cuenta que los pilotes de madera de la estructura descansan a 10 m aproximadamente medido desde la superficie. Por el contrario, a través del empleo de los métodos sísmica de refracción, tomografía eléctrica y microsismos sí alcanzaron los resultados esperados.

### 3.4.2.1 Emplazamiento de los equipos sobre el terreno

La Fig. 3.5 muestra la ubicación de las mediciones llevadas a cabo en el bajo estudio. Los perfiles fueron conformados por los métodos de tomografía eléctrica, sísmica de refracción y georadar. El método de los microsismos se efectuó sobre un punto fuera de la instalación. Este complejo de métodos se emplazó sobre el terreno con el objetivo de obtener variables geofísicas, obteniendo perfiles 2D para el caso de los tres primeros y un acelerograma de tres componente para los microsismos.



**Fig. 3.5.** Ubicación del área de estudio y las mediciones realizadas. Imagen tomada de Google earth.

### Sísmica de refracción

Los pasos fundamentales para construir el perfil sísmico 2D fueron los siguientes:



- Emplazamiento del equipamiento en los perfiles y puesta en funcionamiento de los mismos.
- Separación de los geófonos o receptores equidistantemente a 3 m, alcanzando una distancia de 37 m.
- Calibración del equipo.
- Extracción de los ficheros obtenidos del proceso de medición.

En la Fig. 3.6 se muestra una imagen la línea de perfil que une a los geófonos (cable situado a la izquierda) para hacer las mediciones de sísmica de refracción sobre el terreno. La razón de la separación de los geófonos a 3 m fue porque la señal obtenida del golpe de la mandaría no iba a registrarse en los últimos geófonos por ser el depósito un suelo blando. Sería factible mayor distancia entre geófonos porque se lograría mayor profundidad de estudio, pero la señal no estaría clara para los últimos geófonos y se inducen errores de precisión en el perfil para la última capa en valores de velocidad de la onda y profundidad.



**Fig. 3.6.** Emplazamiento para el método de sísmica de refracción. Foto tomada por el autor.

### Tomografía eléctrica

Los pasos fundamentales para construir un perfil de tomografía eléctrica 2D son parecidos a la del método de sísmica de refracción, pero con la diferencia que se energiza el suelo con corriente eléctrica y la respuesta del suelo son captadas por electrodos metálicos. En la Fig. 3.7 se muestra un arreglo para el método de tomografía eléctrica. El procedimiento fue el siguiente:

- Emplazamiento del equipamiento en los perfiles y puesta en funcionamiento de los mismos.
- Separación entre electrodos a 5 m.
- Calibración del equipamiento.
- Extracción de los ficheros obtenidos del proceso de medición.

La separación entre electrodos (5 m) fue el máximo permisible en el arreglo, lográndose una profundidad máxima de 17.2 m. El dispositivo usado o arreglo usado fue Wenner ya que de todos los predeterminados en el equipo es el que mejor resolución tiene para detectar variaciones horizontales.



**Fig. 3.7.** Emplazamiento para el método de tomografía eléctrica en el área alrededor del edificio EMCOMED. Foto tomada por el autor.

### Métodos de los microsismos

A través método de los microsismos el sismómetro utilizado fue emplazado en un punto a las afueras del edificio, donde existiera un contacto físico con el suelo, es decir no separado por una losa de hormigón u otro tipo de material. De esa forma hay una interacción directa hacia el depósito de suelo que subyace la estructura del edificio.

Emplazamiento sobre de los puntos de medición proyectados.

- Calibración del equipamiento.
- Obtención e identificación de los registros en los puntos proyectados.



**Fig. 3.8.** Punto de medición del método de los microsismos sobre un punto a las afueras del edificio EMCOMED. Foto tomada por el autor.

### **3.4.3 Etapa de gabinete**

#### **3.4.3.1 Procesamientos de las señales obtenidas a través de los diferentes métodos**

Todas las señales obtenidas en el proceso de medición se procesaron mediante softwares específicos por cada método en particular para obtener los perfiles en la tomografía eléctrica y la sísmica de refracción. Para el método de los microsismos se obtuvo un sismograma de tres componentes (norte-sur, este-oeste y vertical). Los softwares usados son **RES2DINV** para la tomografía eléctrica, **Pickwin** para la sísmica de refracción y **Degtra 2000** en el método de los microsismos.

#### **3.4.3.2 Correlación e interpretación de los perfiles geofísicos con la información geológica**

##### Sísmica de refracción

Mediante el método sísmico fue confeccionado un perfil con orientación suroeste-noreste, longitud de 37 m, profundidad de estudio de 7 a 10 m. En la Fig. 3.9 es mostrado el perfil sísmico llevado a cabo en áreas del edificio de EMCOMED, a partir de las primeras llegadas de las ondas longitudinales ilustradas en sismogramas (Ver anexo 1.4 a 1.6) y conformando el hodógrafo de encuentros (Anexo 1.7), obteniendo del software de análisis (**Pickwin**) velocidades de la onda longitudinal ( $V_p$ ), que son divididos por capas o estratos en los primeros metros del subsuelo.

Para obtener las velocidades de la onda cortante ( $V_s$ ), se parte de la expresión de la teoría de las ondas elásticas:

$$\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{\frac{1-\mu}{0.5-\mu}} \quad (3.1)$$

Como para la primera capa el coeficiente de Poisson ( $\mu$ ) es 0.40, se sustituye y resulta lo siguiente:

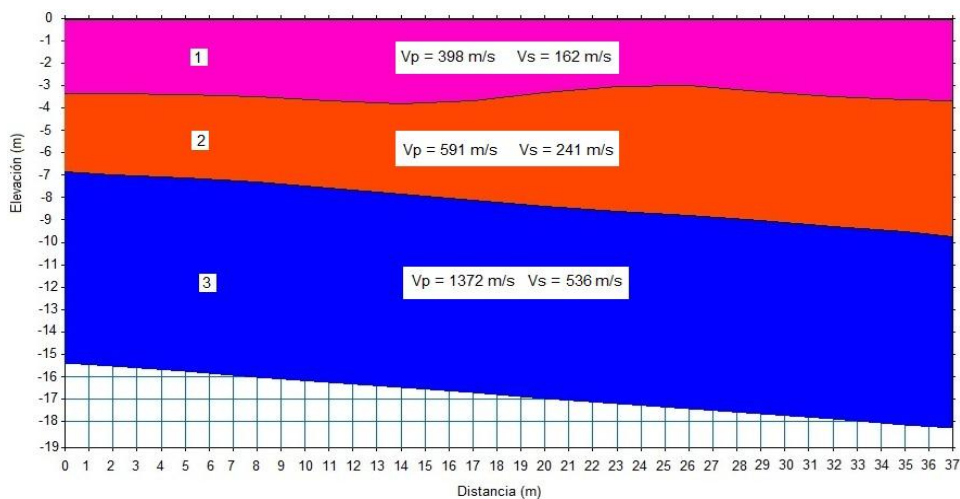
$$\frac{V_P}{V_S} = 2.45, \text{ entonces } V_S = 162 \text{ m/s}$$

Segunda capa el coeficiente de Poisson es 0.40:

$$V_S = 241 \text{ m/s}$$

El coeficiente de Poisson en la tercera capa es igual a 0.41:

$$V_S = 536 \text{ m/s}$$



**Fig. 3.9.** Perfil sísmico por velocidades de ondas longitudinales ( $V_p$ ). Extraído del programa **Pickwin**.

En la tabla 3.2 se presenta el resumen de los resultados de las mediciones sísmicas ejecutadas en área de la Droguería, las cuales nos darán detalles del perfil para una interpretación adecuada.

De todo eso se puede interpretar lo siguiente:

- Capa 1: constituye la capa superior, con una velocidad de ondas longitudinales baja, por el orden de 398 m/s y espesor promedio de 3.5 m. cuya compacidad es baja y tiene permeabilidad alta. Por lo tanto este estrato no sirve para la cimentación de edificaciones como la Droguería.

- Capa 2: subyace por debajo de la primera, con una velocidad de las ondas longitudinales baja, con un valor de 591 m/s. Su compacidad es baja y permeabilidad alta. Tampoco constituye el estrato resistente de la estructura.
- Capa 3: es la capa más profunda, la velocidad de la onda longitudinal  $V_p$  es moderada (1372 m/s), compacidad muy alta y densidad relativa muy densa. Hasta la superficie de este estrato, fue donde se hincaron los pilotes de madera de acuerdo a la memoria descriptiva encontrada en el Archivo Histórico Provincial de Santiago de Cuba.

La última frontera refractora a través del método sísmica de refracción fue detectada entre 7 y 10 m, esta profundidad se corresponde con la información que poseen las calas del sitio y las excavaciones ejecutadas en los años 50 del siglo XX. Por lo tanto los pilotes de madera fueron enterrados hasta esta superficie que constituye la parte superior del primer estrato. Los resultados de las estas mediciones sísmicas permitieron clasificar el perfil del suelo en D, considerando para ello las condiciones plasmadas en la propuesta de norma sismorresistente del 2017 para estos tipos de suelo.

**Tabla 3.2:** Resultados de las mediciones sísmicas realizadas en las áreas sobre el suelo de la Droguería.

$V_p$ (m/s)	$V_s$ (m/s)	Espesor (m)	Descripción
398	162	3.5	Arena arcillosa con grava.
591	241	4 - 6	Arcilla muy plástica arenosa.
1372	560	-	Arcilla muy plástica con arena.

