

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE NICARAGUA
RECINTO UNIVERSITARIO RUBÉN DARÍO
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIAS
INGENIERÍA CIVIL**



TRABAJO MONOGRÁFICO PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL

Tema:

**CARACTERIZACIÓN DE SITIO PARA LA INSTALACIÓN DE UN ARREGLO
VERTICAL DE MONITOREO SÍSMICO EN LA UNAN - MANAGUA.**

AUTOR:

Br. Samuel Enrique Sevilla Cano

TUTOR:

Ing. Edwin Obando Hernández

ASESORES:

MSc. Claudio Romero

Ing. Bismarck Contreras

Managua, 18 Septiembre del 2008.

DEDICATORIA

A Dios por la vida y el conocimiento que me ha dado hasta el día de hoy, dedico cada página de este trabajo monográfico, cuyo contenido describen mas que el desarrollo de una investigación, un anhelo que El me concedió.

Además tengo la satisfacción de dedicar este trabajo a mi amada familia, mi madre Maria Modesta Cano, a mis queridos Hermanos, Ernesto, Eddy, Moisés, Máxima, a mis apreciables cuñadas Concepción Gonzáles, Karla Jiménez e Ivonne Téllez y a una persona muy especial que no me ha dejado solo y me ha enseñado a creer en mi, Lorgia Flores. También a mi padre José Sevilla y a sus nietos, Brayan, Eylon, Bladimir, Jeisel, Denilson y a los mas pequeñitos. A todos ellos porque me han dado suficientes razones para luchar, esforzarme y presentar el día de hoy esta Monografía.

También dedico este trabajo monográfico a muchos jóvenes con mucha capacidad intelectual en cuya mente y corazón solo quedo el deseo de algún día ser profesionales porque simplemente no pudieron (no tuvieron recursos) ingresar a la universidad.

AGRADECIMIENTO

Dios, gracias por la vida y por estar conmigo, solamente así pude ingresar a esta universidad y culminar mi carrera profesional y en solo tu suficiente tiempo graduarme como Ingeniero Civil.

También quiero agradecer:

A mi Familia por su apoyo económico, por su confianza, su paciencia y por quererme lo suficientemente para luchar por ellos.

A mi tutor Edwin Obando, por creer en mí y por todo el apoyo que me brindo, por el tiempo que dedicó en el desarrollo de esta monografía, por sus consejos y sugerencias.

A mis dos asesores MSc. Claudio Romero y el Ing. Bismarck Contreras por sus comentarios emanados de sus experiencias y que contribuyeron para el mejoramiento de este trabajo.

Al Centro de Investigaciones Geocientíficas (CIGEO) por darme la oportunidad de realizar este trabajo monográfico y los elementos necesarios para terminar y presentar este documento.

A Investigadores del CIGEO de quienes recibí sugerencias y comentarios para la elaboración y presentación de esta investigación y a mis amigos y personas que de una u otra manera motivaron y contribuyeron en el proceso de la realización del documento ahora terminado.

RESUMEN

La ciudad de Managua está constantemente amenazada por la ocurrencia de un eventual terremoto debido al ambiente sismo tectónico local y regional existente.

Después de la experiencia vivida en Diciembre de 1972 ha quedado en evidencia la magnitud de las consecuencias que un eventual terremoto puede causar. La presencia del complejo sistema de fallas superficiales de la ciudad es sin duda la fuente sísmica más peligrosa.

Las estaciones sísmicas son una de las principales herramientas con la que cuenta el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), - entidad gubernamental científica encargada de estudios e investigaciones del medio físico que contribuyen al desarrollo socioeconómico del país - para el análisis de eventos sísmicos desarrollados en las principales ciudades del país, pero investigaciones en busca de las razones por las cuales estos eventos causan grandes catástrofe, han motivado a instalar un arreglo vertical, la evolución más reciente de estaciones sísmicas, con el propósito de estudiar las propiedades dinámicas del subsuelo, así como la respuesta de sitio.

El trabajo presentado es la etapa preliminar del proyecto "Instalación de un Arreglo Vertical para Monitoreo Sísmico en la UNAN - Managua" que además tiene como propósito, servir como referencia para registros sísmicos tomados en las estaciones sísmicas (acelerográficas) existente, significa hacer una comparación entre los datos tomados en la diferentes estaciones y el arreglo vertical.

Dentro de la estructura de este trabajo se presentan las características generales del proyecto, así como la importancia y aspectos generales de los diferentes tipos estaciones sísmicas, principalmente los arreglos verticales y los estudios respectivos para su instalación, de igual forma se hace una descripción del proceso desarrollado para la obtención de los resultados presentados y se

muestra la importancia de su determinación, también se describe el análisis de los mismos y las conclusiones a las que llevaron, así como ciertas recomendaciones que servirán para mejorar trabajos similares, y finalmente se incluye la bibliografía utilizada como soporte teórico.

ÍNDICE

Contenido	Pág.
Introducción	1
Objetivos.....	3

Capítulo 1: Área de estudio

1.1	Ubicación geográfica del área de estudio	4
1.2	Aspectos geológicos y sismicidad	6
1.3	Aspectos geotécnicos	8
1.4	Topografía	8

Capítulo 2: Estaciones Sísmicas

2.1	Arreglos verticales o estaciones de Borehole	12
2.2	Monitoreo sísmico.....	15
2.3	Conocimiento del subsuelo.....	15
2.4	Evaluación del riesgo sísmico.....	16

Capítulo 3: Caracterización de sitio

3.1	Estudios previos a la instalación del arreglo vertical.....	20
3.1.1	Estudio Geofísicos	21
3.1.1.1	Perfiles de Imágenes de Resistividad Eléctrica	22
3.1.1.2	Método de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales.....	24
3.1.1.2.1	Método WalkAway	29
3.1.2	Estudio Geológico.....	31
3.1.2.1	Formación Las Sierras.....	32
3.1.2.1.1	Tefra Unicit	32
3.1.2.1.2	Tefra Fontana	32
3.1.2.2	Formación Managua	32
3.1.2.2.1	Pómez de Apoyo	33
3.1.2.2.2	San Antonio Tefra	33
3.1.2.2.3	La Concepción Tefra.....	33
3.1.2.2.4	Masaya Triple Layer	33
3.1.2.2.5	Masaya Tuff	33
3.1.2.2.6	Ticuantepe Lapilli	33
3.1.2.3	Formación Chiltepe.....	34
3.1.2.3.1	Tefra de Apoyeque inferior	34
3.1.2.3.2	Tefra de Apoyeque Superior	34
3.1.2.3.3	Tefra de Xiloa	34
3.1.2.3.4	Tefra Mateare	34
3.1.2.3.5	Tefra Los Cedros	34
3.1.2.3.6	Tefra Chiltepe	34

3.1.3	Estudio Geotécnico.....	35
3.1.3.1	Origen y formación de los suelos.....	36
3.1.3.2	Definiciones físicas y propiedades índices	38
3.1.3.2.1	Propiedades de los granos	38
3.1.3.2.2	Distribución granulométrica	39
3.1.3.2.3	Plasticidad	41
3.1.3.2.4	Peso Unitario	43
3.1.3.3	Clasificación de suelos	44
3.1.3.3.1	Distinción entre descripción y clasificación de los suelos	44
3.1.3.3.2	Sistema unificado de clasificación de suelos	45
3.1.4	Evaluación topográfica.....	47

Capítulo 4: Instrumentación, trabajo de campo y procesamientos de datos

4.1	Perfiles de Imágenes de Resistividad Eléctrica	50
4.1.1	Instrumentación	50
4.1.2	Trabajo de campo	52
4.1.3	Procesamiento de datos	53
4.2	Perforación y muestreo.....	53
4.2.1	Instrumentación	53
4.2.2	Trabajo de campo.....	54
4.2.3	Procesamiento de datos	55
4.2.3.1	Clasificación geológica	55
4.2.3.2	Clasificación geotécnica	56
4.3	Análisis Multicanal de Ondas Superficiales	58
4.3.1	Instrumentación	58
4.3.2	Trabajo de campo.....	59
4.3.3	Procesamiento de datos	60

Capítulo 5: Análisis de resultados

5.1	Perfiles de imágenes de resistividad.....	64
5.2	Perforación	67
5.2.1	Estudio Geológico.....	67
5.2.2	Estudio Geotécnico.....	67
5.3	Análisis multicanal de ondas superficiales.....	68

Capítulo 6: Modelamiento Teórico

6.1	Análisis de respuesta sísmica del subsuelo en una dimensión	73
6.2	Modelo matemático usado por SHAKE2000.....	74
6.3	Parámetros de entrada	78
6.3.1	Tipo de material y espesor.....	78
6.3.2	Velocidades de ondas cortantes.....	78
6.3.3	Peso unitario.....	79
6.3.4	Porcentaje de amortiguamiento	79

6.3.5	Movimiento de entrada	79
6.4	Procesamiento de datos y resultados	80
6.5	Análisis de resultados	83

Capítulo 7: Conclusiones y Recomendaciones

7.1	Conclusiones	86
7.2	Recomendaciones	88
	Bibliografía	90
	Anexos	94

INTRODUCCIÓN

La variación del efecto sísmico de acuerdo a las propiedades de cada tipo de suelo, ha sido documentada desde la antigüedad, pero es a partir de la segunda mitad del siglo XX cuando esta variabilidad empieza a ser investigada con fines de entenderla y proveer a la Ingeniería soluciones que beneficien a la sociedad (C.I. Rosales, 2001, p.1, adaptado). El efecto sísmico se da a través de la propagación de ondas, estas se originan en el interior de la tierra causada por la energía liberada en el movimiento de fallas, placas tectónicas y en menor medida por actividad volcánica. La densidad de cada suelo es una de las características que influye en la amplificación de las ondas; es así como en los suelos blandos se dan mayores amplificaciones y períodos más largos que en los suelos densos.

Para el estudio del efecto sísmico causado por la propagación ondas en áreas altamente activas, actualmente existen diversos instrumentos que pueden ser utilizado, dentro de los cuales están: los acelerógrafos, que registran las componentes de las aceleraciones del suelo en función del tiempo, y los sismógrafos que registran actividad sísmica imperceptible para las personas (microsismicidad), o actividad que puede estar ocurriendo a miles de kilómetros de distancia en otros continentes (Universidad Católica de Chile, 2007, adaptado), de ahí la aparición de las estaciones sísmicas.

Con el avance de la tecnología, estos instrumentos tienden a ser más sofisticados, con los cuales se obtienen cada vez más y mejores datos al ser ubicados en sitios apropiados; bajo esta condición aparecen las estaciones sísmicas acelerográficas de referencias. Estas cuentan con su instrumentación o sensores ubicados en afloramientos rocosos para la obtención de registros relativamente puros, no contaminados por algún efecto generado por el subsuelo, pues estos permiten la estimación indirecta de los niveles de amplificaciones relativas en otro sitio en donde se registro el mismo evento pero

con características geológicas diferentes, siendo este un elemento determinante para la evaluación de respuesta de sitio en zonas altamente sísmicas.

El nuevo concepto que han adquirido las estaciones acelerográficas de referencia es el de Arreglo Vertical, el cual se compone de un acelerógrafo en superficie libre (Sensor y Epysensor triaxial) y otro en profundidad (Hyposensor, acelerógrafo triaxial *force balance*), esto se debe a que no siempre se tienen afloramientos rocosos disponible.

Para ubicar el Hyposensor se debe perforar hasta la profundidad donde se alcance el material denso o preferiblemente el “basamento rocoso”, el cual se puede definir de acuerdo a sus velocidades de ondas S superiores a 760 m/s, según norma de National Earthquake Hazards Reduction Program of EE.UU. (NEHRP) o al nuevo Reglamento Nicaragüense de la construcción, además es necesario conocer la topografía del terreno, así como el perfil estratigráfico del sitio en donde se perforará, con el propósito de estudiar detalladamente su comportamiento ante la eventualidad de un sismo y también ciertas propiedades físicas y dinámicas del subsuelo como resistividades y velocidades de ondas cortantes.

La caracterización del sitio se realiza antes y durante la perforación, a través de prospecciones geofísicas para definir profundidad de perforación y clasificación geológica y geotécnica para definir perfiles.

Particularmente este trabajo presenta la caracterización de sitio e instalación de un arreglo vertical, que representa la etapa preliminar del proyecto “Instalación de un Arreglo Vertical para Monitoreo Sísmico en la UNAN - Managua”, ejecutado por el Centro de Investigaciones Geocientíficas CIGEO, con auspicio de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, UNAN - Managua.

Objetivo general

Caracterizar el sitio de estudio en profundidad para instalar un arreglo vertical de monitoreo sísmico.

Objetivos específicos

1. Obtener valores de resistividad y velocidad de ondas cortantes a través de prospecciones geofísicas como Perfiles de Imágenes Resistividad Eléctrica y Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW).
2. Clasificar las muestras obtenidas de la perforación con Geotecnia y Geología.
3. Construir la columna estratigráfica del sitio donde se instalará el arreglo vertical con los diferentes parámetros medidos.
4. Presentar un modelo teórico del comportamiento del suelo ante la propagación de ondas sísmicas como complemento de este estudio.