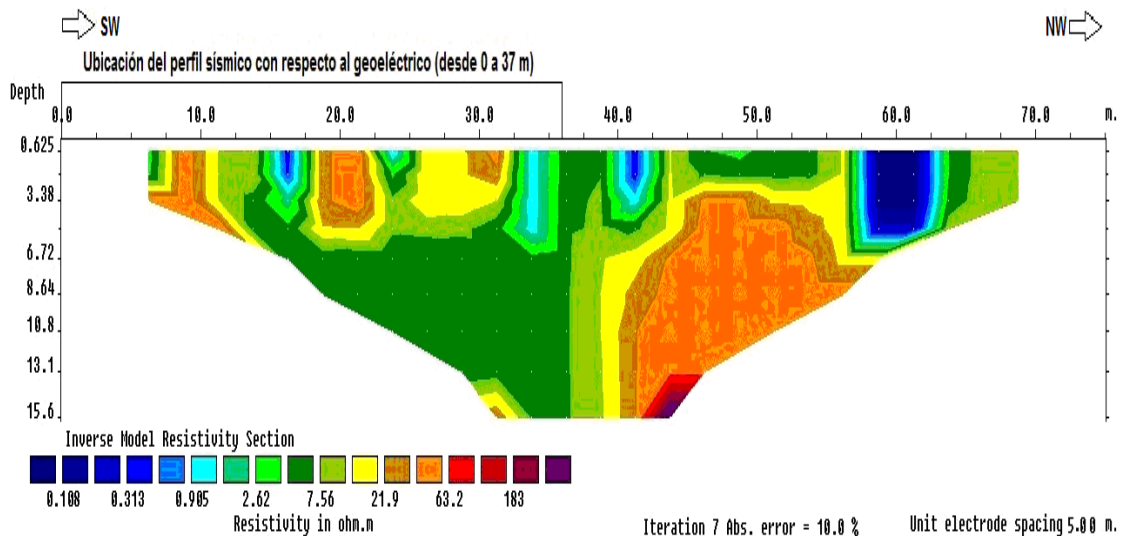
### Tomografía eléctrica

La Fig. 3.10 ilustra un perfil 2D geoelectrico con una dirección aproximadamente sur-norte, alcanzando una extensión horizontal de 75 m y profundidad de estudio 15.6 m, donde los electrodos se separaron a 5 m de forma equidistante. Por otra parte se le anexa la ubicación de la puesta sísmica que comienza en el primer electrodo (0.0 m) y termina a los 37 m. La variante escogida en la medición y procesamiento fue la de Wenner, por ser la que menos generaba en los trabajos de campo. El procesamiento de la señal obtenida es efectuado a través del software RES2DINV, líder para estos tipos mediciones.

Muchos estudios geoelectricos no muestran la división por capas homogéneas, como siempre se llevan a cabo mediante los de sísmica de refracción. En este caso un factor que limita esta división son las condiciones variables de la salinidad del agua que saturan al suelo y rocas

existentes en el sector estudiado, pero esto no es una limitación para que se pueda interpretar este tipo de perfil.

La Fig. 3.10 muestra un gradiente de disminución de la resistividad eléctrica en la superficie, que es típico de la presencia de agua de mar, se pueden apreciar a través de pequeños cuerpos anómalos en la parte superficial, cuyos valores de resistividad son los más bajos dentro del corte geológico, oscilando entre 0.10 a 0.31ohm.m. Los mayores valores de resistividad, 63 a 183 ohm.m representan los suelos y rocas menos saturados.



**Fig. 3.10.** Perfil geoelectrico realizado en áreas de la droguería (EMCOMED). Obtenido del programa Geoelectrical Imaging (2009).

### Análisis del método de los microsismos

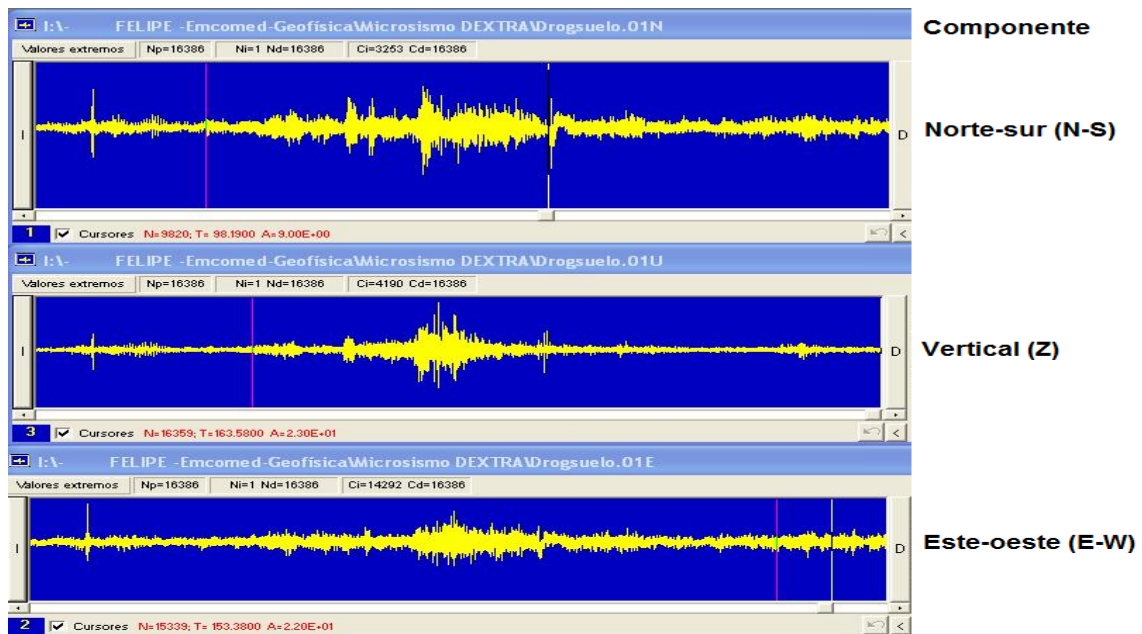
En la puesta en marcha de las mediciones instrumentales se seleccionaron dos puntos (uno dentro de la instalación y el otro fuera), pero solo se tuvieron en cuenta las mediciones del punto de afuera ya que las señales obtenidas dentro de la instalación estaban muy ruidosa.

Como resultado se obtuvieron señales de velocidad, lo que facilitó, luego de la obtención de los espectros de respuesta de Fourier y de la respuesta de velocidad, empleando el software **DEGTRA-2000** del Instituto de Ingeniería de la UNAM, construir una base de datos con valores de períodos y frecuencias en cada dirección.

Al procesar la señal de los microsismos se obtuvo un sismograma (Fig.3.11) formada por tres componentes con los siguientes periodos de suelo (T): norte-sur T=0.502 seg, este-oeste T=0.513 seg y la vertical T=0.582 seg. En el campo se obtuvo un registro de 10 minutos, pero



en el gabinete se analizaron un tramo de 30 seg, tomando el tramo más idóneo para el análisis de la señal.



**Fig. 3.11.** Medición de microsismos de tres componentes de un punto en el área de interés. Obtenido por el programa **DEGTRA-2000**.

Con el apoyo de la propuesta de norma cubana de sismorresistencia del 2017 se hace una clasificación partiendo de los datos de los microsismos, calas ingeniero-geológicas, tomografía eléctrica y sísmica de refracción de la siguiente forma: el período de recurrencia es de 475 años, 10 % de probabilidad de recurrencia y la aceleración del sitio es de  $297.77 \text{ cm/s}^2$ .

### 3.4.3.3 Correlación entre los métodos de tomografía eléctrica y refracción sísmica

Esta interpretación se corresponde con las condiciones geológicas del sitio y se correlaciona con la información que se tiene. En los resultados de la tomografía eléctrica se muestran valores bajos de resistividad que se corresponde con la presencia de agua de mar y los materiales sedimentarios como la arcilla, además de la infiltración de esta agua hasta la profundidad de estudio, perdiéndose de esta forma las fronteras de los diferentes estratos litológicos.

Con la aplicación de los métodos de sísmica de refracción y tomografía eléctrica se hace una breve descripción del corte geológico en sus primeros metros (10 - 17 m), donde al ser correlacionado por ambos métodos, se caracteriza la presencia de suelos arcillosos saturados de agua de mar.

A través del método sísmico de refracción se pudo detectar la frontera de mayor velocidad que se corresponde con el estrato resistente, el que fue detectado entre 7 y 10 m de profundidad como promedio (Fig. 3.9), lo que se correlaciona con los resultados de las calas ingeniero-geológicas llevadas a cabo en el área de estudio.

La tomografía eléctrica muestran valores de resistividad más bajos (0.10 a 0.31 ohm.m) en la superficie representados por pequeños cuerpos. La infiltración de las aguas disminuye la resistividad del medio, esto será un factor del incremento de las oscilaciones mecánicas del suelo provocada por los sismos, lo que se incrementan también los daños estructurales.

### 3.5 Probabilidad de ocurrencia de fenómenos inducidos en el sitio como licuación y los deslizamientos

Se realizó la valoración de los criterios chinos que fueron abordados en el capítulo 2, a partir de los resultados de las calas ingeniero-geológicas del área (tabla 3.3).