CAPITULO 1

AREA DE ESTUDIO

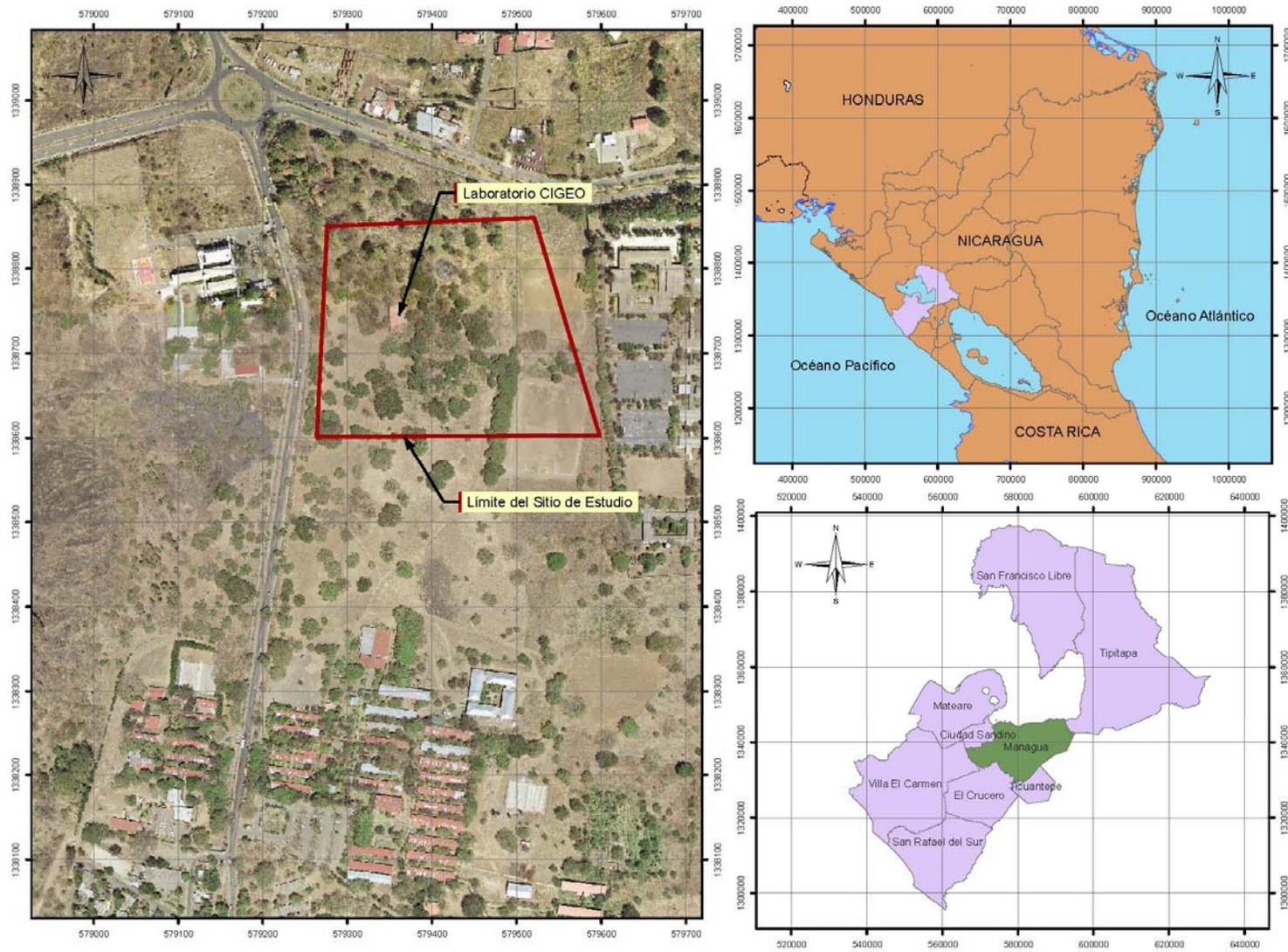
1.1 Ubicación geográfica del área de estudio

El Departamento de Managua se ubica en el Pacífico de Nicaragua, está situada entre los meridianos $86^{\circ}40'$ y $86^{\circ}16'$ de longitud oeste y los paralelos $12^{\circ}07'$ y $110^{\circ}43'$ de latitud norte.

La ciudad de Managua es la Capital de Nicaragua, país de América Central con 1,817,096 habitantes hasta el 2004 (Fuente: Alcaldía de Managua). El sitio de estudio, se encuentra al sur de la ciudad en terrenos de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN-Managua), específicamente en el Recinto Universitario Rubén Darío (ver fig. 1).

El sitio para ubicar un arreglo vertical se debe considerar muy puntual, porque solo se necesita el punto donde debe perforar para la instalación de los equipos, pero dado que para la caracterización realizada en este estudio se hicieron mediciones longitudinales para obtener resultados en profundidad fue necesario tomar un área representativa en donde se ubicaran las longitudes de las mismas, siendo estas de aproximadamente 400 m.

Fig. 1 Mapa de Localización del Sitio de Estudio



1.2 Aspectos Geológicos y sismicidad

Después del terremoto ocurrido en 1972 que destruyó la ciudad de Managua diferentes instituciones nacionales e internacionales han realizados varios estudios enfatizados en conocer mejor la amenaza sísmica, volcánica y geológica del área de Managua, uno de lo más completo es el realizado por D. C. Bice (1985a), en el que propone la estratigrafía y zonas de fallas de la ciudad, y entre los estudios más recientes están, "Mapas geológicos y estudio de la amenaza geológica" en Managua (1997) y "Microzonificación Sísmica de Managua" (2000), desarrollados por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER).

Estos trabajos han acumulados una gran cantidad de información nueva sobre el ambiente geológico y sismológico en la capital; y entre otros resultados INETER ha logrado la actualización del mapa geológico - estructural de la ciudad (ver fig. 2), así como un Estudio geológico - estructural de las fallas activas de la misma (G. Dévoli y W. Strauch 2002), las cuales en términos estadísticos generan el 59% de la amenaza sísmica de Managua según Segura et al (2000).

Otra forma en que se actualiza este mapa es a través de estudios que se están desarrollando constantemente para nuevas construcciones en la capital como un requisito que tiene el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales y el gobierno municipal para los constructores. Cerca del área de estudio se han realizados varios estudios geológicos y de sismicidad, pero se han retomado los dos que están relativamente más cerca, esto se debe a la diferencia de nivel considerable (geomorfología) que existe entre las áreas estudiadas y el sitio de estudio, los cuales no aportan datos de interés para esta investigación.

Uno de estos estudios se realizó aproximadamente 150m en dirección noroeste del área del proyecto con el propósito de la construcción de un nuevo edificio para oficinas, este se realizó mediante la apertura de tres zanjas exploratorias

(trincheras) de 30 y 40 m de largo, de 1.5 m de ancho y de aproximadamente 3.5 m de profundidad.

La estratigrafía se encuentra definida por la presencia de estratos guías como, toba El Retiro (Hrt) y escoria San Judas (Hsj) de edades del cuaternario. Los estratos se encuentran sin deformación por efecto de fallas activas, relativamente sin dobladura y plegamientos (M. Valle O, 2006a), ver anexo I-1.

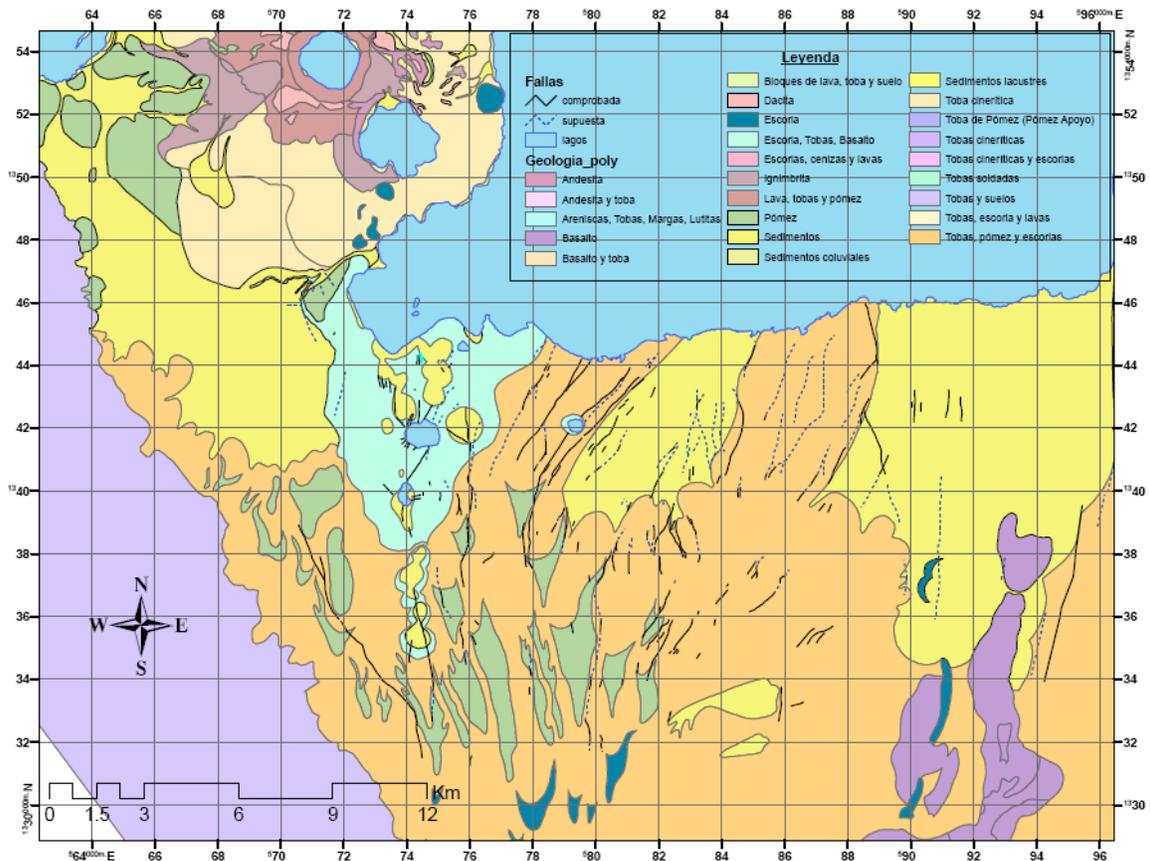


Fig. 2 "Mapa geológico del área de Managua". Fuente: INETER, 2003.

Simultáneamente se hicieron estudios de zonificación sísmica, en los que se concluye que los estratos que forman el área de este estudio se encuentran estables, no presentan interrupciones, ni desplazamiento a pesar de que el sitio se encuentra cercano al sistema de fallas Zogaib - Escuela. De acuerdo a la guía técnica de INETER 2004, se obtuvo la correspondiente zonificación sísmica para el área de estudio, ver anexo I-2.

El otro estudio se realizó a aproximadamente 350 m en dirección suroeste del área del proyecto con el objetivo de la construcción de un edificio para bodegas, y se desarrolló mediante la apertura de una zanja exploratoria (trinchera) de 40 m de longitud, de 1.5 m de ancho y de aproximadamente 3.5 m de profundidad con levantamiento a cada 1 m. La estratigrafía está definida por la presencia de estratos guías como, toba El Retiro (Hrt) y escoria San Judas (Hsj). Estos se encuentran sin deformación por efecto de fallas activas, relativamente sin dobladura y plegamientos (M. Valle O, 2006b), ver anexo I-3.

La zonificación del terreno, resultado de la interpretación del levantamiento geológico concluyó que este se encuentra libre de fallas u otras perturbaciones geológicas mayores, ver anexo I-4.

1.3 Aspectos geotécnicos

Según los resultados de un estudio realizado cerca del área del proyecto a través de sondeos de SPT, método de exploración geotécnica muy común para toma de muestras; la estructura de suelo aplicando el sistema unificado de suelo, generalmente está compuesta por arena arcillosa, arena limosa y arena gravosa. (M. Valle O, 2006a) ver anexos I-5 y.

La cantidad de sondeos realizados fueron 7, ver anexo II-1 y sus profundidades oscilaron entre 7 y 10 metros. La consideración de estos datos geológico y geotécnico en este estudio es únicamente para resaltar al igual que otros trabajos que los suelos de Managua han estado en constante exploración.

1.4 Topografía

AYESTAS, Ingenieros consultores realizaron un levantamiento topográfico de todo el recinto universitario Rubén Darío, determinándose que las elevaciones predominantes de las curvas de nivel -con equidistancia de medio metro- cerca del área de estudio, oscilan entre los 170 m y 175 m, para una mejor

visualización del terreno se tomó un área representativa para el análisis de la topografía del sitio en estudio, con el objetivo de determinar la pendiente predominante del terreno, Ver anexo I-6.

Para la determinación de esta, según L. Casanova Matera (2002) en su obra “Aplicaciones de las curvas de nivel”, esta se determina de la siguiente manera: La pendiente de un terreno entre dos puntos ubicados en dos curvas de nivel consecutivas es igual a la relación entre el intervalo de las curvas de nivel o equidistancia y la distancia longitudinal (D) que lo separa; en forma matemática:

$$P = \frac{e}{D} * 100$$

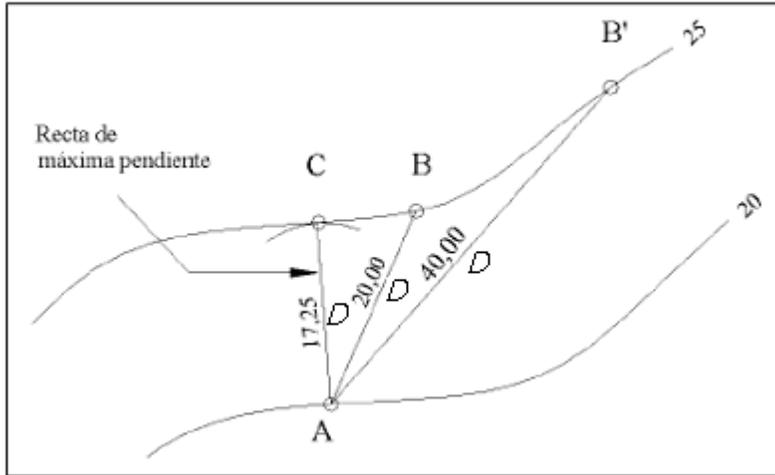


Fig. 3 Pendiente del terreno. Fuente: L. Casanova Matera, 2002, p. 2

Como la pendiente entre dos puntos es inversamente proporcional a la distancia horizontal, la recta de máxima pendiente entre dos curvas consecutivas se obtendrá para la menor distancia entre las curvas, siendo determinada por una línea tangente a las dos curvas consecutivas como se muestra en la figura 3.

Siguiendo este procedimiento se encontraron pendientes de 4.7%, correspondiente a terreno plano.

CAPITULO 2

ESTACIONES SISMICAS

Las Estaciones sísmicas son centros de recolección de datos en tiempo real, equipado con sensores que miden el movimiento del suelo y de donde se envía la información de los sismos a los observatorios. El sensor mas antiguo data del siglo II (Richter, 1958) utilizado en China para conocer la ocurrencia de un sismo y su procedencia. Se trataba de una figura en forma de dragón con 4 cabezas, en cuya boca estaba colocada una bola en equilibrio inestable (A. Pazos García 2003).

Dependiendo de cual sea la variable medida, desplazamiento, velocidad o aceleración del suelo, podemos clasificar los sensores como de desplazamiento o deformación, de velocidad y acelerómetros. Existe una gran variación entre la mínima (ruido sísmico) y la máxima señal que puede ser observada (movimiento fuerte), por lo que es difícil cubrir todo este margen con un único instrumento. Tradicionalmente los acelerómetros se han utilizado para el registro de los movimientos fuertes y los transductores de velocidad para el registro de movimientos débiles, cubriendo en conjunto todo el rango dinámico.

Por otro lado, el ancho de banda se extiende desde las mareas terrestres hasta incluso más allá de los 1000 Hz. Para cubrir todo este espectro es necesario disponer de varios tipos de sensores. En este sentido podemos clasificar los sensores según A Pazos García (2003), por su ancho de banda:

- Período corto (SP, “*short period*”), capaces de resolver señales entre 0.1-0.3 y 100 Hz., con una frecuencia natural en torno de 1 Hz. (valores típicos).

- Banda Ancha (BB, “*Broad-Band*”), presentan una respuesta en velocidad plana entre 0.01 y 50 Hz.
- Banda muy Ancha (VBB, “*Very Broad-Band*”), con un ancho de banda que se extiende desde 0.001 hasta 10 Hz.

La elección del tipo de sensor vendrá impuesta por la aplicación de interés.

En Nicaragua el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), mantiene un total de 44 estaciones sísmicas que transmiten sus señales vía radio, Internet y fibra óptica a la Central en Managua, todas con sensores de tres componentes, para registrar el movimiento del suelo en las direcciones (componentes) Vertical, Este - Oeste y Norte – Sur (INETER 2005).

Dentro de las 44 estaciones sísmicas:

- 29 Estaciones son de período corto,
- 13 Estaciones son acelerográficas,
- 1 de Banda ancha.

Todas con sensores ubicados relativamente en superficie.

Con el tiempo se ha aprendido mucho sobre las estaciones de monitoreo sísmico y su instrumentación, poco antes de 1985 en Los Estados Unidos se comenzó a utilizar estaciones de “borehole”, sistema de instalación de acelerógrafo en pozo, pero funcionaron por poco tiempo debido a la instrumentación y técnicas de perforación utilizada.

En la actualidad las estaciones de borehole o arreglo vertical es una de las mejores herramientas para el estudio de respuesta de sitio en un área determinada, esto se debe a la aparición de nueva tecnología, nuevos sistemas de perforación y nueva instrumentación.

2.1 Arreglos verticales o Estaciones de Borehole

Los datos de estaciones de Borehole son necesarios para estudios de mecanismo de fuente y de propagación de ondas, de efectos de sitios locales y como entrada libre de arreglos de respuesta estructural, así como la determinación de la función de transferencia del estrato de suelo, propósito del proyecto que motivo este estudio.

Antes de la selección del sitio de perforación y ejecución de la misma, se pueden utilizar métodos geofísicos para obtener mas detalles y entender las condiciones geológicas en profundidad del área de estudio, así como las propiedades del subsuelo. Estos métodos pueden incluir perfiles de imágenes de resistividad y Análisis Multicanal de Ondas Superficiales con los cuales se podría determinar la profundidad del manto acuático y rocoso si lo hubiesen o dar una idea de donde se podría ubicar el Hyposensor (J. G. Dile, R. A. Steller, R. L. Nigbor, 2003).

La ubicación del Borehole esta dictada principalmente por el tipo de estudios de investigación a desarrollar, por ejemplo un concepto importante para tener en cuenta es la aceleración, debido a que tradicionalmente los ingenieros se han interesado en esta, ya que se relaciona con fuerzas que pueden ser medidas, un sismo se registra en términos esencialmente de aceleración porque conociendo las aceleraciones horizontales del terreno es posible estimar las fuerzas de inercia que se generan en la base de las estructuras, de hecho, son la materia prima para el cálculo de espectros de respuesta. Esta aceleración en la base de la estructura es la que permite el cálculo directo de la acción de diseño sísmico.

Un perfil del arreglo vertical muestra como se disponen los acelerógrafos al ser instalados (ver fig. 4).

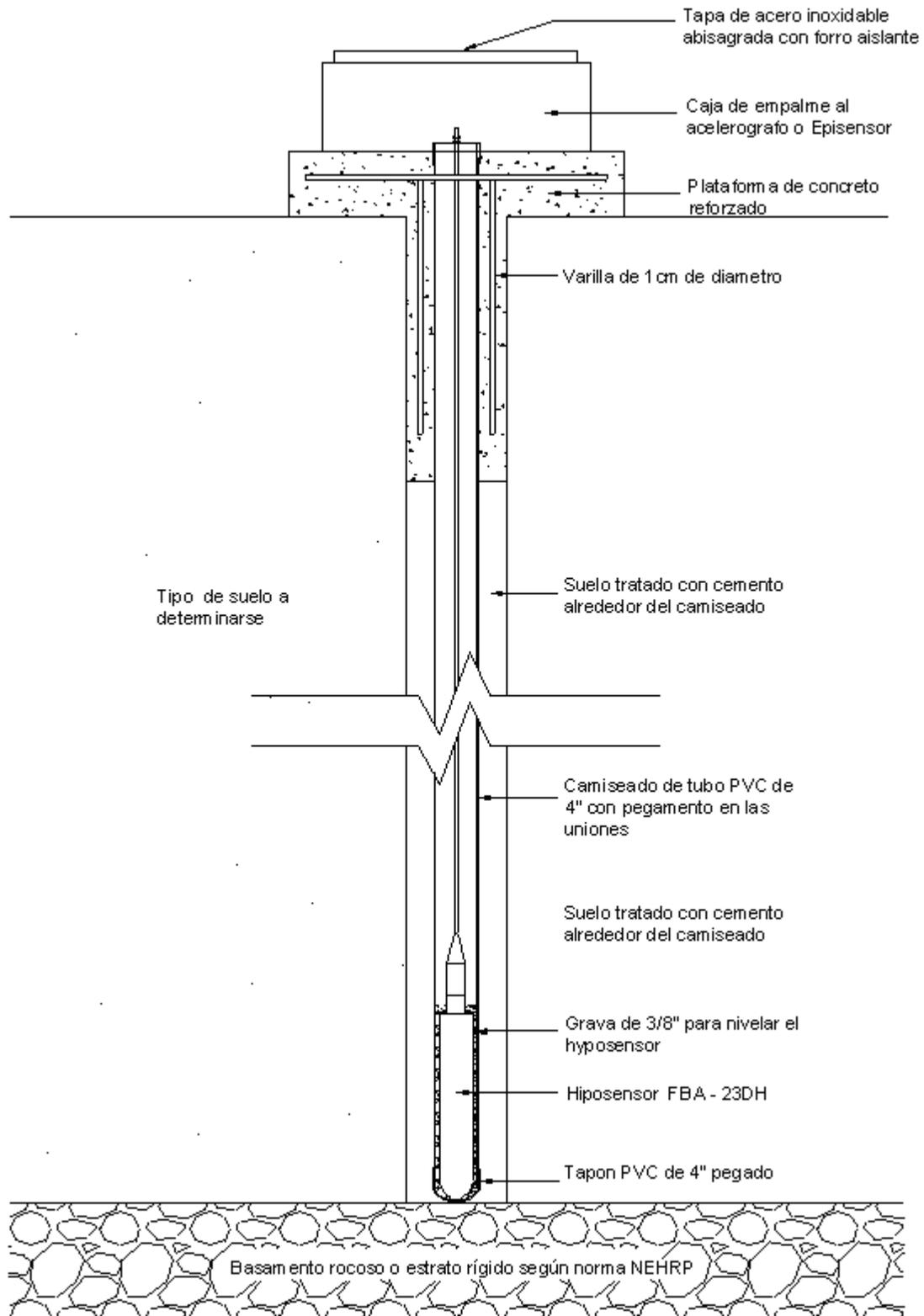


Fig. 4 Perfil de la estación de Borehole o estación sísmica

La razón por lo cual el arreglo debería ser ubicado tan lejos como sea posible de fuentes de ruidos culturales y naturales es la contaminación de los registros, la caseta misma usada para protección de los equipos de registros puede ser una fuente de vibración de ruido y debería ser diseñada cuidadosamente. La interacción de grandes estructura con el suelo puede introducir ruido en el registro que se obtienen.

INGEOMINAS entidad gubernamental Colombiana encargada de los requisitos mínimos para la instalación de acelerógrafos, según sus norma NRS – 98 (INGEOMINAS 2002), especifica que la ubicación del sitio es muy importante ya que la confiabilidad de los registros y su interpretación dependen mucho del lugar escogido. Por tanto es necesario tener clara la finalidad del registro del equipo a instalar y para que tipo de estudio se colocan. En todo caso el sitio elegido debe estar libre de tránsito de automotores y personas, así como de vibraciones inducidas y de otros efectos que le puedan generar al equipo eventos no sísmicos. Para la selección del sitio se tomó en cuenta estas normas, ya que INETER, institución nacional encargada de la actual red de estaciones sísmicas no cuenta con ningún tipo de norma referente a este caso.

En caso donde sea posible se recomienda alejarse 200 m de vías de alto flujo vehicular para instalar el acelerógrafo en superficie (Episensor), así como, edificios altos, antenas parabólicas, tanques elevados, coliseos o demás estructuras elevadas que puedan inducir un movimiento adicional al suelo, el cual amplifique o atenúe la señal sísmica por lo que se recomienda separarse por lo menos 1.5 veces la altura de estos.

Se toma como referencia a normas elaboradas por INGEOMINAS, esto se debe a que en Nicaragua no existen normativas respecto a los estudios relacionados con la instalación de arreglos verticales.

En resumen, los tres grandes objetivos de las estaciones sísmicas son: el monitoreo sísmico, el conocimiento del subsuelo y la evaluación del riesgo sísmico.

2.2 Monitoreo sísmico

Hasta la década de los sesenta la observación sísmica se basaba en estaciones individuales que operaban independientemente con registro fotográfico o similar, en este sentido aparece el concepto de Red Sísmica, aunque el retardo desde que se producía el registro hasta que la información podía ser procesada conjuntamente era considerable, pero en la actualidad, el concepto de Red Sísmica se encuentra asociado al denominado “tiempo real”, es decir, la recepción y procesado de datos casi instantáneos (A. Pazos García 2003).

Dado el alto nivel de amenaza sísmica y volcánica existente en diferentes partes del mundo la vigilancia sísmica es de mucha importancia, como por ejemplo Nicaragua.

El objetivo fundamental para INETER - en el caso de Nicaragua - es informar inmediatamente sobre parámetros de sismos ocurridos, alerta por posibilidad de réplicas fuertes, alerta en caso de enjambres sísmicos por posibilidad de eventos fuertes, alerta en caso de terremotos extremos lejanos por posibilidad de disparar sismos locales en Nicaragua.

2.3 Conocimiento del subsuelo

Es posible conocer o diferenciar el comportamiento para cada tipo de suelo clasificado geotécnicamente; a través de estudios sobre acelerógramas obtenidos en estas estaciones sísmicas se ha llegado a tener conocimiento que estos presentan diferentes comportamiento desde el punto de vista de carga

estática y de respuesta sísmica, estos son: las gravas, las arenas, los limos y las arcillas (C. I. Rosales Climent, 2001).

Las gravas: son suelos de partículas gruesas (76.2 – 4.78) mm, que si se encuentran en estado denso, alcanzan altas resistencias y bajas compresibilidades. Por lo tanto, no involucran riesgos sísmicos especiales.

Las arenas: son suelos de partículas gruesas a finas (4.78 – 0.075) mm, como se aprecia en depósitos de dunas y playas, cuyo comportamiento sísmico depende fundamentalmente de su densidad. En estado suelto son débiles y deformables, y provocan daños severos por asentamientos y por fallas de fundaciones. Si se encuentran sumergidos pueden sufrir licuación y fallas de flujo.

Los limos: son suelos de partículas finas no cohesivas (0.075 – 0.002) mm, cuyo comportamiento sísmico es similar al de las arenas finas, con los agravantes de menor resistencia de roce interno y menor permeabilidad.

Las arcillas: son suelos de partículas muy finas (0.002 – 0.0005) mm, cohesivas, como típicamente se encuentran en depósitos de antiguos fondos de lagunas y en otros lugares pero en menor porcentajes. Su comportamiento sísmico se caracteriza por su alta deformabilidad y consecuente efecto de filtro en las ondas sísmicas, causando movimientos de desplazamientos amplios y de baja frecuencia. Las consecuencias pueden ser fuertes amplificaciones de fuerzas sísmicas en edificios flexibles.

2.4 Evaluación del riesgo sísmico

Las características de los movimientos sísmicos y sus capacidades de causar daños, se modifican en el proceso de propagación de acuerdo a las propiedades del subsuelo (ver fig. 5).

Evaluar el comportamiento sísmico de los suelos en un entorno urbano es, hoy en día, esencial para aspectos de reglamentación urbana, y para los parámetros específicos de diseño y construcción sismorresistente y una de las herramientas principales para este propósito son los Arreglos verticales (C. Rosales Climent, 2001).

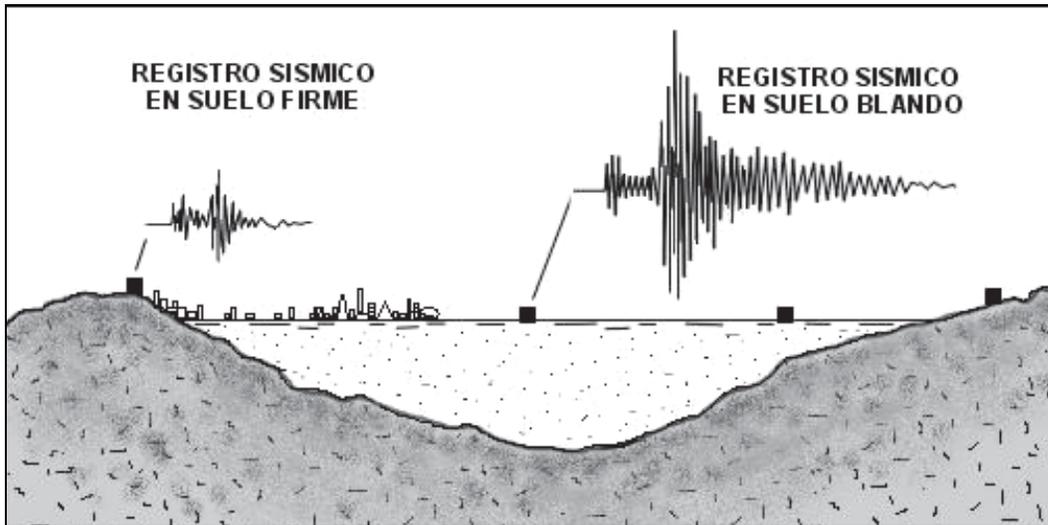


Fig. 5 Diferencia de amplitud en registros sísmicos obtenidos en distintos tipos de suelo para el mismo sismo. Fuente: S. L. Kramer, 1996.

Por ejemplo en el actual reglamento Nicaragüense de la Construcción (RNC - 2007) se maneja el concepto de espectros para diseños sísmicos; y este no es más que la representación de movimientos del suelo registrados en el sitio durante sismos pasados, sino existen registros sísmicos en el lugar entonces este se debe basar en movimiento del suelo registrados en otros sitios bajo condiciones similares. Para el espectro de diseño se toma en cuenta la magnitud del sismo, la distancia del sitio a la falla sísmica, el mecanismo de falla (propagación de ondas, deformación permanente del suelo, la ruptura por fallas, etc.), la geología presente en la trayectoria del viaje de las ondas sísmicas y las condiciones locales del sitio como: el suelo y la topografía.

Además los suelos pueden sufrir cambios importantes en sus estructuras internas debido al paso de las ondas sísmicas a través de ellos. En particular los

suelos pueden: densificarse, licuarse, o deformarse excesivamente durante terremotos de fuerte intensidad (INGEOMINAS 2002).

En casos extremos ellos pueden inducir el volcamiento o el colapso de un edificio (Universidad Católica de Chile *s.f.*). El comportamiento dinámico de los terrenos varía de acuerdo a sus propiedades elásticas, la geometría - espesor y forma de los depósitos sobre el basamento rocoso - y otros factores como la granulometría y el nivel freático.