Comparando los valores de los parámetros de la tabla 3.3 con el porcentaje que les corresponde, queda de la siguiente forma:

- Peso de la partículas finas en las 4 capas (70, 74, 62 y 64) es mayor a 0.15 Peso seco ( $\gamma_d$ )
- Límite líquido en las 4 capas (76, 52, 55 y 43) es mayor a 35 %.
- Contenido de humedad natural ( $W_n$ ) menor que  $0.99 \times LL$ .

**Tabla 3.3.** Valoración de la probabilidad de ocurrencia de la licuación de suelo en el área de la Alameda utilizando las condiciones del criterio chino (Brandes, 2003).

Estrato	Finos	Límite líquido (LL)	Contenido de humedad ( $W_n$ )
1	70>15%	76>35%	27.23<68.4
2	74>15%	52>35%	26.00<46.8
3	62>15%	55>35%	23.40<49.5
4	64>15%	43>35%	25.00<38.0

De acuerdo a la comparación de los valores tomados de las calas ingeniero-geológicas dada por los informes de la ENIA-Santiago de Cuba 2014 y 2015, no hay una satisfacción bajo el criterio chino de que ocurra el fenómeno de la licuación.



Por otra parte la arcilla presente en el sitio es muy plástica, entonces no cumple con el punto 3 de la Organización Panamericana de Salud (OPS, 2003), donde la licuación es susceptible para suelo no cohesivo, suelto y saturado. El suelo del sitio está saturado de agua, pero es cohesivo, por lo que limita la movilidad libre de las partículas durante un movimiento sísmico, impidiendo que se produzca el fenómeno de la licuación.

### 3.6 Valoración de las condiciones del suelo para determinar la respuesta ante la acción de cargas dinámicas

Para analizar la amplificación por efecto de sitio provocado por un terremoto de moderada a gran intensidad en el suelo que soporta la Droguería, se analizaran diferentes aspectos, teniendo como base los resultados obtenidos en el área por la prospección geofísica, la información geológica general, los microsismos y las calas ingeniero-geológicas. La tabla 3.4 muestra una serie de parámetros tomando como partidas todos esos resultados.

Para hallar período del suelo ( $T_s$ ) primero es necesario determinar la velocidad cortante ( $V_s$ ), conociendo el la altura (H) desde la superficie. Este parámetro es fundamental para evaluar la posibilidad de la existencia de la resonancia generada por la acción de un terremoto, haciendo una comparación con el período de la estructura. Si ambos período son similares, entonces las condiciones para que se produzca la resonancia es favorable.

**Tabla 3.4.** Parámetros extraídos de los informes de la ENIA 2014 y 2015 y la velocidad de la onda cortante ( $V_s$ ) del método sísmico empleado para analizar la amplificación de la señal.

Capa	Espesor (m)	$\gamma_w$ (kg/m <sup>3</sup> )	$G_0$ (Mpa)	$V_s$ (m/s)
1	1.4	18.4	45.2	162
2	2.1	19.2	47.1	162
3	3.8	19.0	143.1	241
4	5.8	18.9	410.3	560

$$\frac{13.1}{V_s} = \frac{1.4}{162} + \frac{2.1}{162} + \frac{3.8}{241} + \frac{5.8}{560}$$

$$V_s = \frac{13.1}{0.048} = 272.92 \text{ m/s}$$

$$T_s = \frac{4H}{V_s} = \frac{4(13.1)}{272.92} = 0.19$$

**Tabla 3.5:** Factor de amplificación del sitio (Wald *et al.*, 1999).

Tipo de rocas, suelo y Ts en segundos	Aceleración pico en roca			
	<0.15 g	0.15 – 0.25 g	0.25 – 0.35 g	>0.35 g
<b>Mesozoico (Vs=589m/s)</b>				
0.1 – 0.5	1.0	1.0	1.0	1.0
0.4 - 2.0	1.0	1.0	1.0	1.0
<b>Terciario (406 m/s)</b>				
0.1 – 0.5	1.14	1.10	1.04	0.98
0.4 - 2.0	1.27	1.25	1.22	1.18
<b>Cuaternario (333 m/s)</b>				
0.2 – 0.5	1.22	1.15	<u>1.06</u>	0.97
0.4 - 2.0	1.45	1.41	1.35	1.29

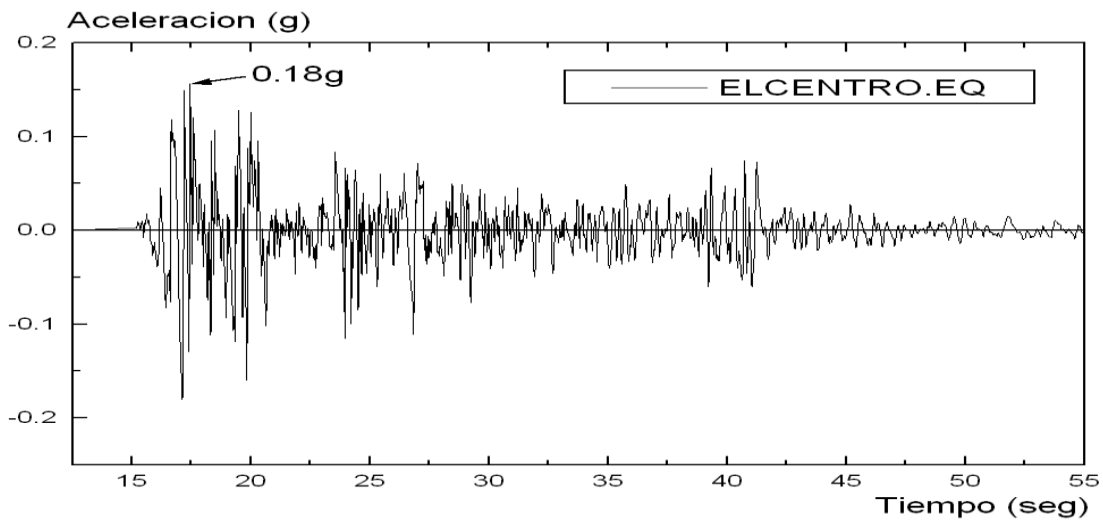
Para determinar el valor del coeficiente de la aceleración que le corresponde al suelo en el área de estudio fue necesario tener en cuenta que los sedimentos son del cuaternario,  $V_s = 272,92$  m/s,  $T_s = 0.19$  s, la aceleración pico en roca es de  $0.97$  m/s. Entonces el factor de amplificación obtenido en la tabla 3.5 para el suelo del sitio estudiado fue de 1.06.

### 3.6.1 Respuesta dinámica del perfil

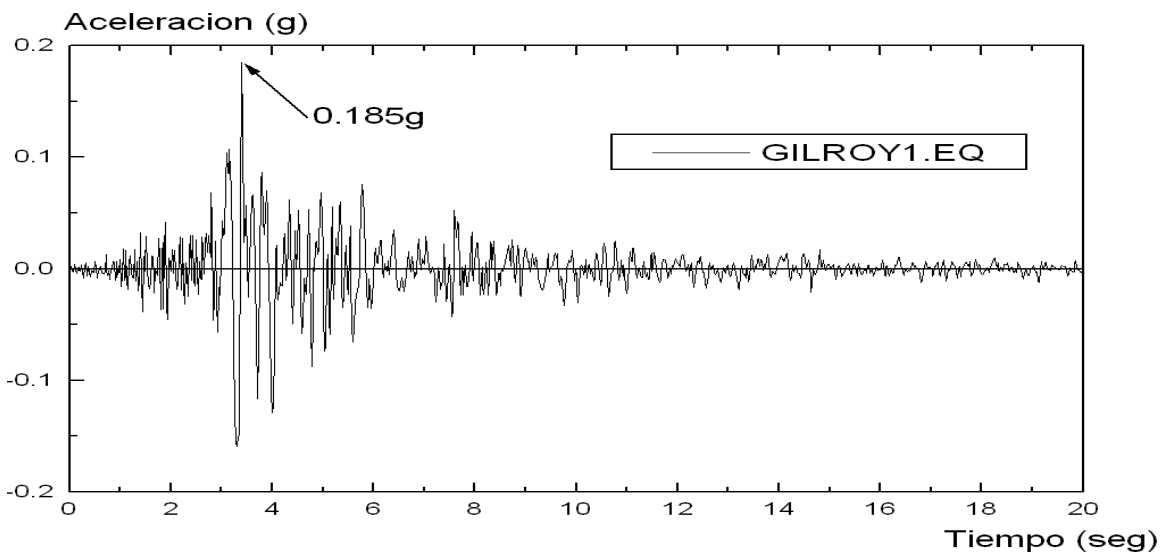
#### 3.6.1.1 Análisis de la señal obtenida por el programa ProShake

La señal (Fig. 3.12) que se usó como entrada en este análisis fue el movimiento El Centro registrado del terremoto del Valle Imperial de 1940, cuya magnitud era de 7.0 en la escala de Richter y una distancia epicentral de 12.0 Km. También el movimiento de Gilroy1 producido por el terremoto de Loma Prieta (1989). Se hizo una modelación para el sitio, tomando como datos de entrada las señales sísmicas de estos dos movimientos.