Algunos terrenos presentan un fenómeno conocido como “efecto de sitio” o efecto sísmico local, asociado con la amplificación selectiva de las ondas y la impedancia, lo que implica que se presenten mayores intensidades y por lo tanto mayores sollicitaciones sísmicas en las edificaciones emplazadas.

CAPITULO 3

CARACTERIZACIÓN DE SITIO

El suelo se puede definir de diferentes perspectivas y en función del propósito para el cual se estudia. En la obra de C. Zea Constantino, y R. Rivera Constantino (2004), se define de dos puntos de vista.

Desde el punto de vista ingenieril, el material que constituye la corteza terrestre se divide en dos categorías: suelo y roca. Suelo es el agregado natural de granos minerales que pueden separarse mediante medios mecánicos - acción combinada del viento, el agua y los procesos de desintegración orgánica - en cambio, roca es el agregado natural de minerales que están conectados por fuerzas permanentes y cohesivas de carácter fuerte y permanente.

Desde el punto de vista geológico, suelo es el material producido por los efectos de la meteorización o alteración sobre las rocas de la superficie de la tierra y está dividido en estratos u horizontes. En cambio roca es el material constitutivo de la corteza terrestre, formado en general por una asociación de minerales y que presenta una cierta homogeneidad estadística; en general es dura y coherente pero a veces es plástica (por ejemplo, la arcilla) o móvil (como ejemplo, la arena).

En estas definiciones se observa que el concepto suelo describe algo que es dinámico, por lo que discernir muchas veces entre roca con un alto grado de meteorización o suelo es, al menos, discutible.

Para tener una mejor definición del subsuelo se hace caracterización de sitio, la cual consiste en determinar aquellas características físicas y mecánicas del mismo que permitan establecer la diferencia existente entre una zona y otra, o aquellos elementos que son de interés en determinado proyecto a desarrollar,

esta no tiene un formato estándar, debido a que los propósitos para cada estudio varían.

La caracterización de sitio se convierte precisamente en el inicio de cualquier proyecto de ingeniería que se desee ejecutar, ya sea con carácter constructivo e investigativo porque influye directamente en las características de este, modificando parcialmente y en ocasiones de forma total el proyecto original.

El avance de la tecnología en cuanto al estudio del suelo, ha permitido estudiar al mismo de diferentes perspectivas con el propósito de obtener un conocimiento mas detallado de sus propiedades y comportamientos según el estudio que se este desarrollando.

Las ciencias aplicadas en la caracterización de sitio principalmente son: Geofísica, Geología y Geotecnia; de estas se derivan una series de métodos que permiten caracterizar el suelo para los propósitos previstos, dentro de los cuales están los aplicados para el desarrollo de este estudio y son mencionado mas adelante en este escrito.

3.1 Estudios previos a la instalación del arreglo vertical

Dentro de los estudios que fundamentalmente se deben realizar para la instalación de arreglos verticales están (J, G. Dile et al. 1996):

- a) Estudio Geofísicos.
- b) Estudio Geológicos.
- c) Estudios Geotécnicos.

3.1.1 Estudios Geofísicos

Existen muchos métodos geofísicos disponibles para la caracterización de sitio y que se pueden utilizar para este tipo de proyecto o estudio presentado. Estas pueden medirse a través de métodos sísmicos, eléctricos, magnéticos y gravimétricos; todos estos requieren de instrumentación y personal especializado, con experiencia en el campo.

Los métodos geofísicos implementado para realizar la caracterización en este estudio fueron:

a) Perfil de imágenes de resistividad eléctrica (Eléctrico), se utilizó para obtener conocimiento general del área de estudio a través del parámetro resistivo del subsuelo el cual indica el grado de compactación del mismo, también ayudo a proponer la profundidad de perforación y no precisamente para definirla porque según la experiencia en su aplicación, el método ha tenido sus limitaciones debido a las condiciones del terreno, muchas ya se han determinado, pero otras aun están sirviendo para evaluar el método, por ejemplo en Managua es posible encontrar el fenómeno conocido como sándwich debido a que su estratigrafía esta compuesta por material piroclástico, este fenómeno consiste en que estratos blandos o suelto muy delgados pueden tener como fronteras estratos compactos o bien consolidados de mayor espesor, algo que hipotéticamente no se considera así, mas bien se supone que a medida que aumenta la profundidad el grado de compactación es mayor, y el fenómeno puede repetirse en una misma estratigrafía a diferentes profundidades, esta seria una limitante para el método entre otras.

b) Análisis multicanal de ondas superficiales (Sísmico), se utilizó, a demás de caracterizar el área, como parámetro para evaluar la estratigrafía encontrada con la perforación a través de un modelamiento teórico de respuesta sísmica del terreno.

3.1.1.1 Perfil de imágenes de resistividad eléctrica

Las medidas de resistividad eléctrica del subsuelo son muy habituales en las prospecciones geofísicas, su finalidad es detectar y localizar cuerpos y estructuras geológicas basándose en su contraste resistivo. La resistividad eléctrica de un material describe la dificultad que encuentra la corriente a su paso por él (F. Javier, Sanchez. s.f.).

El método consiste en la inyección de corriente continua o de baja frecuencia en el terreno mediante un par de electrodo y la determinación de la diferencia de potencial, mediante otro par de electrodos. La magnitud de esta medida depende, entre otras variables, de la distribución de resistividades de las estructuras del subsuelo, de las distancias entre los electrodos y de la corriente inyectada.

Uno de los principios básicos de este tipo de prospección geoelectrica es que a mayor longitud del dispositivo -mayor separación entre electrodos- mayor penetración en el subsuelo, es decir que se alcanza un perfil de imágenes resistividad más profundo (W. Molina Padrón, 2006).

Existen diferentes dispositivos geoelectricos, llamados así, porque son un conjunto de electrodos que inyectan corriente en el subsuelo y registran el potencial generado por los mismos, o también conocido como arreglos, aplicados para la obtención de las imágenes del perfil de resistividad, dentro de los cuales están:

- a) Wenner
- b) Schlumberger
- c) Polo – Polo
- d) Polo – Dipolo
- e) Dipolo – Dipolo
- f) Gradiente o Gradiente Múltiple

Los diferentes tipos de dispositivos o arreglos empleados en este método se diferencian entre si por la distancia relativa entre los electrodos, y la posición de los electrodos de corriente respecto a los de potencial, el arreglo utilizado para este estudio fue el de gradiente múltiple, el cual consiste en tender cuatro cable en la superficie de manera alineada en un mismo tiempo por cada estación (registro tomado en los extremos y el centro del tendido), una vez medido los puntos de una estación el primer cable es removido y colocado de último para extender el perfil bidimensional (J. Mendoza y E. Obando, 2007). Esta operación puede ser repetida cuantas veces convenga hasta alcanzar la longitud deseada, este aprovecha las ventajas de todos los arreglos tradicionales.

Esta prospección tiene como objetivo determinar la resistividad eléctrica de las rocas que constituyen el subsuelo y su distribución, de tal manera que se puedan interpretar los cambios que se producen debidos a la presencia del agua subterránea o al contenido mineralógico que presentan las formaciones de roca. Estos métodos geoeléctricos utilizan la distribución del subsuelo en términos de homogeneidad, basados en la caracterización resistiva.

En esta distribución del subsuelo, es posible observar zonas anómalas que pueden ser debidas a estructuras geológicas contrastantes o bien la presencia de fluidos conductores como el agua y el contenido mineralógico que altera los valores de la resistividad del medio.

Sabiendo que la conductividad de los diferentes estratos varía con la ionización de las sales presentes en el suelo, la roca densa con pocos huecos, poca humedad y baja ionización tendrá alta resistencia, mientras que para la arcilla saturada será baja.

Este método se fundamenta en que una corriente eléctrica continúa puede propagarse en roca y minerales de maneras distintas (S. Yesica Fazzito, 2004):

- Por conducción electrónica u óhmica: los electrodos fluyen libremente dentro de la estructura cristalina del material.
- Por conducción electrolítica: la corriente es portada por los iones de soluciones salinas, a una velocidad lenta, y se mueven a través de los poros interconectados de suelo permeable, sedimentos no consolidados y roca.
- Por conducción dieléctrica: ocurre en conductores bien débiles (o aislante) cuando se aplica una corriente externa alternante, donde los electrodos se oriente respecto a su núcleo.

3.1.1.2 Método de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW)

El MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) o método de análisis multicanal de ondas superficiales fue desarrollado inicialmente por Park en 1998, es un método sísmico el cual genera perfiles de velocidades de ondas cortantes versus profundidad a través del análisis multicanal de ondas Rayleigh, lo cual permite determinar espesores de estratos rígidos y roca de acuerdo al concepto descrito en el nuevo Reglamento Nacional de la Construcción de Nicaragua (2007) o según normas del Programa Nacional de Reducción de Peligro Sísmico de los Estados Unidos (ver tabla 1).

El método MASW básicamente se fundamenta en la teoría de *dispersión* o variación de la velocidad de fase con respecto a la frecuencia de las ondas Rayleigh (S. L. Kramer, 1996), este parte de registros de sismogramas obtenidos a través de la generación de ondas superficiales usando como fuente generadora de las mismas normalmente un martillo de 10 kg, aunque está demostrado que un incremento en la energía aplicada es directamente proporcional al rango de frecuencias a ser estudiadas.

Tipo de Suelo	Descripción	Velocidad V_s en profundidades superiores a 30m (m/s).
A	Roca dura	$V_s > 1500$
B	Roca	$760 < V_s \leq 1500$
E	Roca blanda y suelo muy denso	$360 < V_s \leq 760$
D	Suelo rígido $15 \leq N^1 \leq 50$ ó $50 \text{kpa} \leq Su^2 \leq 100 \text{kpa}$	$180 \leq V_s \leq 360$
E	Perfil con mas de 3m arcilla blanda con $PI^3 > 20$, $wc^4 > 40\%$ y $Su < 25 \text{kpa}$	$V_s < 180$
F	Suelo susceptible a falla o colapso bajo carga sísmica tales como licuefacción de suelo, arcilla altamente sensible y suelos colapsable débilmente cementado. Arcillas altamente orgánica con rigideces mayores que 3m. Arcilla de alta plasticidad con rigidez mayor que 8m y $PI > 75$ Suelo muy denso, arcilla de rigidez media con rigidez mayores que 36m.	
¹ N: numero de golpe SPT ² Su: fuerza cortante irreducida ³ IP: índice de plasticidad ⁴ wc: contenido de humedad		

Tabla 1. Criterio para la definición de basamento según norma NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program of E.U). Fuente: S. L. Kramer , 1996, p.339

Para la adquisición de los datos un múltiplo número de receptores usualmente 24 o más son desplegados linealmente a espacio uniforme entre 3 – 5 pies conectado a un dispositivo multicanal de grabación o sismógrafo (Ver anexo I-8).

La propagación vertical de ondas superficiales en un medio heterogéneo muestra un comportamiento dispersivo. Dispersión significa que diferentes frecuencias tiene diferentes velocidades de fase.

En un medio homogéneo todas las longitudes de ondas tienen la misma velocidad, no hay dispersión, si el medio no es homogéneo verticalmente y por

ende esta estratificado con diferentes propiedades mecánicas, el comportamiento de las ondas superficiales difiere.

Todas las ondas se propagan con velocidades de fases que dependen de las propiedades mecánicas de cada capa de suelo involucrada en la propagación, y hay dispersión.

La generación de ondas inicia en superficie, pero consecuentemente se generan ondas de cuerpos, los sensores (geófonos) más cerca de la fuente registran relativamente altas frecuencias y longitudes de ondas cortas en comparación con los otros que están mas lejos y continúan su registro de la ondas de cuerpos en profundidad , caso contrario ocurre con los geófonos mas lejos de la fuente los cuales registran bajas frecuencias con longitudes de ondas largas y también continúan su registro en profundidad de las velocidades de la ondas de cuerpos, si el subsuelo fuese homogéneo las velocidades se mantendrían uniforme de lo contrario estas aumentarían con la profundidad y en esta condición aparece la propiedad de dispersión (ver fig. 6).

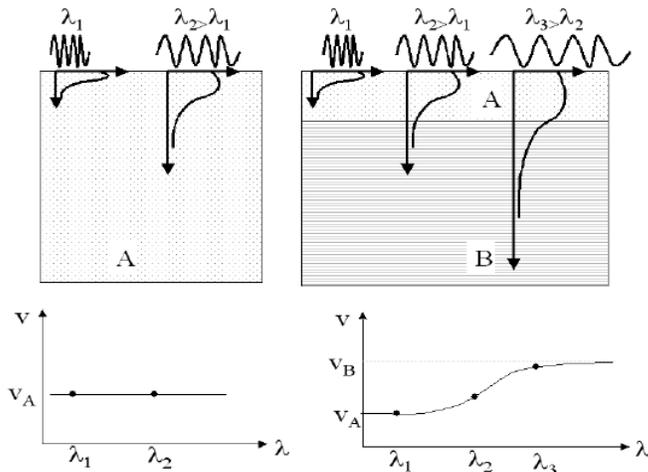


Fig. 6 Registro de geófonos en superficie y profundidad a medida que se alejan de la fuente

La longitud del arreglo usado en el sondeo, en ocasiones, está relacionada directamente con la profundidad máxima de exploración Z_{max} .

$$D \approx Z_{\max} ,$$

Donde D corresponde a la longitud del arreglo de geófonos colocados linealmente, generalmente la longitud del arreglo se puede aumentar utilizando más geófonos y sismógrafos, pero cuando no se dispone con más de estos elementos se recurre a utilizar otro tipo arreglo de campo como el conocido WalkAway descrito más adelante en este escrito.

Cada canal esta destinado a la grabación de las vibraciones en cada uno de los receptores. La grabación multicanal (comúnmente llamada recolección del tiro) consiste de múltiples números de serie de tiempos (llamado trazas) de todos los receptores de una manera ordenada. Una de las diferencia de esta técnica es que requiere una fuente de energía que sea capaz de producir perturbaciones o sacudidas y geófonos que sean capaz de detectar señales de bajas frecuencias (<10hz) (P. Choon B. 2003, traducido).

La frecuencia de los geófonos usados en el sondeo es determinante para la detección de longitudes de ondas λ lo suficientemente largas de acuerdo a:

$$\lambda = \frac{V}{f} ,$$

Siendo V , velocidad con que viaja la onda y f , frecuencia de propagación.

Sin embargo otros autores han reportado que como regla para estimar la máxima profundidad a estudiar, se puede decir que, la máxima longitud de onda λ_{\max} que se puede registrar es usualmente la mitad de la longitud D del arreglo usado.

Los datos sísmicos son descargados y procesados usando el programa SurfSeis desarrollado por Kansas Geological Survey. El programa SurfSeis desarrolla la curva dispersiva (frecuencia vs tiempo de viaje) del modo fundamental de datos de ondas superficiales. Una inversión de la curva dispersiva produce un perfil de

velocidad de ondas cortante vs profundidad, lo cual nos ayuda a determinar la rigidez de la capa de suelo.

Las propiedades de dispersión de todos los tipos de ondas (ondas de cuerpo y superficiales) son graficada por un método de transformación de campo de onda que directamente convierte el registro de varios canales (multicanal) en una imagen donde un modelo de dispersión es reconocido en la distribución de energía transformada.

La propiedad de dispersión necesaria equivalente al modo fundamental es extraída de un modelo específico (Kansas Geological Surveys, 2006) y las ondas reflejadas, dispersas y el ruido ambiental automáticamente son quitados durante la transformación (ver fig. 7 y fig. 8).

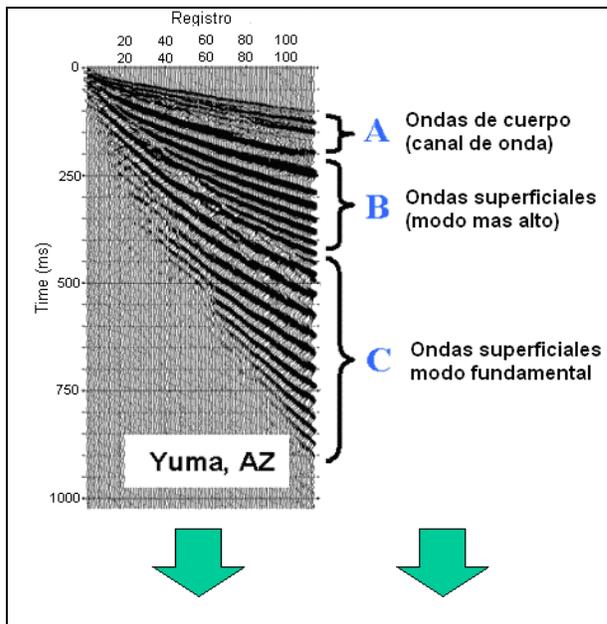


Fig. 7 Ejemplo de registro en el método MASW en que se identifican los diferentes tipos de ondas. Fuente: <http://www.kgs.ku.edu/software/surfseis/masw.html>

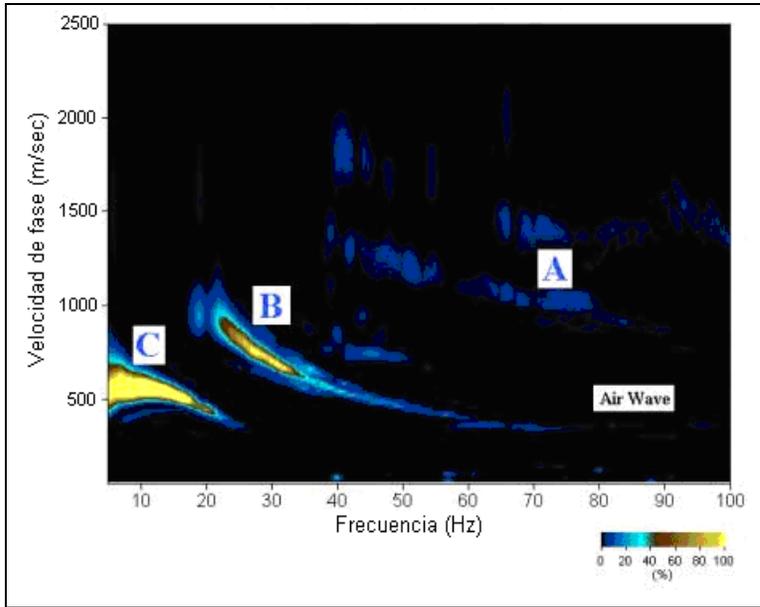


Fig. 8 Imagen de dispersión
Fuente: <http://www.kgs.ku.edu/software/surfseis/masw.html>

3.1.1.2.1 Método “WalkAway”.

Este método básicamente consiste en la construcción de registros de mayor número de trazas que recibidores moviendo la fuente sísmica utilizada a una distancia cerca, media y lejos del primer geófono con el propósito de alcanzar mayor profundidad para el registros de velocidades de ondas Vs (ver fig. 9), a esto se le conoce como apilamiento que nos es mas que la obtención de un solo registro por la combinación de múltiple registros, y se obtiene con software SurfSeis (ver fig. 10).

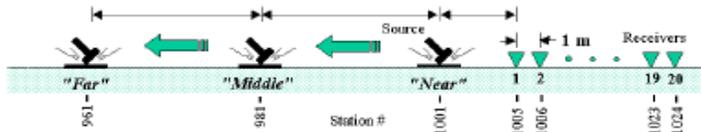


Fig. 9 Arreglo WalkAway

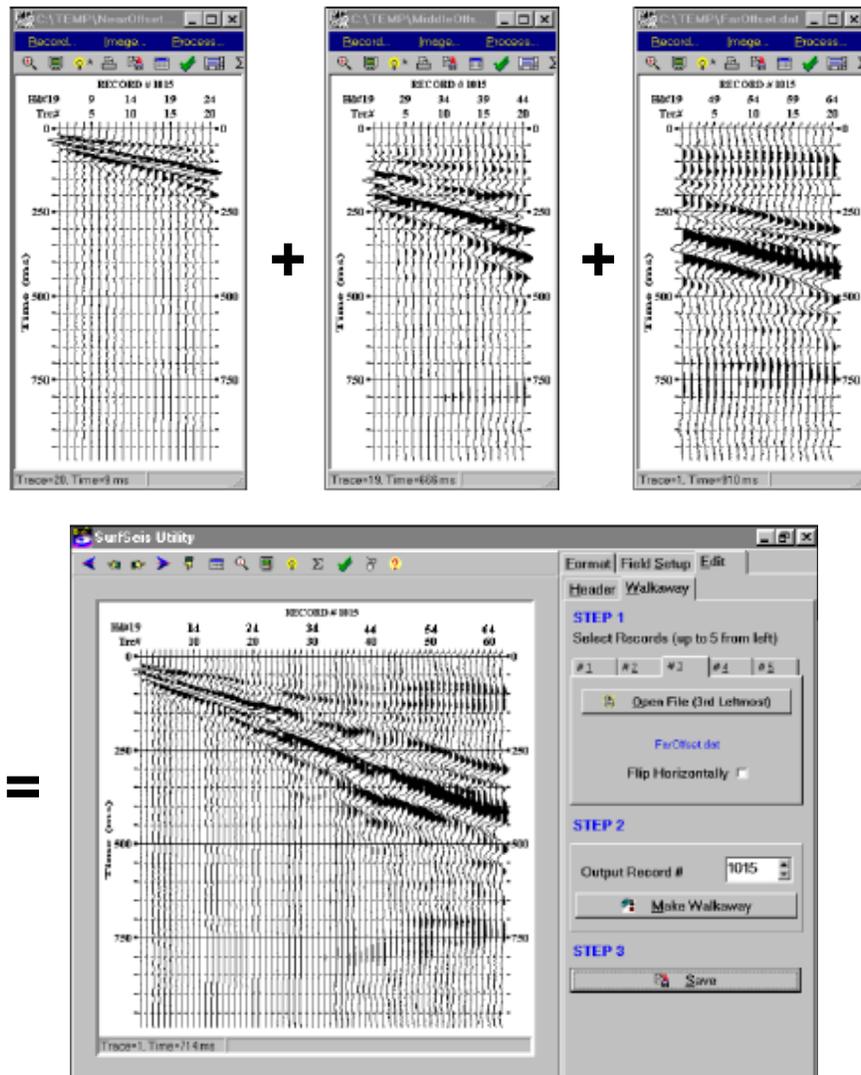


Fig. 9 Apilamiento de registros

Como regla, se usa que el primer tiro se hace a una distancia igual a la separación usada entre geófonos (dx) a partir del primer o ultimo geófono del arreglo. Luego el segundo tiro se coloca a una distancia igual a la separación entre geófonos multiplicada por el numero de recibidores, referida al tiro efectuado previamente, y así sucesivamente, hasta hacer un total de 5 registros para finalmente construir (Sumando todo los registros) un registro *WalkAway*.

Las aplicaciones del MASW son variadas y hasta la fecha las aplicaciones típicas han sido (*Black Geotechnical, 2006, traducido*):

- Determinación de la profundidad de la roca (según norma NEHRP).
- Proporcionar parámetros de rigidez (modulo de young) para cálculo de asentamientos.
- Definir la extensión de la arcilla débil compresible.
- Definir cauces o canales enterrados.

3.1.2 Estudios geológicos

El trabajo geológico se inicia recabando estudios realizados en la ciudad de Managua y cerca del área donde se desarrollo el proyecto, cualquier conclusión de la geología del área estará respaldada por los demás estudios a realizar, y exactamente en el momento de la perforación.

El conocimiento específico de la geología del sitio es extremadamente útil durante la planeación para los costos exactos de perforación del proyecto. El propósito principal de los estudios geológicos es determinar la naturaleza de los depósitos subyacentes en el lugar de la investigación y determinar los tipos de suelo y roca que se encuentran (G, Sowers, et al).

Los depósitos geológicos son bien conocidos por sus capacidades de modificar las características de movimiento sísmico e influenciar en la cantidad de daños a las infraestructuras.

Dentro de los estudios mas reciente sobre la geología del área de Managua, esta el publicado por Kutterolf et al, 2007, quienes atribuyen los depósitos de Managua a los volcanes Masaya, Apoyo al sureste y Apoyéque al noreste y; además proponen que la estratigrafía de Managua esta compuesta por tres formaciones principales, estas son: Formación Las Sierras, Formación Managua y Formación Chiltepe (ver fig. 10).

3.1.2.1 Formación Las Sierras

La edad de la formación Las Sierras fue estimada entre 100,000 y 1, 000,000 de años (D. C, Bice 1980b), basadas en datos de potasio-argón y constituye el basamento del grupo Managua, es decir, la formación mas antigua de la estratigrafía de Managua respecto a las demás, de ahí se le atribuye que La formación La Sierras y las otras formaciones mas recientes pertenecen al cuaternario que empezó hace 2, 000,000 de años.

Según Kutterolf et. al, (2007), la formación Las Sierras esta compuesta por dos unidades separadas por un paleosuelo, y estas corresponden a Tefra Unicit y Tefra Fontana, las cuales son comunes encontrar en el área de estudio (al sur de la ciudad de Managua).

3.1.2.1.1 Tefra Unicit: Consiste de un depósito de pómez de caída masiva cubierta por sedimentos localmente variables como lahares (detritos) y depósitos epiclásticos con abundante lapilli acrecional (formado por granos menores).

3.1.2.1.2 Tefra Fontana: Es un depósito de caída compuesto por escoria de color negro con fragmentos bien clasificados. Es la secuencia mas extensa y fácilmente reconocible del grupo Managua, con una edad estimada de 25,000 a 35,000 años (D. C, Bice, 1985).

3.1.2.2 Formación Managua:

La Formación Managua esta compuesta por siete unidades piroclásticas formadas por grandes erupciones explosivas de la Laguna de apoyo y La Caldera de Masaya ubicadas al sur y sureste de la ciudad de Managua respectivamente, de composición basáltica y riolítica separadas por paleosuelos.

3.1.2.2.1 Pómez de apoyo: dividida en dos unidades de depósitos de caída correspondientes a Apoyo inferior y Apoyo Superior con edades de $24, 650 \pm 120$ y $23, 890 \pm 240$ años respectivamente separadas por paleosuelos, también están cubierta por una secuencia de líticos, cenizas y pequeñas oleadas.

3.1.2.2.2 San Antonio Tefra: es un depósito de caída de escoria de color negro con una edad estimada de 6100 años y esta separado por sedimentos tobaceos y un paleosuelo de color amarillo. Esta cubierto por oleadas que fueron encontrada al noroeste, norte y sur de la caldera Masaya.

3.1.2.2.3 La Concepción Tefra: es un depósito de caída de escoria muy vesiculada de color negro que se expone al sur de la Caldera Masaya separada por pequeñas capas de ceniza con mayor contenido de pequeños líticos de composición básica hacia su cima.

3.1.2.2.4 Masaya Triple Layer: depósito compuesto por pequeñas capas de escorias muy vesiculada con intercalaciones de ceniza compacta con una edad estimada de $2,120 \pm 120$ (Perez y Freundt, 2006) este se encuentra al noreste de la Caldera Masaya y se definen con una unidad poco potente y distintiva.

3.1.2.2.5 Masaya Tuff: es un depósito de oleadas que se extiende a más de 35 Kilómetros de la Caldera Masaya con una edad estimada de 2000 años, compuesto por lapilli de color oscuro separadas por pequeñas capas de cenizas.

3.1.2.2.6 Ticuantepe Lapilli: es un depósito de caída de escoria de color negro que cubre a Masaya Tuff al oeste de la caldera Masaya compuesto por cuatro capas pequeñas de Lapilli soportado grano a grano y separado por capas de cenizas muy ricos en líticos.

3.1.2.3 Formación Chiltepe

Es una secuencia de depósitos de volcanoclasticos que son divididos en seis unidades principales (Kutterolf et al, 2007).

3.1.2.3.1 Tefra de Apoyeque Inferior: es un depósito de pómez de caída de color blanco de composición dacítica, separado por una delgada capa de sedimentos tobaceos erosionados y emplazado por la Pómez de Apoyéque Superior.

3.1.2.3.2 Tefra de Apoyeque Superior: es un depósito de pómez de caída de color blanco con gradación inversa con una edad estimada de $12,400 \pm 100$.

3.1.2.3.3 Tefra de Xiloa: se trata de un depósito de pómez de caída con intercalaciones de oleadas muy erosionadas con una edad estimada de $6,105 \pm 30$ años.

3.1.2.3.4 Tefra Mateares: es un depósito compuesto por intercalaciones de pequeñas capas de lapilli y pómez las cuales varian en su composición con intercalaciones de cenizas e inclusiones de líticos de composición andecítica.

3.1.2.3.5 Tefra Los Cedros: depósito de pómez de caída de composición dacítica con intercalaciones de pequeñas capas de lapilli y se extiende al oeste de Managua.

3.1.2.3.6 Tefra Chiltepe: es un depósito de pómez de caída de composición dacítica producido por erupciones plinianas del volcán Apoyeque separado por pequeñas capas de cenizas y depósitos de surges que tiene inclusiones de líticos de composición basálticos.