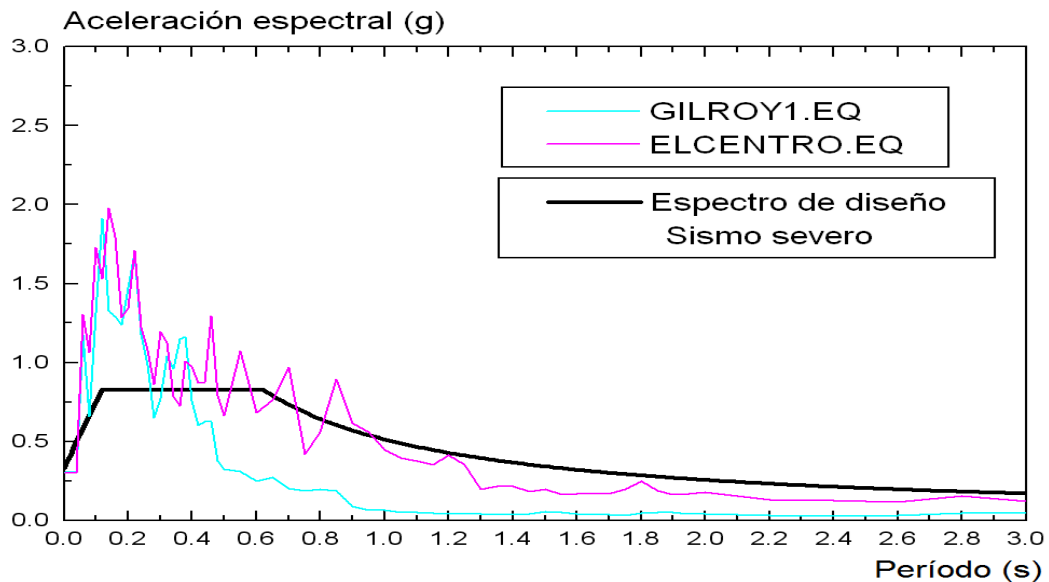
Los sismogramas (Fig. 3.12 y 3.13) de ambos movimientos serían los que se obtendrían en el sitio al generarse un terremoto con características similares, no a lo que se obtuvo en esos movimientos. En otras palabras estos son los sismogramas de la modelación del suelo que subyace al edificio EMCOMED.



**Fig. 3.12.** Acelerograma del terremoto El Centro obtenido por el software ProShake a partir de parámetros locales determinados en el área de estudio.



**Fig. 3.13.** Acelerograma del movimiento Gilroy1 obtenido por el software ProShake a partir de parámetros locales determinados en el área de estudio.



**Fig. 3.14.** Espectros de aceleraciones de respuesta para los movimientos de Gilroy1 y El Centro y el espectro de diseño para sismos severos normados por la propuesta de norma sismorresistente 2017. Obtenido por el software ProShake.

Cada uno de los parámetros se explican en el anexo 5.1 y sus resultados son mostrados en la tabla 3.6. Se definen la columna del suelo, las características dinámicas de los materiales y la señal de entrada. Entonces ya con todos estos elementos se realiza el cálculo de los parámetros para cada movimiento (El Centro y Gelroy1).

**Tabla 3.6.** Parámetros que caracterizan los movimientos sísmicos a nivel del estrato rígido (estrato 3).

Parámetros de los movimientos sísmicos	Unidades	GILROY1.EQ	ELCENTRO.EQ
Aceleración máxima	(g)	0.1850	0.1800
Velocidad máxima	m/seg	0.1311	0.1835
Desplazamiento máximo	m	0.0431	0.0308
Aceleración RMS	g	0.0404	0.0357
Intensidad de Arias	m/seg	0.1851	0.5321
Intensidad del espectro de respuesta	g <sup>2</sup>	0.6824	1.7720
Período predominante	seg	0.3703	0.6827
Período medio	seg	0.2056	0.5403
Duración acotada	seg	4.8000	24.020
Duración de Trifunac	seg	6.6200	24.400
Aceleración espectral a 0.3 seg	(g)	0.4438	0.3865
Aceleración espectral a 1.0 seg	(g)	0.0475	0.2662
Intensidad Característica	(g <sup>1.5</sup> *seg <sup>0.5</sup> )	0.0200	0.0333

### 3.6.1.2 Análisis de la señal sísmica por el programa PShake

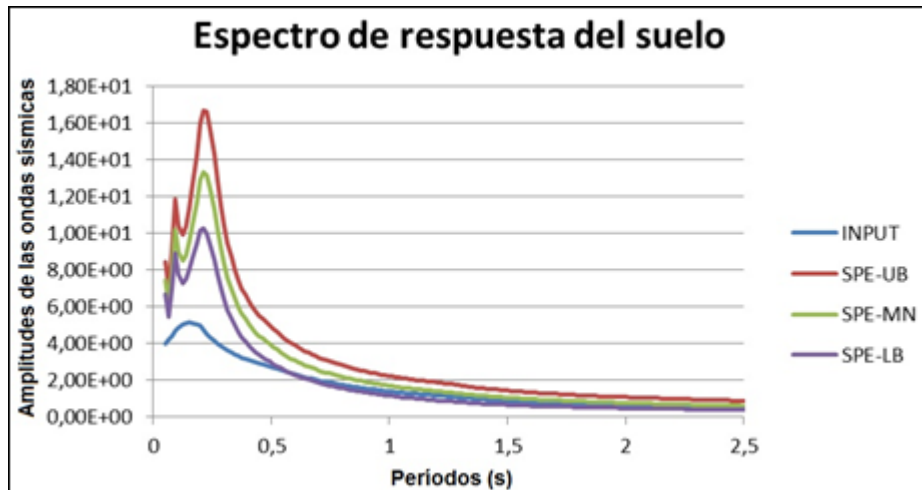
Otro método para estimar el comportamiento dinámico del suelo fue el de **Pshake** (Sanó y Pugliese, 1991), como datos de entrada se usan las propiedades mecánicas de los suelos (Estáticas: espesores, densidad y velocidad de la onda cortante  $V_s$ ; Dinámicas: curvas de reducción del módulo de corte y curvas de amortiguación de los suelos) y el movimiento del suelo en el lecho rocoso del sitio de estudio, como espectro de respuesta de peligro uniforme.

En la tabla 3.7, los parámetros del modelo 1 corresponden al informe de las investigaciones ingeniero-geológicas del año 2015 y el 2 a las del 2014. Como la instalación de estudio pertenece a una obra ordinaria de acuerdo a sus características ajustadas en la propuesta de norma, el factor de amplificación escogido fue medio.

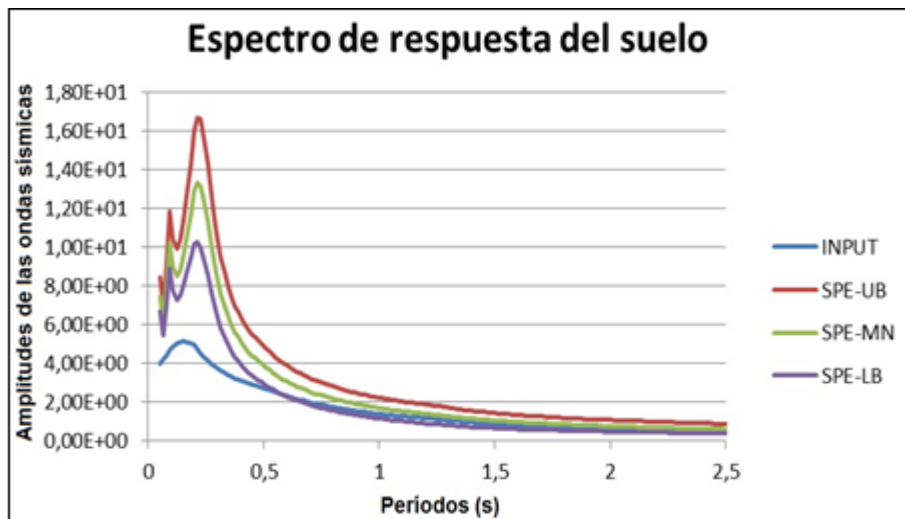
En las figuras 3.15 y 3.16 se muestran los espectros de respuesta del suelo del área bajo estudio. Se puede ver que tienen similares características ya que los datos de entradas de las calas son parecidos. Estos espectros son recomendados para tenerlos en cuenta los proyectistas en el diseño de nuevas estructuras en el sitio. El rango de período varía entre 0.1s y 0.5s son característicos de las construcciones de la zona bajo estudio.

**Tabla 3.7.** Modelos estratigráficos del área de la Alameda. Donde:  $\delta f$  densidad húmeda,  $V_s$  velocidad de onda cortante por mediciones geofísicas in situ, FA factor de amplificación de la modelación 1D.

Modelos	Tipo de suelo	Espesor (m)	$\delta f$ (Kg/ m <sup>3</sup> )	$V_s$ (m/s)	FA Alto	FA Med.	FA Baj.
1	Arcilla muy plástica arenosa	5.4	1.90	162	2.42	<b>2.04</b>	1.6
	Arcilla muy plástica con arena	7.10	1.93	241			
	Arcilla muy plástica arenosa	2.5	1.95	560			
	Roca	-	2.04	800			
2	Arcilla muy plástica arenosa	6.75	1.90	162	2.34	<b>1.95</b>	1.6
	Arcilla muy plástica con arena	1.8	1.89	241			
	Roca	-	2.04	800			



**Fig 3.15.** Espectro de respuesta del suelo a partir de la información de los resultados del informe de investigación ingeniero-geológico del 2014 por la ENIA.



**Fig. 3.16.** Espectro de respuesta del suelo a partir de la información de los resultados del informe de investigación ingeniero-geológico del 2015 por la ENIA.