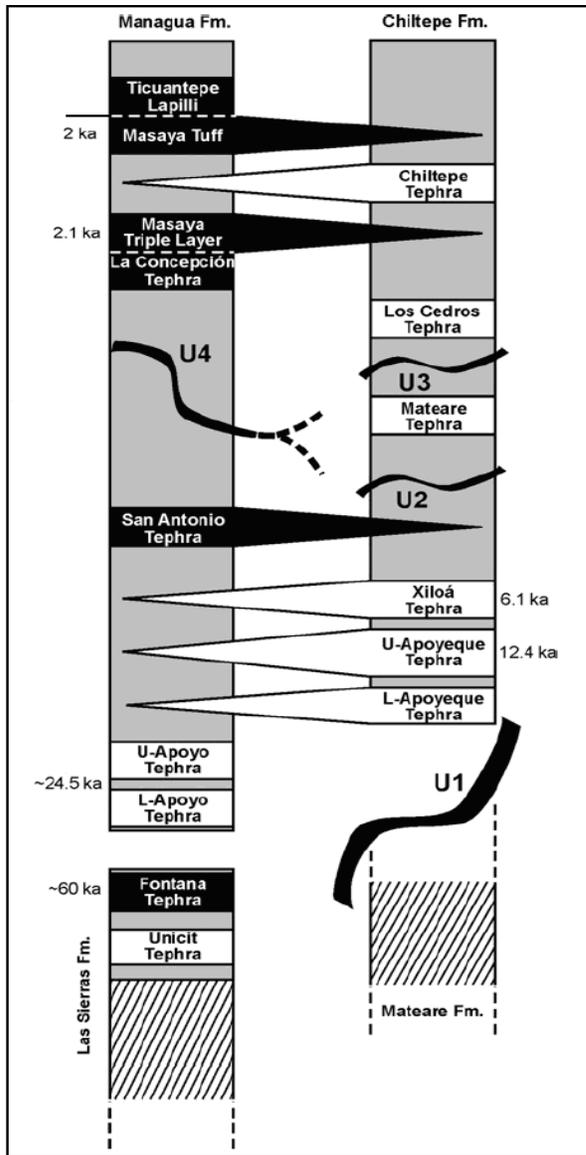


Fig. 10 Columna estratigráfica de Managua Propuesta por Kutterolf

3.1.3 Estudio geotécnico

Generalmente la instalación de estaciones de Borehole esta instigada por el deseo de entender la respuesta de sitio al movimiento del terreno. La adquisición de muestra de la formación durante la perforación, así como la información geofísica provee una gran parte de la información en el estudio de la caracterización de sitio.

Estas muestras no solo pueden proveer una clara indicación de la formación debajo del sitio, sino que también pueden ser utilizadas para estudio en el laboratorio y determinar las propiedades índices de interés del subsuelo (J. Sainz Pascual *s.f.*).

La Geotécnica se encarga del estudio de las propiedades mecánicas del suelo, las que son útiles para entender su comportamiento según la visión de la investigación y con la cual se pueden alcanzar estudios muy puntuales - específicos - pero es necesario entender los conceptos de estas propiedades para delimitar los alcances de la misma.

3.1.3.1 Origen y formación de los suelos

Las teorías acerca de la formación de la Tierra, han sido muchas, y de igual forma para lo que llamamos suelos; partiendo de los conceptos antes mencionados, es evidente que el origen y formación de los suelos ha sido objeto de estudios desde hace mucho tiempo y los resultados hoy en día son nuestras referencias para seguir investigando al mismo.

El suelo que constituye la interfase entre las rocas del substrato continental y la atmósfera, se ha formado como consecuencia de los fenómenos físicos, físico - químicos y biológicos de intercambio que ahí se producen (P. Higuera, y R. Oyarzun, 2007, p. 1).

Sin embargo, en últimos análisis, todos los mecanismos de ataque pueden incluirse en dos grandes grupos (E. Badillo Juárez y A. Rico Rodríguez, 2001):

1. Desintegración mecánica, proceso que divide las rocas en partículas pequeñas que conservan las propiedades físicas y químicas de la roca madre producto de la intemperización de las rocas por agentes físicos, tales como cambios periódicos de temperatura, efectos de organismo, plantas, etc.

2. Descomposición química, proceso por el cual la roca se transforma en un producto de diferentes propiedades físicas y químicas debido a la acción de agentes que la atacan modificando su constitución mineralógica o química. El principal agente es el agua y los mecanismos de ataque más importantes son la oxidación, la hidratación y la carbonatación.

El resultado de estos mecanismos, es una diversidad de suelos, pero debe notarse que su formación ha ocurrido a través de las Eras Geológicas, tal como sigue ocurriendo hoy; en consecuencia, el hombre es completamente ajeno a la génesis del suelo, solo le toca manejarlo, tal como la naturaleza se lo presenta.

Esta diversidad de suelos se puede agrupar según la geología, auxiliar de la ingeniería civil, en dos grandes grupos como son los suelos residuales y los suelos transportados (C. Constantino, y R. Constantino, p. 2-3).

Los suelos residuales son el producto de la desintegración y alteración de los componentes minerales de la roca madre debido a los grandes agentes climáticos como pueden ser la humedad, exposición solar, etc.

Los suelos transportados son el producto de la acción de agentes de transporte que actúan sobre la roca madre o el suelo original entre los que vale la pena mencionar el viento, los ríos, la fuerza de gravedad y los volcanes, generando depósitos eólicos, aluviales, lacustre y marinos, de piemontes, volcánicos recientes y glaciares. Dentro de estos, algunos resultan comunes en Managua principalmente los depósitos aluviales y los volcánicos recientes.

Los sedimentos aluviales son arrastrados y depositados por el agua en movimiento; debido a cambios de velocidad del agua a lo largo del cauce se van depositando los tamaños de los granos en el lecho de la corriente o río en forma gradual, desde los grandes fragmentos de roca para velocidades elevadas del

agua, hasta los tamaños de granos de suelo como gravas, arenas, limos y arcillas.

Los depósitos volcánicos recientes forman un grupo muy especial debido a su gran variedad, como son grandes fragmentos de rocas, lahares (detritus), cenizas volcánicas y vidrio volcánico, para el área de Managua en donde se encuentra el área de estudio es muy común encontrar depósitos volcánicos de diferentes eventos eruptivos.

3.1.3.2 Definiciones físicas y propiedades índices

Para entender el comportamiento de los depósitos de suelos es necesario analizar ciertas propiedades que funcionan como índice, o sea que proporcionan una idea del comportamiento del material en estudio en comparación con otro.

3.1.3.2.1 Propiedades de los granos

Las características de los granos son parte de las propiedades que proporcionan una idea del comportamiento mecánico de la masa de suelo. Se clasifican en: Forma, Mineralogía, Densidad (Peso unitario), Dureza, Granulometría y Plasticidad. Las propiedades sometidas a este estudio, implican únicamente, Granulometría, Plasticidad y Peso unitario.

Los granos gruesos corresponden a los tamaños relativamente grandes de gravas y arenas (> Tamiz # 200 o 0.075 mm). Los granos finos corresponden a los tamaños microscópicos de limos y las laminas a los tamaños microscópicos y submicroscópicos de arcillas.

3.1.3.2.2 Distribución Granulométrica

La distribución de los granos por tamaños solo tiene importancia en el caso de los suelos gruesos. La granulometría indica la distribución por tamaños de partículas en un suelo determinado en la curva granulométrica, por la columna de tamices de la serie normalizada. Los tamices que se emplean se acoplan de manera que van disminuyendo sus aberturas de arriba hacia abajo.

La muestra se deposita en el tamiz superior y se somete el conjunto de tamices a la acción de un agitador mecánico. Una vez obtenidos los porcentajes acumulados, estos se grafican contra el diámetro correspondiente de la escala semilogarítmica (ver fig. 11) formando la curva de distribución granulométrica (Escuela Universitaria Politécnica *s.f.* p.5).

La curva granulométrica sirve para determinar la abertura por las que pasan el 10%, 30% y 60% del suelo y es un indicativo de la uniformidad del tamaño de los granos, una línea acostada indica un suelo con tamaño variado, en cambio una curva parada señala un suelo con predominancia de un tamaño.

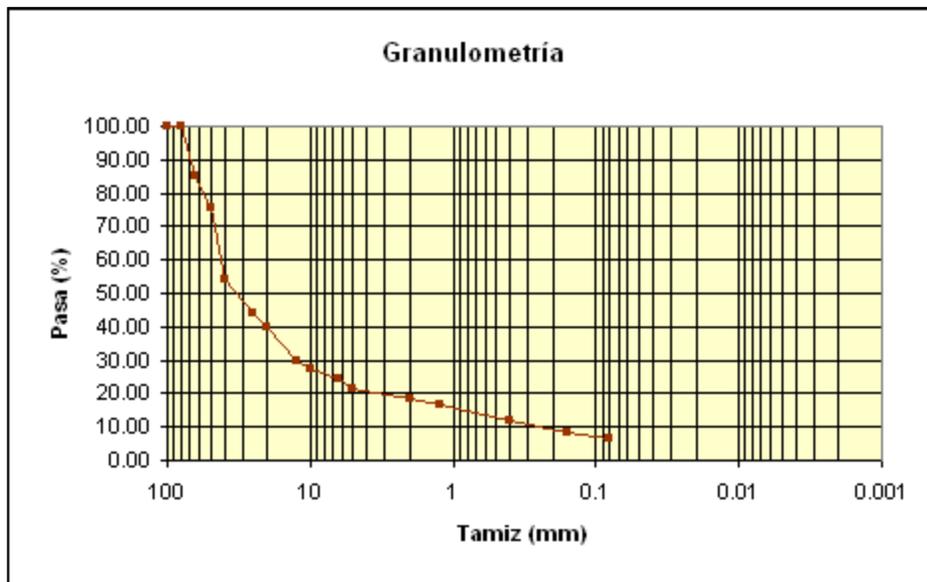


Fig. 11 Escala semilogarítmica para dibujar curva de distribución granulométrica
Fuente: www.jordigonzalezboada.com.htm

El análisis granulométrico es un ensayo de identificación del que no se obtendrán índices que expresen cuantitativamente las propiedades mecánicas de un suelo. La granulometría junto con otros ensayos pondrá de manifiesto desde el punto de vista cualitativo cuando dos suelos son similares y cabe esperar un comportamiento semejante.

Son de interés los siguientes parámetros:

a) Diámetro eficaz (D_{10}): abertura del tamiz por la que pasa el 10% de las partículas del suelo. Juega un papel importante en la conductividad hidráulica del suelo.

b) Coeficiente de uniformidad: determina la uniformidad del suelo. Para que la parte gruesa de un suelos sea bien graduada se requiere, en el caso de arenas, que el C_u sea mayor de 6, en el caso de las gravas C_u mayor de 4.

$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ Siendo D_{60} la luz del tamiz por la que pasa el 60% de partículas del suelo.

c) Coeficiente de concavidad: proporciona información sobre si el suelo esta bien o mal graduado. Un suelo bien graduado tiene proporciones equilibradas de arena, limo y arcilla. Las arenas requieren que C_c este comprendido entre los valores 1 y 3, de la misma manera para las gravas. En general los suelos bien graduados se compactan mejor y pueden adquirir permeabilidad y deformabilidad mas bajas.

$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}}$ Siendo D_{30} la luz del tamiz por la que pasa el 30% de partículas de suelo.

La granulometría permite construir un perfil del suelo en un determinado sitio, el cual es útil para conocer el tipo de material y el espesor de los estratos existentes.

3.1.3.2.3 Plasticidad

Los tres estados de la materia que se identifican son: el sólido, el líquido y el gaseoso. El estado sólido se identifica por su impenetrabilidad, el líquido y el gaseoso se reconocen porque son estados fluidos, sin embargo existe un cuarto estado conocido como estado plástico, caracterizado porque a la materia se le puede dar la forma que se quiere, esto quiere decir que puede ser moldeada; esta es la consistencia que adquiere la masa para hacer pasteles cuando el panadero la trabaja.

En los suelos para lograr este estado es necesario hacer un remoldeo del suelo con espátula y agregarle o quitarle agua hasta lograr la consistencia plástica, de hecho existe un rango de humedades para las cuales el suelo se comporta plásticamente. Incluso se puede hablar de estados intermedios de la materia como el semisólido o semilíquido dependiendo del contenido de agua de los suelos remoldeado.

Esto se explica esquemáticamente en el siguiente diagrama.

ESTADO:	SÓLIDO	SEMISÓLIDO	PLÁSTICO	SEMILÍQUIDO	LÍQUIDO
FRONTERA:	LC	LP	LL		

Estados de un suelo remoldeado haciendo variar su contenido de agua

Fuente: "Notas sobre fundamentos de la mecánica de suelos, p. 13"

Según el esquema anterior las fronteras que definen el estado plástico son:

LP: Limite Plástico, frontera inferior entre el estado plástico y el semisólido.

LL: Limite Líquido, frontera superior entre el estado plástico y el semisólido.

Estos límites son conocidos como Límites de Atterberg y para su determinación solamente se utiliza la porción de suelo que pasa el tamiz de 0.40 mm (n° 40 ASTM).

Para la determinación del límite líquido actualmente existen dos técnicas: La copa de Casagrande y el Método del Cono, la primera es la más antigua y la que se usará en este trabajo. Consta de un recipiente de bronce semiesférico (ver fig. 12) con radio interior de 54 mm, espesor de 2 mm y peso de 200 ± 20 g incluido un tacón adosado. En la copa se colocará el material a ensayar (suelo amasado con una cierta cantidad de agua) y posteriormente se le hará una ranura a todo lo largo del meridiano que pasa por el centro del tacón (Escuela universitaria politécnica s.f. p.10).

La ranura es de forma trapecial y se logra utilizando un ranurador de dimensiones estándares: 2 mm de base, 11 mm de corona y 8 mm de altura, manteniéndolo siempre normal a la copa semiesférica. Mediante una manivela que eleva la copa a una altura de 1.0 cm., el recipiente golpea la base de micarta del equipo, varias veces a un ritmo de 2 golpes por segundo. A medida que se van dando los golpes la ranura se va cerrando, el Límite Líquido se define como la cantidad de agua para el que la ranura se cierra a lo largo de $\frac{1}{2}$ " (1.27 cm) con 25 golpes dado a la copa (C. Zea Constantino y R. Rivera Constantino).

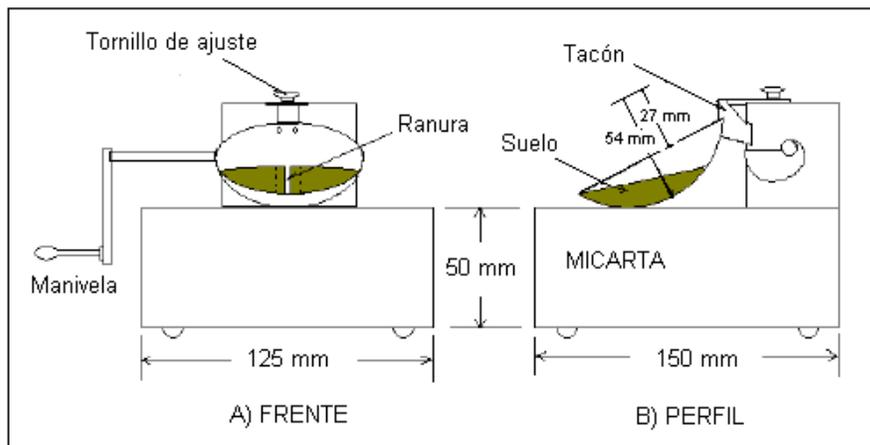


Fig. 12 Esquema de la copa de Casagrande
Fuente: "Notas sobre fundamentos de la mecánica de suelos, p. 14"

Para la determinación del límite plástico se rola entre la palma de una mano y los dedos de la otra un fragmento de suelo hasta convertirlo en un cilindro. El límite plástico se alcanza por este procedimiento cuando el material se desmorona y se agrieta justamente en el momento en que el cilindro de suelo alcanza un diámetro de 1/8" (3.2 mm).