### 3.7 Validación del cumplimiento del procedimiento

El procedimiento utilizado cumplió con las expectativas trazadas ya que con su aplicación demostró que la ocurrencia de un fenómeno inducido como la licuación de suelo generado por un sismo de gran intensidad es nula en el área bajo estudio, demostrándose que no cumple ni con las condiciones del criterio chino (Brandes, 2003) ni con las 7 condiciones estipuladas en la Organización Panamericana de la Salud (OPS, 2003). A través de la modelación por el programa Proshake se obtuvo los espectros de aceleraciones de respuesta para los movimientos de Gilroy1 y El Centro y el espectro de diseño para sismos severos característico del sitio que debe ser tomado en cuenta por los proyectistas para obras ubicadas en el sitio.

A través de la modelación por el programa Pshake (Sanó y Pugliese, 1991) se obtuvo un factor de amplificación por el orden de 2, es decir la amplificación de la señal del suelo puede ser incrementada 2 veces por la acción de un sismo de energético, existiendo un evidente aumento de la intensidad sísmica en esta área. También se obtuvieron dos espectros similares a tener en cuenta por los proyectistas en el diseño de obras localizadas en el área estudiada.

Es considerado el procedimiento adecuado para el estudio y conservación de cualquier patrimonio construido sometido a la acción de cargas dinámicas relevantes ya que a partir de los resultados de laboratorio y de campo se estima el comportamiento de suelo ante cargas relevantes, detalla los peligros locales del suelo y sirve de apoyo a otras investigaciones para valorar el comportamiento de una estructura en estudios de vulnerabilidad, relación suelo-estructura y riesgo sísmico.

### **3.8 Conclusiones parciales**

- Se validó el procedimiento para los depósitos de suelo del Edificio de EMCOMED como caso de estudio.
- La tomografía eléctrica permitió localizar la proximidad a la superficie de agua marina, mostrando un gradiente de disminución de la resistividad eléctrica (0.10-0.31 ohm.m).
- Los valores de velocidad de las ondas longitudinales ( $V_p$ ) aumenta con la profundidad por aumentar la compactación del material. Siendo la capa tercera más rígida que las suprayacentes (primera y segunda).
- Se clasificó el suelo como un perfil tipo D de acuerdo a la propuesta de norma sismorresistente del 2017.
- Se descarta la posibilidad de ocurrencia de la licuación de suelo, ya que no se satisface el criterio chino (Brandes, 2003) y los sedimentos son arcillosos son rígidos (OPS, 2003).
- Se obtuvieron espectros de respuesta en la modelación del suelo del sitio para que los proyectistas lo tomen en cuenta en sus diseños.
- La modelación demostró que la señal sísmica del suelo en el sitio se amplificará 2 veces cuando esté sometido a un terremoto energético generándose el efecto de sitio, existiendo un aumento de la intensidad sísmica.

## CONCLUSIONES GENERALES

- Fue realizada la fundamentación teórica y conceptual del conocimiento y tratamiento del comportamiento de los suelos sometidos a cargas dinámicas relevantes, mediante métodos geofísicos y otros métodos.
- Se caracterizó la hipótesis, métodos de ensayos, condiciones de suelos y pasos que constituyen el procedimiento para la estimación del comportamiento de suelo ante cargas dinámicas relevantes.
- Se validó el procedimiento para los depósitos de suelo del Edificio de EMCOMED como caso de estudio.
- La validación del procedimiento demostró descartar ocurrencia de la licuación de suelo, ya que no se satisface el criterio chino (Brandes, 2003) y los sedimentos arcillosos no coinciden con las condiciones planteadas por la OPS (2003).
- A través de las modelaciones de suelo por los programas ProShake versión 1.1 y PShake se obtuvieron espectros de respuestas para el suelo del sitio, que deben tener en cuenta los proyectistas en sus diseños.
- El procedimiento obtenido es aplicable en otras áreas de interés y adecuado para el estudio y conservación del patrimonio construido, ya que permite detallar los peligros sísmicos del suelo y tiene potencialidad para extender los estudios para la valoración de la vulnerabilidad, el riesgo sísmico y la interacción suelo-estructura.



## RECOMENDACIONES

- Aplicar el presente procedimiento en otras áreas de estudio expuestas a cargas dinámicas relevantes.
- Exponer los resultados del procedimiento en eventos y publicaciones científicas.
- Que el procedimiento constituya un referente para otros especialistas en estudio de vulnerabilidad, interacción suelo-estructura y la influencia de este sobre un patrimonio construido dado para mitigar el riesgo sísmico.

## BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, A. (2003): *Geofísica aplicada en los proyectos básicos de la ingeniería civil*. [imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt229](http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt229)
- Akamatsu K. (1961): *On microseismics in frequency range from 1 c/s to 200 c/s*. Bull. Earthquake Res. Inst., 39, 23-75.
- Aki, K. (1957): *Space and time spectra of stationary sthochastic waves with special reference to microtremors*. Bull. Earthquake Res. Inst. Tokio Univ., 35, 415-457.
- Alonso, M; E. Finn(1986): *Física. Campos y ondas*. Volumen II. México. Addison-Wesley Iberoamericana.
- Archivo Histórico Provincial de Santiago de Cuba. Colección de expedientes de urbanismo. Serie: Centro de salud, subserie: Droguería, legajo: 334.
- Barbat, A. H.(1998): *El riesgo sísmico en el diseño de edificios*. CuadernosTécnicos, 5. ED. CalidadSiderúrgica. Madrid.
- Besson A; I. Cousin; G. Richard y H. Boizard (2004): *Structural heterogeneity characterization of the soil tilled layers by a 2D electrical resistivity prospecting*. Soil Till. Res 79, 239-249.
- Borcherdt, R. D. (1970): *Effect of the local geology on ground motion near San Francisco Bay*. Bull. Seism.Soc.. Am., 60, 29-61.
- Brandes, H. (2003): *Geotechnical and Foundation Aspects*. En: CHEN, W.; C. SCAWTHORN, eds. Earthquake Engineering Handbook. London. Taylor and Francis Group.
- Caicedo, M., P. MORA (2004): *Temas de Propagación de Ondas*. Venezuela. Universidad Simón Bolívar.
- Candebat, D. y T. J., Chuy (2012): *Informe final de Estudios de Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo, ciudades: Santiago de Cuba y Palma Soriano*. Fondos del CENAI. Santiago de Cuba. P: 32.
- Corominas, J. (1989): *Clasificación y reconocimiento de los movimientos de laderas. Curso sobre estabilidad de taludes y laderas naturales*. Barcelona. Monografía No.3. Sociedad Española de Geomorfología.
- Corwin, D.L. y S.M. Lesch (2003): *Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: Theory, Principles and Guidelines*. Agron J 95, 455-471.
- Cardona, O. D. (2005): *Indicadores de riesgo de desastre y gestión de riesgo*. Programa para América Latina y el Caribe. [www.iadb.org/sds/env](http://www.iadb.org/sds/env).
- Chelotti, L., N., Acosta, N., M., Foster (2010): *Tema 12 Prospección Sísmica de Refracción*. <https://pt.scribd.com/document/66478394>.
- Chuy, T. J. (1999): *Macrosísmica de Cuba y su aplicación en los estimados de peligrosidad y microzonación sísmica*. Tesis de opción de Grado a Doctor en Ciencias Geofísicas. Fondos del CENAI e Instituto de Geofísica y Astronomía. 273 pp.
- Chuy, T. J. (2016): *Experiencias de la utilización del conocimiento de la Sismicidad y Peligro Sísmico de Cuba en la formación profesional de Ingenieros Civiles y*

*Arquitectos. Salud y Desastres. Experiencias cubanas.* Editorial ECIMED. La Habana. Tomo VII: ISBN 978-959-212-939-9. pp. 198 – 206.

- Dobring, M. D. and C. H., Savit (1988): *An introduction to Geophysical Prospecting.* Fourth edition. McGraw-Hill International Editions. Geologies series. P. 450
- Fernández, B., Z. C, Rivera, C. R., Reyes y J. A., Zapata (2000): *Los fenómenos físico-geológicos secundarios en la ciudad de Santiago de Cuba.* ISSN 0258 5979. Revista Minería y geología. Vol. XVII No 2, P: 11.
- Field, E. H. and K. Jacob. (1995): *A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent.* Bull. Seism. Soc. Am., 85, 1127-1143.
- Fong, H.V. and V. N., Reinhold (1991): *Foundation engineering handbook.* ISBN 978-1-4615-3928-5. P-554.
- Geoelectrical Imaging 2D & 3D. Geotomo software Malaysia (2009). [www.Goelectrical.com](http://www.Goelectrical.com).
- González, B.E., K. Mirzoev, T. J. Chuy, L. Lyskov, V. Golubianicov. L. Kogan, J. A. Zapata, H. Alvarez, R. Mijailova (1985): *Microrregionalización Sísmica de la ciudad de Santiago de Cuba.* Premio Andrés Poey. VIII Foro Científico de la Academia de Ciencias de Cuba.
- González de Vallejo, L. I., M., Ferrer, L., Ortuño y C., Oteo (2002): *Ingeniería Geológica.* Pearson Educación, S.A. Madrid, España. ISBN 84-205-3104-9. 2002. P: 611.
- Guasch, F. (2006): *Estrategia prospectiva para la prevención de desastres a nivel local en Cuba.* Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas. Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”, La Habana, Cuba. 124 p.
- Guasch, F., Ordoñez, A., Lovo, G. y García, E., Herrera, R. (2014): *La gestión estratégica de los riesgos de desastres en centroamérica, como proceso de la sociedad civil organizada, para incrementar la capacidad de Respuesta y fortalecer las bases del desarrollo Resiliente de la región.* Comunicación personal. P: 8.
- Hernández, E., H., Pérez, V. Poveda, R., Oliva y L. F. Caballero (2014): *Evaluación del peligro, vulnerabilidad y riesgo sísmico en la Fábrica de Acumuladores “XX Aniversario” de Manzanillo.* Informe científico-técnico. Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS).
- Hutchinson, J. N. (1988): *Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology.* 5<sup>th</sup> Int. Congress on Landslide. Lausanne. Vol.1, pp3-35.
- 1-<http://www.ii.udc.es/cai/docs/capitulo01/cai-conceptosbasicos.pdf>.
- 2-<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo/codigo=1186017>.
- 3-<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6231/07.pdf?sequence=8>.
- Informe de investigación ingeniero-geológico en la Mini Fábrica de Cerveza “Rey del Puerto”. Archivo de la ENIA Santiago de Cuba. Diciembre 2014.

- Informe de investigación ingeniero-geológico en la Mini Fábrica de Cerveza “Rey del Puerto”. Archivo de la ENIA Santiago de Cuba. Abril 2015.
- Kanai, K. and T. Tanaka (1961): On Microtremors. VIII, Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ., 39, 97-114.
- Konno, K. and T. Ohmachi (1998): *Ground motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor*. Bull. Seism. Am., 88, 228-241.
- Kramer, S. and J. Stewart (2004): *Geotechnical Aspects of Seismic Hazards*. En: Bozorgnia, Y.; V. Bertero, eds. Earthquake Engineering: From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering. London. Taylor and Francis Group.
- Lacoss, R. T., E. J. Kelly and N.M. Toksoz (1969): *Estimation of seismic noise structure using arrays*. Geophysics, 34, 21-38.
- Lermo, J. and F. Chávez-García (1993): *Site effect evaluation at Mexico City : dominant period and relative amplification from strong motion and microtremor records*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 13. 413-423.
- Lontadze, V. D. (1986): *Geología aplicada a la ingeniería*. VNSHTORGIZDAT. Editorial Pueblo y Educación, 560pp.
- López, A. (2000): *Introducción al método de la tomografía eléctrica - campos de aplicación y ejemplos*. Apartado "Publicaciones" de la página web [www.igt-geofisica.com](http://www.igt-geofisica.com)
- Léxico 4.01 Copyright © 2005, CENAIIS – ISMM Holguín – Moa, Cuba.
- Magazine la noticia. *Recuerdo histórico del terremoto de 1932*. Casa editora Arroyo hno. Pio Rosado baja 10, Santiago de Cuba.
- Medina, A., Escobar, E., Ortiz, G. Ramírez, M., Díaz, L., Móndeolo, F., Montejó, N., Dúguez, H., Guevara, T y Acosta, J. (1999): *Reconocimiento geólogo-geofísico de la cuenca de Santiago de Cuba, con fines de riesgo sísmico*. Empresa Geominera de Oriente, Santiago de Cuba. 32 pp.
- Milanés, C. y A. Pacheco (2011): *Asentamientos costeros en la Bahía de Santiago de Cuba: estudio de su vulnerabilidad urbana*. Revista de Arquitectura y Urbanismo. Vol. 32, No 3, P: 1.
- Miró, G. (2011): *La carrera de ingeniería geofísica: 40 años después*. [www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2011\\_Miro\\_Pages\\_GEO8-MR3](http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2011_Miro_Pages_GEO8-MR3).
- Miró, G., J. Pérez (2007): *Reflexiones sobre la enseñanza de la ingeniería geofísica en Cuba*. [www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2007\\_Miro\\_Pages\\_GEF3-O1](http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2007_Miro_Pages_GEF3-O1).
- Moreno, E. (2006): *Propagación de ondas mecánicas y aplicaciones de los ultrasonidos*. Red Iberoamericana de Tecnologías Ultrasonicas.
- Nakamura, Y. (1989): *A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface*. QR of RTRI 30, no. 1, February, 25-33.
- Ordas, M. y C. Montoya (2002): Degtra 2000. Instituto de Ingeniería. Universidad autónoma de México. [www.scirp.org/.../reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID](http://www.scirp.org/.../reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID).
- Organización Panamericana de la Salud (2003): *Reducción del Daño Sísmico*. Guía para las Empresas de Agua. Oficina Regional para las Américas de la Organización Mundial de la Salud.

- Oliva.R. (2006): *Metodología empleada para el estudio de microsismos en Cuba*. Fondos del CENAIIS.
- Pérez, N. (2012): Informe Geofísico de los trabajos realizados en el área de la nueva fábrica de cemento de Santiago de Cuba. Fondos de la ENIA-Santiago de Cuba.
- PickWin Software Version 4.2.0.0.Jun 24 2011.OYO Corporation.
- Propuesta de norma cubana de sismorresistencia del 2017. Requisitos básicos para el diseño y construcción.
- ProShake. Ground response analysis program. Version 1.1. EduPro Civil Systems, Inc. Redmond, Washington. [www.nrc.gov/docs/ML0407/ML040780775.pdf](http://www.nrc.gov/docs/ML0407/ML040780775.pdf).
- Reyes, C.R. (2002): *Peligro geológico por deslizamiento en la ciudad de Santiago de Cuba y sus alrededores. Escala 1: 25 000*. Tesis para optar por el grado de master en ciencias en la especialidad de Geología General. Moa. ISMMM. P:43.
- Reynolds, J. R. (2011): *An introduction to applied and environmental geophysics*. 13: 978-0471485360. 2nd edition. Editor: Willey. P: 346.
- Rivera, Z. C., J.A., Zapata, J., García y G. Morejón (2003): *Potencialidad de Peligros Naturales y Riesgos Inducidos alrededor de la Bahía de Santiago de Cuba*. Proyecto territorial. Fondos del CENAIIS. P: 14.
- Rivera, Z. C., J., García, Slejko, D., M., Santulin (2011): *Aplicación de métodos de categorías de los suelos para la modelación del terreno en la zona oriental de Cuba*. IX Congreso Cubano de Geología. III simposio de riesgos geológicos y sismicidad. La Habana, Cuba.  
[www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2011\\_Rivera\\_Alvarez\\_GEO11-P14](http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2011_Rivera_Alvarez_GEO11-P14).
- Rodríguez, M. (2005): *Caracterización de la Respuesta Sísmica de los Suelos. Aplicación a la ciudad de Barcelona*. Tesis Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Romo, M. P., M. J., Mendoza And S. R.,García (1994): *Geotechnical factors in seismic design of foundations state-of-the-art report*.  
<http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/2832.pdf>.
- Rosales, C. (2001): *Sobre el comportamiento sísmico de los depósitos de suelos del área de Cañaveralejo. Cali, Colombia*. Tesis Ingeniería Civil. Santiago de Cali. Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería.
- Samouëlian, A., I. Cousin, A. Tabbagh, A. Bruand y G. Richard (2005): *Electrical resistivity survey in soil science: a review*. *Soil Till. Res* 83,173-193.
- Sanó, T., Pugliese, A.(1991): *Pshake, Analisi Probabilistica della Propagazione delle Onde Sismiche*. Ente per le Nuove Tecnologie, L'Energia e L'Ambiente (ENEA), Direzione Sicurezza e Protezione.
- Seo, K. (1995): *A joint research on Microtremor Measurements in Kushiro City Related to the 1993 Kushiro-Oki (Hokaido, Japan) Earthquake*. Report of the Research Group on Microtremor Joint Measurements Related to the 1993 Kushiro-Oki

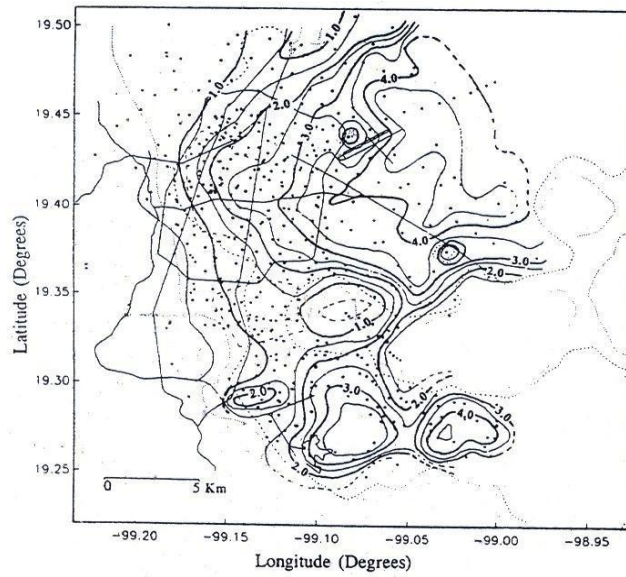
(Hokaido, Japan) Earthquake. Proc. 5th International Conference on Seismic Zonation, Vol. III, Pag 2271-2278.