El índice de plasticidad es un parámetro físico que se relaciona con la facilidad de manejo del suelo, por una parte, y con el contenido y tipo de arcilla presente en el suelo. Podría indicar con que facilidad las ondas sísmicas atraviesan un suelo y cuanto lo deforma, por que las ondas sísmicas generan fuerzas en todas direcciones manifestadas a través de energía liberada.

3.1.3.2.4 Peso Unitario

El peso unitario de un suelo, esta definido como el peso de la muestra, sobre su volumen. Si se tiene una figura regular de muestra, se puede hallar su volumen con las medidas de esta figura, y por geometría, sacar el volumen de suelo que hay. Si por el contrario, no se cuenta de una figura geométrica regular, se debe llevar a otros métodos, por medio de los cuales con el desplazamiento de agua, al meter este suelo en un estanque llena de esta, se puede llegar a calcular el volumen de la muestra. Con este método, se debe tener en cuenta de que al suelo no le debe entrar agua a su interior, porque de lo contrario, se estaría alterando los resultados.

El peso unitario generalmente se le determina a los agregados como gravas y arenas con el fin de evaluar su calidad para la construcción, y también da una idea de la característica de la roca madre de donde se extrajo y de su estado natural en los depositos donde se encuentran.

3.1.3.3 Clasificación de suelos

Un sistema de clasificación de suelos es un ordenamiento de los diferentes suelos en grupos que tienen propiedades similares. El propósito es facilitar la estimación de las propiedades de un suelo por comparación con otros de la misma clase cuyas propiedades se conocen, y para facilitar al ingeniero un método preciso para descripción del mismo. Sin embargo, son tanta las propiedades que interesan a los ingenieros y tantas las combinaciones de estas propiedades en cualquier depósito natural de suelo, que cualquier sistema de clasificación parece impracticable.

En su lugar los grupos o clases se basan en aquellas propiedades que son más importantes de acuerdo con el carácter particular de la obra de ingeniería para la cual se ha desarrollado la clasificación.

3.1.3.3.1 Distinción entre descripción y clasificación de los suelos

Una descripción completa brindará información detallada sobre la granulometría, plasticidad, color, características de la partícula, origen, ubicación estratigráfica y comportamiento del suelo observado de la muestra obtenida en la exploración, excepcionalmente se podrán encontrar dos suelos con idéntica descripción (J. Fortán Palestra, s.f.).

Por el otro lado, la clasificación de suelos los ubica dentro de unos pocos grupos, en base a características de granulometría y plasticidad determinadas sobre muestras alteradas. Estas características pocas veces reflejan la realidad del suelo, constituyendo sólo una guía de como se va a comportar dicho suelo cuando se le utilice como material de construcción, bajo diferentes estados de carga y de contenido de humedad.

Los sistemas de clasificación mas completo usados actualmente para obras de ingeniería, son:

- a) Sistema de clasificación AASHTO (obras horizontales).
- b) Sistema de clasificación SUCS (obras verticales).

Para propósito de este estudio se utilizará el sistema de clasificación unificado SUCS, porque es un sistema aplicado a estudios de suelos en obras verticales cuyas profundidades de exploración del suelo son mayores que las requeridas en el método AASTHO, y es precisamente lo que se realiza en este trabajo, caracterizar el sitio en profundidad.

3.1.3.3.2 Sistema Unificado de Clasificación de suelos (SUCS)

Este sistema fue presentado por A. Casagrande como una modificación y adaptación más general a su sistema de clasificación propuesto en 1942 para pistas de aterrizajes. Era un método rápido para identificar y agrupar los suelos para construcciones militares, y es el que también se utilizó en este trabajo (C. Crespo Villalaz, 1999).

Los suelos se dividen primeramente en dos clases; de granos gruesos y de granos finos. Los suelos de granos gruesos tienen más del 50% en peso de granos más grueso que 0.074 mm (tamiz N° 200). Estos suelos se representan por el símbolo G (grava), si mas de la mitad, en peso, de las partículas gruesas, son mas gruesas que 4.76 mm (tamiz N° 4) y por el símbolo S (arena) si mas de la mitad son mas finas. A la G o a la S le sigue una segunda letra que describe la graduación: W buena graduación y P mala graduación; los cuales dependen de Cu (coeficiente de uniformidad) y Cc (coeficiente de curvatura), así como M que contiene limo o limoso y C que contiene arcilla o arcilloso los cuales dependen del LL (limite liquido) y IP (índice de plasticidad).

Los suelos de grano fino (más de la mitad de finos pasan el tamiz 0.074 mm) se dividen en tres grupos: arcillas, limos y arcillas limosas y limos y arcillas orgánicas. Estos símbolos están seguidos por una segunda letra que denota el límite líquido o la compresibilidad relativa (plasticidad): L, límite líquido menor que 50 (baja plasticidad); H límite líquido que excede de 50 (alta plasticidad).

La grafica de plasticidad de Casagrande (ver fig. 13) es la base para la división de los suelos de grano fino, es también una ayuda para comparar diferentes suelos. Por ejemplo: las arcillas que tiene un origen geológico similar, estarán situadas generalmente en una banda estrecha paralela a la línea divisoria (llamada línea A) entre los suelos C, M y O. A los suelos que están en la línea límite, se les da a veces una clasificación dual como GW-GC. Debe añadirse a los símbolos una descripción que de información sobre la forma de los granos, la composición, el color, la macroestructura, y la resistencia o densidad del suelo en el terreno (G. B. Sowers y G. F. Sowers, 1990).

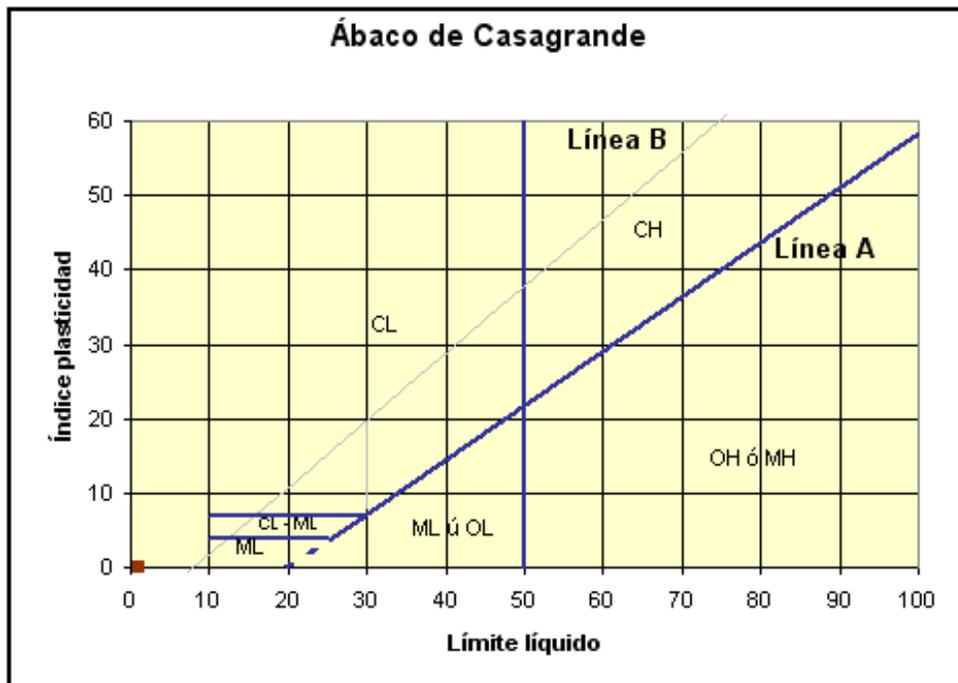


Fig. 13 Grafica de Plasticidad de Casagrande, Método SUCS.
Fuente: www.jordigonzalezboada.com.htm

Los diferentes símbolos que los representan y el criterio seguido en la clasificación están representados en una tabla para un mejor entendimiento, ver anexo I-7.

3.1.4 Evaluación Topografía

Las estaciones de monitoreo sísmico también pueden estar afectada por la topografía del sitio y la evaluación de la misma, es parte de la caracterización en este estudio; y de cualquier otro en donde se considere que esta podría afectar significativamente (A. Martínez P, C. Alvarado F, D. Ruviano V, O. Aníbal, s.f).

Los efectos de todas las condiciones locales, tales como, propiedades geológicas y dinámicas en el emplazamiento, topografía superficial, etc., se manifiestan en el movimiento sísmico registrado de formas distintas (S. Álvarez Rubio, 1999, p. 142-144):

- a) Se producen amplificaciones, desamplificaciones del movimiento sísmico.
- b) El contenido frecuencial se ve afectado.
- c) Varían los parámetros característicos del movimiento del suelo, como puede ser: las amplitudes máximas, la duración, etc.

En ciertas condiciones puede haber un comportamiento no lineal del suelo y una gran variabilidad del movimiento en lugares muy próximos entre sí. Los estudios relacionados con el efecto local debido a las irregularidades topográficas del terreno se han desarrollado posteriormente a los dedicados al estudio de la geología superficial.

Existen algunos resultados hasta la fecha que estiman, cualitativa y cuantitativamente, el efecto local de las irregularidades topográficas más interesantes que se pueden encontrar en la naturaleza, y los modelos utilizados que reflejan los accidentes del terreno se clasifican en (ver fig.14):

1. Topografía convexa: cualquier elevación sobre la superficie libre como dorsales y montañas.
2. Topografía cóncava: como valles y cañones.

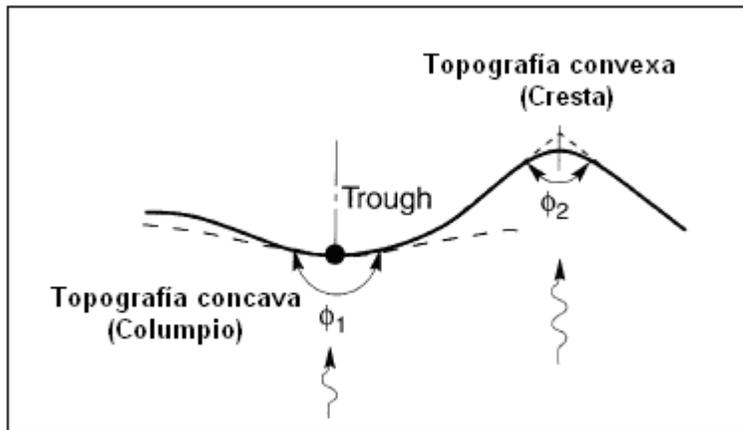


Fig. 14 Irregularidades topográficas. Fuente: S. L. Kramer, 1996, p.32

Existe evidencia de los efectos de estas irregularidades en la superficie. Se midió el incremento de la amplificación en una topografía convexa en Matsuzaki, Japón (Jibson, 1987) a través de los registros obtenidos en cinco terremotos; en el que se observó, como el pico de aceleración normalizado varió a lo largo de esta irregularidad y el porcentaje fue 2.5 veces de la aceleración en la base (S. L. Kramer, 1996, p. 320, traducido)

En la revisión que realizan Geli et al. (1988) y Bard (1995) sobre el estudio del efecto de la topografía, se resaltan algunos de los rasgos característicos que han sido analizados por distintos autores; estos son:

a) Se produce una amplificación del movimiento en las cimas de las montañas (en general, de las topografías convexas), y una desamplificación en el fondo de los valles, (en general las topografías cóncavas). Estas amplificaciones se ven afectadas por el tipo de onda, siendo mayor el efecto para las ondas S que para las ondas P. Es más, en general, cuando la componente horizontal del movimiento es perpendicular al eje de las dorsales, la amplificación es mayor

que en el caso de ser paralelo al mismo. Las amplificaciones son sensibles a la pendiente de la topografía en una relación directa.

b) Se observa que la máxima amplificación es sensible a la razón entre la semianchura y altura de la elevación; cuanto mayor es la pendiente mayor es la amplificación.

c) El fenómeno depende del contenido frecuencial de la onda, produciéndose las mayores amplificaciones para las longitudes de onda del movimiento comparables con las dimensiones horizontales de la topografía.

La presencia de irregularidad topográfica afecta, no solo al movimiento sobre la propia estructura, sino también a los alrededores de la misma. Es notable la importancia de caracterizar al sitio topográficamente.

Tomando en cuenta el estudio topográfico existente en todo el recinto universitario Rubén Darío de la UNAN - Managua en el que esta ubicada el área de estudio se determino que la misma no presenta estos tipo de irregularidades favoreciendo de esta manera a la ubicación del arreglo vertical.

CAPITULO 4

INSTRUMENTACION, TRABAJO DE CAMPO Y PROCESAMIENTO DE DATOS

La planeación de un estudio de cualquier índole esta basada en la disponibilidad de los recursos necesarios para su ejecución. La realización de este trabajo monográfico estuvo sujeta a la siguiente secuencia de actividades.

4.1 Perfiles de imágenes de resistividad eléctrica

4.1.1 Instrumentación

Para aplicar el método de perfiles de imágenes de resistividad eléctrica se utilizó la siguiente instrumentación:

1. Lund Imaging System
2. Electrodo
3. Cables multiconectores
4. Cinta métrica
5. Mazo de hule

Lund Imaging System es un sistema de multielectrodos para sondeos de resistividad en 2D y 3D con alta resolución (ver fig. 15), que consiste básicamente de:

Una unidad básica llamada ABEM Terrameter SAS 4000, la que integra un resistímetro, un amplificador de corriente y una computadora. Tiene la capacidad de tomar perfiles de imágenes de resistividad del subsuelo, que pueden ser controlados directamente con la computadora interna del equipo.

Dos unidades selectoras de electrodos ABEM ES464, que controlan la conexión y desconexión de las líneas de potencial y corriente, además activan los electrodos que van a funcionar.