- Stewart, J., S. W. Chang, J. D. Bray, R. B. Seed., N. Sitar and M. F. Riemer (1995): *A report on geotechnical aspects of the January 17, 1994 Northridge Earthquake*. Seismic Res. Letters, 66, No. 3, 7-19.
- Tarback, E.; F. Lutgens (2000): *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física*. Sexta Edición. Madrid. Prentice Hall.
- Toksöz, N. M. (1964): *Microseisms and attempted applications*. Geophysics, 39, 154-177.
- Troncoso, J. (1992): *Fundamentos de ingeniería geotécnica antisísmica*. Santiago. Ediciones Universidad Católica de Chile.
- Varnes, D. J. (1978): Slope movement types and processes. Landslides analysis and control. National Academy of Sciences. Washington .C., pp11-33.
- Varnes, D.J. (1984): *Landslide hazard zonation: a review of principle of practice*. UNESCO. [www.oalib.com/references/7821851](http://www.oalib.com/references/7821851).
- Wald D. J., T. H. Heaton, H. Kanamori, C. W. Scrivner, and C.B. Worden (1999): *Trinet "Shape maps". Rapid generation of peak ground motion and intensity maps for earthquake*. Spectra. Vol. 15, N° 3, 537-553. EERI.Oak-land. CA, EUA.
- Wendroth, O., Koszinski, S. y E. Pena-Yewtukhiv (2006): *Spatial association amongs oil hydraulic properties, soil texture, and geoelectrical resistivity. Vadoze Zone*". J. 5, 341-355.
- Zúñiga, C. A. (2014): *Evolución histórica de las farmacias en Santiago de Cuba en la primera mitad del siglo XX*. Revista Cubana de Farmacia. Vol. 48 (1). P-157.

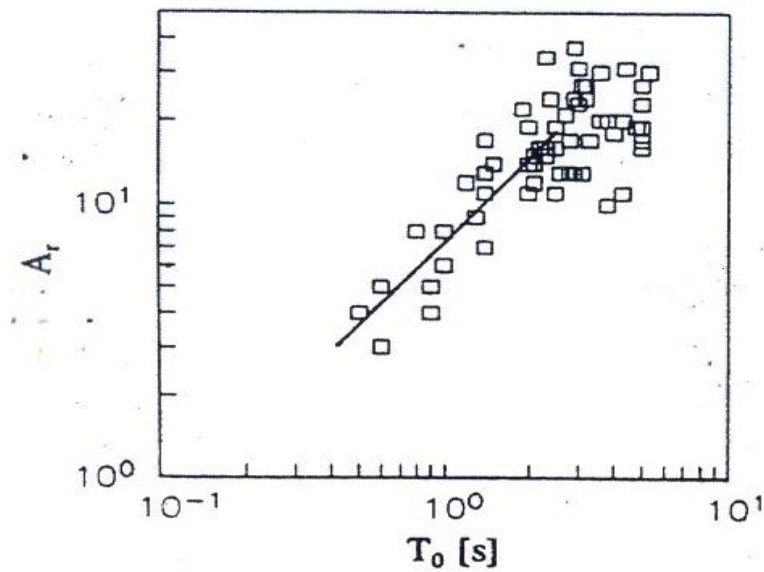


# ANEXOS

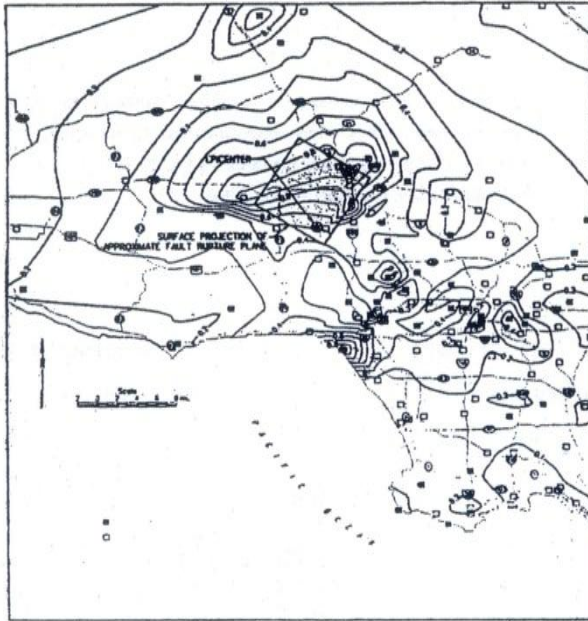
## Anexo 1



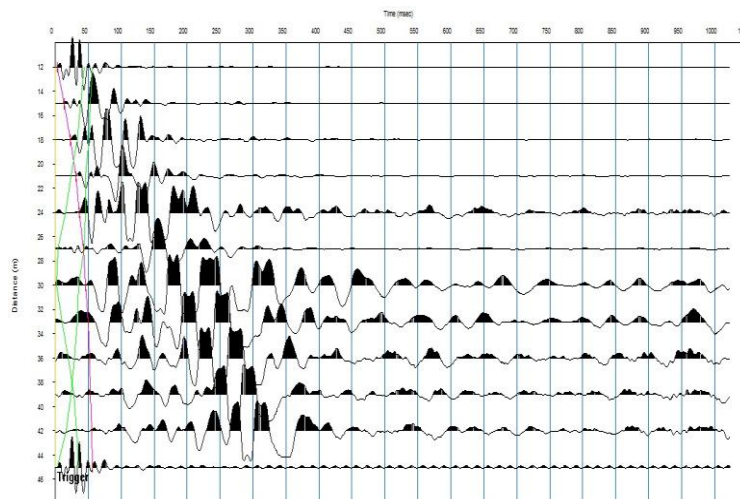
**Anexo 1.1.** Mapa de período dominante de Ciudad de México. Este mapa es el resultado de la integración de datos acelerográficos y de microtremor (Lermo y Chávez-García, 1994).



**Anexo 1.2.** Relación entre  $A_r$  y  $T_0$  obtenida a partir del promedio de las funciones de transferencia empírica de datos acelerométricos (Lermo y Chávez-García, 1994).

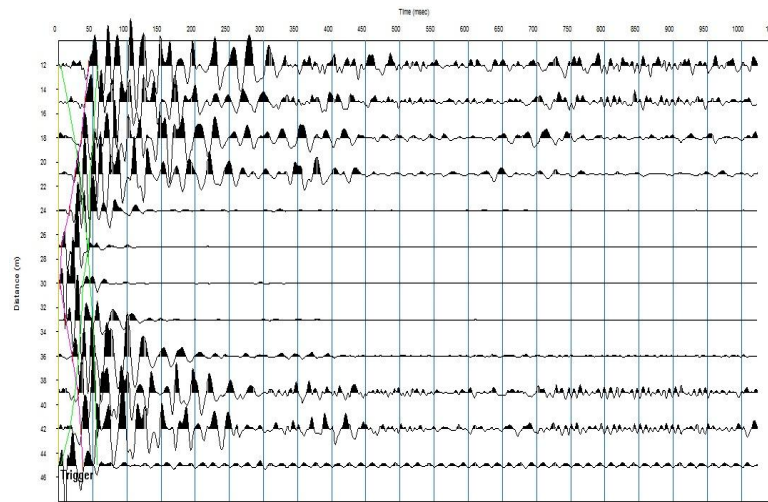


**Anexo 1.3.** Localización del plano de falla del sismo de Northidge y los contornos de la aceleración máxima horizontal basado en los registro en suelo y roca. (Steward *et al*, 1995).

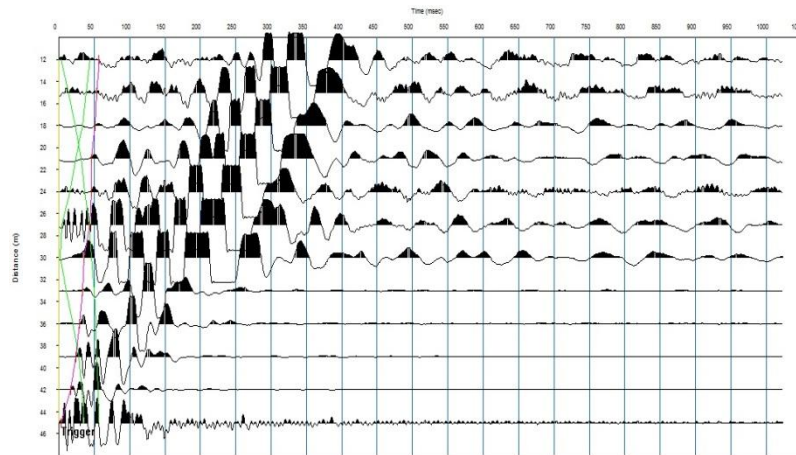


**Anexo 1.4.** Sismograma obtenido en el primer punto de excitación del perfil sísmico realizado en EMCOMED. Extraído del programa PickWin (2011).

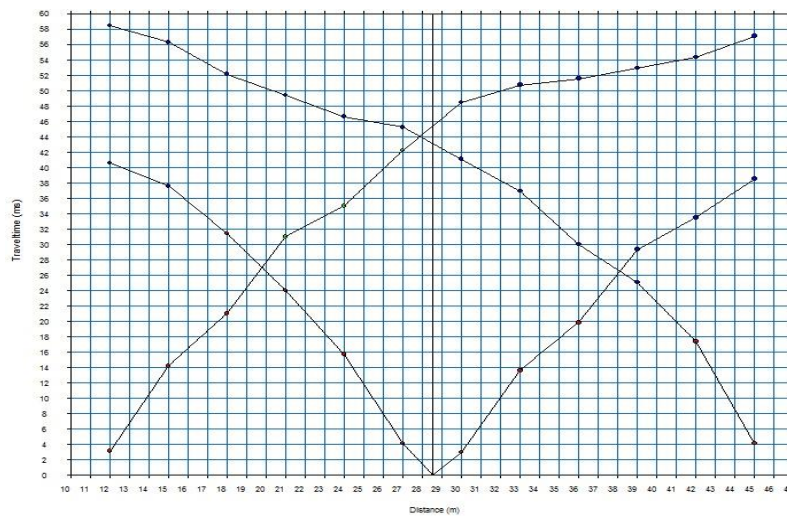




**Anexo 1.5.** Sismograma obtenido en el punto central de excitación del perfil sísmico realizado en EMCOMED. Extraído del programa PickWin (2011).



**Anexo 1.6.** Sismograma obtenido en el segundo punto de excitación del perfil sísmico realizado en EMCOMED. Extraído del programa PickWin (2011).



**Anexo 1.7.** Hodógrafo de encuentros obtenido a partir de las primeras llegadas de la onda longitudinal ( $V_p$ ) en el perfil sísmico de EMCOMED. Extraído del programa PickWin (2011).

## Anexo 2



**Anexo 2.1.** Daños producidos por el terremoto de 1932 en el edificio de la calle Duboy y Castillo Duany. Foto Archivo CENAIS.

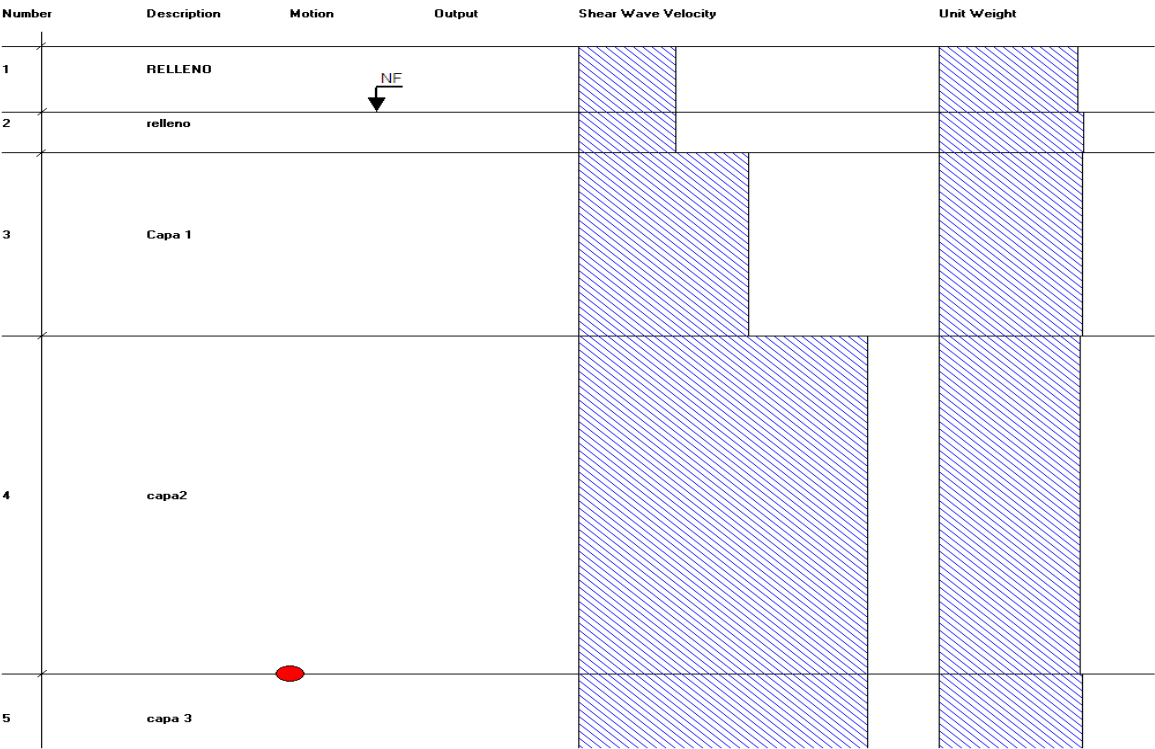


**Anexo 2.2.** Daños producidos por el terremoto de 1932 entre calle Factoría y Lorraine. Foto Archivo CENAIS.



**Anexo 2.3.** Daños producidos por el terremoto de 1932 frente al edificio de la Aduana cerca del reloj de la Alameda Michael Sen. Foto Archivo CENAIS.

# Anexo 3



Anexo 3.1. Perfil de suelo obtenido mediante el programa ProShake.

## Anexo 4

**Anexo 4.1.** Tabla resume de las propiedades físico-mecánicas de los informes 2014 y 2015 en la Alameda dadas por la ENIA-Santiago de Cuba.

Informes	NF	De	a	Capa	Litología	G <sub>s</sub> (Kg/m <sup>3</sup> )	δ <sub>f</sub> (Kg/ m <sup>3</sup> )	δ <sub>s</sub> (Kg/ m <sup>3</sup> )	W (%)	e	S (%)	LL (% )	LP (%)	IP (%)
<b>Minifábrica de cerveza. Informe 2014. X: 604427 Y: 152377</b>	1.35	0.0	2.3	2	Arena arcillosa con grava.	2680	-	-	-	-	96	43	25	18
		2.3	6.8	3	Arcilla plástica arenosa.	2720	1897	1934	27.30	0.84	88	76	21	55
		6.8	8.6	4	Arcilla muy plástica con arena.	2720	1890	1940	26.27	0.82	87	65	20	45
<b>Minifábrica de cerveza. Informe 2015 X: 604438 Y: 152324</b>	1.35	0.0	1.0	1	Arena arcillosa con grava.	2650	1921	1959	25.00	0.72	92	43	25	18
		1.0	5.4	2	Arcilla muy plástica arenosa.	2720	1897	1934	27.23	0.84	88	76	21	55
		5.4	13	3	Arcilla muy plástica con Arena.	2683	1927	1962	26.00	0.75	93	52	21	31
		13	15	4	Arcilla muy plástica arenosa.	2650	1949	1982	23.40	0.68	91	55	21	34

## Anexo 5

### Anexo 5.1. Parámetros obtenidos por el programa ProShake<sup>58</sup>

Todos los parámetros que continuación aparecen son explicados en el manual del usuario del programa de computo ProShake.

#### Intensidad de Arias (Arias Intensity)

La intensidad de Arias (Arias, 1970) está influenciada por la amplitud, el contenido de frecuencias y la duración del movimiento sísmico y se define como:

$$Ia = \frac{\pi}{2g} \int_0^t [a(t)]^2 dt \quad (2.7)$$

La intensidad de Arias tiene unidades de velocidad y usualmente se expresa en m/s. La intensidad de Arias se obtiene por integración en la duración total del movimiento (en lugar de integrar en solo la duración del movimiento fuerte) este valor es independiente del método utilizado para definir la duración del movimiento.

#### Duración Acotada (Bracketed Duración)

La duración acotada (Bola, 1969) es el tiempo transcurrido desde que se supera por primera vez un cierto umbral de aceleración. El umbral de aceleración en el ProShake se ha establecido en 0,05g.

#### Aceleración Pico (Peak Acceleration)

Es el valor máximo absoluto de aceleración. La aceleración pico proporciona una útil medida de la intensidad de los componentes de alta frecuencia de un movimiento sísmico.

#### Velocidad Pico (Peak Velocity)

Es el máximo valor absoluto de velocidad. La velocidad pico proporciona una medida útil de la intensidad de los componentes de frecuencia de un movimiento sísmico.

#### Desplazamiento Pico (Peak Displacement)

Es el máximo valor absoluto de desplazamiento. El desplazamiento pico proporciona una medida útil de la intensidad de los componentes de baja frecuencia de un movimiento sísmico.

#### Período Predominante (Predominant Period)

El período predominante es el período correspondiente al máximo valor del espectro de Fourier. Debido a que el espectro de Fourier normalmente es completamente dentado, el período correspondiente al mayor pico en un espectro de este tipo puede no corresponderse bien con la parte más fuerte del movimiento. Por esta razón es normal obtener el espectro de respuesta a partir del espectro suavizado.

#### Intensidad de espectro de respuesta. (Response Spectrum Intensity)

El espectro de intensidad de respuesta (Housner, 1959) se define como:

$$SI = \int_{0.1}^{2.5} PSV(\varepsilon, T) dt \quad (2.8)$$

Es decir, es el área por debajo del espectro de respuesta de pseudo velocidad comprendida entre los períodos de 0.1 seg. y 2.5 seg. En ProShake, el espectro de intensidad de respuesta se calcula para una relación de amortiguamiento estructural del 5%. Este espectro toma en cuenta aspectos importantes de la amplitud y el contenido de frecuencia (en el rango de importancia primaria de las estructuras) en un solo parámetro.

#### Aceleración RMS (RMS Acceleration)

La aceleración RMS es un parámetro único que incluye los efectos de la amplitud y el contenido de frecuencias de registro del movimiento sísmico.

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{Td} \int_0^{Td} [a(t)]^2 dt} \quad (2.8)$$

Donde Td es la duración del movimiento. Debido a que la integral no está influenciada, por el gran tamaño de las aceleraciones de alta frecuencia (lo cual ocurre solo en un periodo muy corto de tiempo) y si por la duración del movimiento, la aceleración RMS es un parámetro muy útil para propósitos ingenieriles. ProShake utiliza la duración de Trifunac para cálculo de la aceleración RMS.

#### Duración de Trifunac (Trifunac Duration)

La duración de Trifunac (Trifunac and Brady, 1975) se define como el intervalo de tiempo entre los puntos para los cuales el 5% y el 95% de la energía de un movimiento del terreno se liberan. Numéricamente esta correspondencia con el intervalo de tiempo entre los puntos correspondientes al 5% y el 95% en el diagrama de Husid.