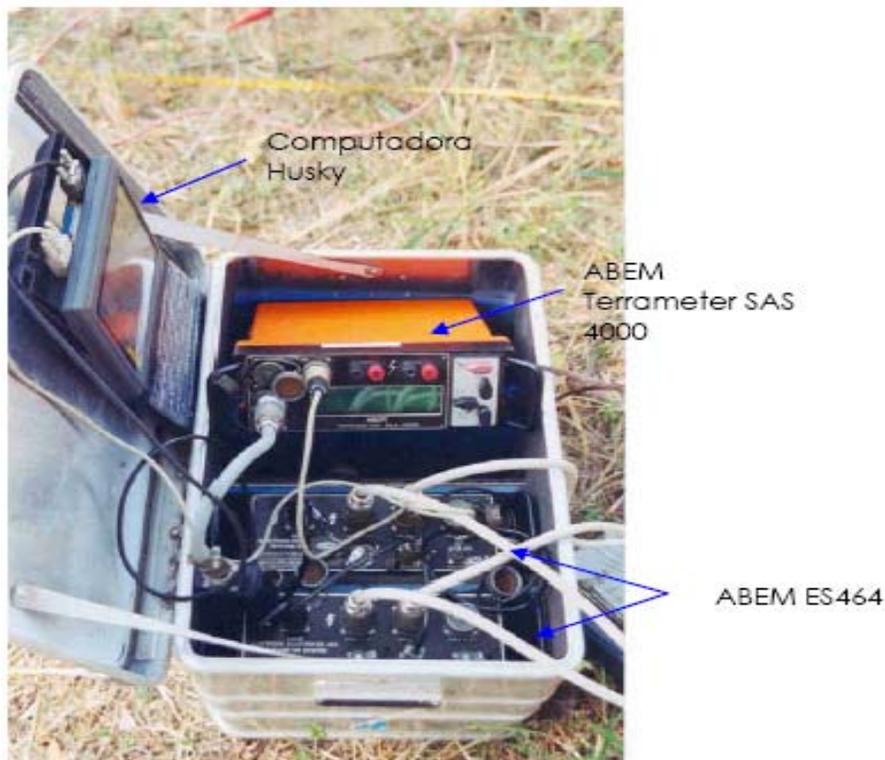


Fig. 15 Equipo Lund Imaging System

Se utilizan dos unidades para hacer las mediciones en cuatro canales, lo que quiere decir que hay cuatro canales de información transmitiendo datos a la computadora, un canal que envía información a los electrodos de corriente, activándolos, y tres canales que están midiendo las diferencias de potencial en tres pares de electrodos.

Cuatro cables multicapas con 21 tomas separadas cada 5 metros en las que se conectan los electrodos por medio de conectores. El total de electrodos con que se realiza la medición es de 81.

4.1.2 Trabajo de campo

Para realizar la medición, cuatro cables son colocados de forma alineada a un mismo tiempo por cada estación para hacer la medición. Una vez medidos los puntos de una estación el primer cable es removido y colocado de último para extender el perfil bidimensional. Esta operación puede ser repetida cuantas veces convenga hasta alcanzar la longitud deseada (ver fig. 16).

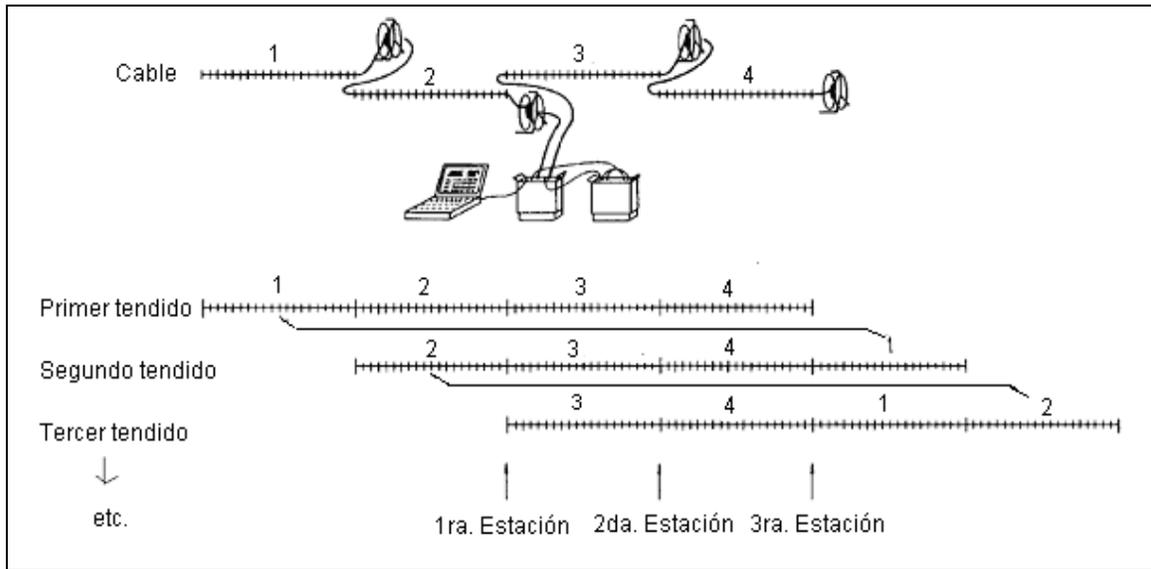


Fig.16 Esquema de la rutina de medición del sistema de imágenes de resistividad Lund, usando el arreglo llamado gradiente. Fuente: Proyecto “Levantamiento geofísico Sistema de intercepción de Aguas Residuales de la ciudad de Managua”, CIGEO.

In situ, las posiciones de los electrodos se miden con GPS (receptor de sistema de posicionamiento global) y con altímetro con el objeto de integrarlas en la interpretación de los resultados. La interpretación de los datos de resistividad es hecha mediante la aplicación del método de los mínimos cuadrados para construir un modelo que representa la distribución bidimensional de las resistividades eléctricas en el subsuelo. Este modelo denominado “Imagen de Resistividad Eléctrica” constituye la interpretación matemática de la medición de campo (también denominada “inversión” de los datos). Para esta interpretación matemática se utiliza el programa Res2Dinv (Loke 1997).

4.1.3 Procesamientos de datos

Los datos se procesaron usando un algoritmo (programa RES2DINV®.) que calcula valores de resistividad eléctrica con los cuales construye un modelo del subsuelo y los compara con los datos medidos. Éste está diseñado para invertir cantidades grandes de datos (hasta 6500 puntos) registrados por un sistema con numerosos electrodos (de 25 a 1800 electrodos). En este informe no se entrará en detalle sobre los métodos matemáticos que utiliza el programa para hacer la inversión, para mayor información se sugiere consultar los manuales de Geotomo Software (2001).

Se levantaron tres perfiles de aproximadamente 400 m, esta longitud se vio limitada por la disponibilidad de espacio, de igual forma se construyeron tres secciones eléctricas con las resistividades que corresponden a los diferentes materiales que integran el subsuelo, ver anexo II-1.

La aplicación del método de perfiles de imágenes de resistividad para este estudio tiene como objetivo determinar los estratos más consolidados o compactos a través de sus resistividades al paso de la corriente sinusoidal por ellos.

4.2 Perforación

Tomando en cuenta los resultados obtenidos en la aplicación de perfiles de imágenes de resistividades con el cual se alcanzó una profundidad de 60m se determinó perforar hasta los 100 m.

4.2.1 Instrumentación

El proyecto "Instalación de un Arreglo Vertical de Monitoreo Sísmico en la UNAN – Managua ", financió la perforación del pozo, la cual estuvo a cargo de la

Empresa de Sistemas de Abastecimiento de Agua, S.A. (ESAASA) quien utilizó un sistema percusión para su realización, quien además colocó la camisa del pozo e hizo la plataforma de concreto donde se colocó el acelerógrafo en superficie.

4.2.2 Trabajo de campo

Este consistió en la toma de muestras durante la perforación; se muestreo cada 5ft debido a la complejidad de tomar muestras a la profundidad de los 100m y porque el equipo de perforación estaba diseñado únicamente para perforaciones de pozos de abastecimiento de agua por lo cual no contaba con un muestreador de suelos.

Por cada 5 ft (1.5 m) de perforación se utilizaba agua para la fácil penetración del martillo, era un sistema a percusión, esto hacía que la muestra saliera fluida con la ayuda de un succionador (tubo que por la fuerza de gravedad caía dentro del pozo y tomaba la muestra correspondiente) y luego era depositada sobre una superficie limpia, previamente condicionada de donde se tomaba la muestra representativa de cada 5 ft, para su correspondiente análisis geológico y simultáneamente se ponía a secar bajo la luz solar para su posterior clasificación geotécnica (ver fig. 17)



Fig.17 Condición de la muestra al ser extraída

4.2.3 Procesamiento de datos y resultados

Esta etapa estuvo gobernada por la clasificación de las muestras tomadas de la perforación.

4.2.3.1 Clasificación geológica

Cada muestra fue analizada geológicamente para formar el perfil estratigráfico de la perforación. El análisis geológico fue realizado desde el punto de vista granulométrico debido a que no se pudieron ver los estratos en estado natural y estuvo a cargo de los ingenieros geólogos Denis Avellán y Francisco Espinoza.

Cada muestra salía alterada o fluida por la cantidad de agua utilizada por cada 5 ft de perforación, por lo que era difícil hacer un levantamiento directamente de del perfil, pero aun así, se utilizó el concepto de depósito dentro de la clasificación porque es muy razonable suponer que los estratos en su estado natural son depósitos consolidados, de lo contrario en el área se produjeran asentamientos diferenciales y no los existieran edificios que actualmente se ven. El análisis granulométrico en geología consistió en la determinación del tamaño de las partículas de cada muestra; entre los tamaños encontrados están:

- a) Lapilli, fragmentos piroclásticos (producto de erupciones volcánicas ricas en agua o freatomagmaticos) cuyas dimensiones oscilan entre 2 – 70 mm.

- b) Ceniza, generalmente denominado por fragmentos rotos de vidrio pero con cantidades variables de cristales y líticos rotos cuyas dimensiones están por debajo de los 2 mm. (> 2 mm).

También se hizo una clasificación granulométrica no volcánica según Udden – Wentworth (ver anexo II-2) por lo que se usaron términos como arena, limo y arcilla. Estos términos se usan cuando no es posible observar el depósito en

estado natural. También se tomo en cuenta la columna estratigráfica generalizada de Managua propuesta por Rodríguez y Montenegro (2002), debido a la profundidad de perforación (ver anexo II-3).

4.2.3.2 Clasificación geotécnica

Las muestras obtenidas fueron agrupadas de acuerdo al color (usando el cuadro de colores de Munsell según la norma ASTM 2488 - 75) y tacto. Para esto se tendieron en bolsa plásticas para tener una mejor visualización de ellas (ver fig. 18).



Fig. 18 Muestras tendidas sobre bolsas plásticas para una mejor clasificación visual.

A estas se le realizaron los siguientes ensayos en el laboratorio de geotecnia, con el propósito de identificar y clasificar según el sistema unificado de suelos SUSC, ASTM D 2487 – 00 (Annual Book of ASTM Standard, 2001):

Descripción -----	Designación
Granulometría	ASTM D 422 – 63 (1988)
Limites de Atterberg	ASTM D 4318 – 00
Peso Unitario	ASTM C 29/C 29M-97

La granulometría se realizó vía húmeda (por lavado) por el alto contenido de finos en la muestra, cada muestra se pesó antes y después del lavado (secada al horno primeramente), posteriormente se tamizó cada muestra y los pesos retenidos fueron registrados para su posterior análisis granulométrico; simultáneamente se realizaron los límites de consistencia que en conjunto con la granulometría permitirían clasificar a cada muestra.

Para la determinación de los límites de consistencia se usó el método B de la designación, basado en que para el límite líquido el número de golpes necesarios para cerrar 13mm (1/2 plg.) de la muestra que está en la copa debe estar entre 20 y 30 golpes; de lo contrario repetir el procedimiento. Un número de golpes por debajo de los 20 indica que la muestra está muy húmeda y por encima de los 30 golpes indica que la muestra está muy seca; luego cada valor debe ser multiplicado por un factor de corrección (ver tabla 2).

Numero de golpes (N)	Factor de corrección (K)
20	0.973
21	0.979
22	0.985
23	0.990
24	0.995
25	1.000
26	1.005
27	1.009
28	1.014
29	1.018
30	1.022

Tabla 2. Factor de corrección para obtener el límite líquido

Los pesos retenidos en cada tamiz fueron graficados en la curva granulométrica, así como los límites vs índice de plasticidad de cada muestra para obtener la clasificación (ver anexo II-4).

El Peso Unitario o Densidad de cada muestra se determino acuerdo al segundo método de la norma, percusión. Consiste en llenar el recipiente de volumen conocido (V) en tres capas aproximadamente iguales. Cada capa se compacta colocando el recipiente con el agregado sobre un piso firme (un piso de concreto), se inclina hasta que el borde opuesto a la base de apoyo diste unos 5 cm del piso, para luego dejarlo caer en forma tal que dé un golpe seco.

Mediante este procedimiento, las partículas del agregado se acomodan de modo compacto. Cada capa se compacta, dejando caer el recipiente 50 veces en la forma descrita, 25 veces cada extremo. El agregado sobrante se elimina con una regla, luego se determina el peso del recipiente de medida más su contenido (G) y el peso del recipiente (T) y se registran los pesos con una precisión de 0,05 kg (0,1 lb). Entonces el peso unitario o densidad se obtiene restando G y T, el resultado se divide entre V con unidades de kg/m^3 o lb/p^3 .

4.3 Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW)

4.3.1 Instrumentación

Para aplicar el método de análisis multicanal de ondas superficiales se utilizó la siguiente instrumentación (ver fig. 19):

- Computador portátil
- Sismógrafo
- Geófonos verticales de 4.5 Hz
- Cable multiconector
- Mazo de 10 y 20 libras
- Plato metálico
- Cinta métrica

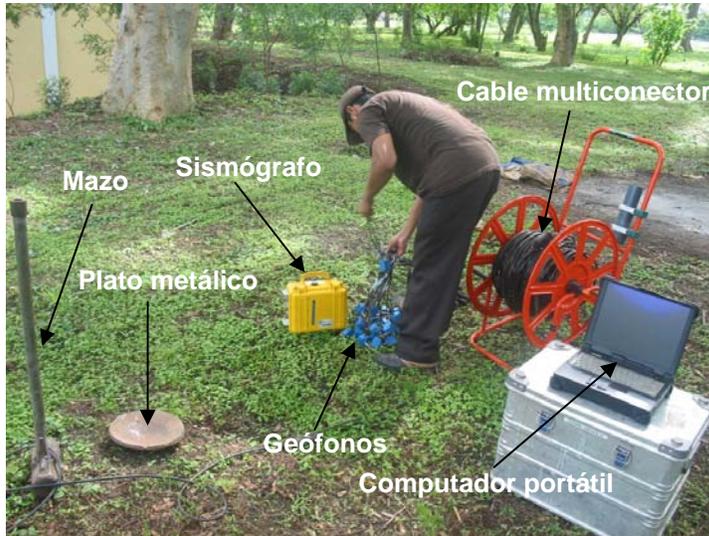


Fig.19 Instrumentación utilizada en el método MASW

4.3.2 Trabajo de campo

Para realizar la adquisición de los datos se tendió el cable multiconector lo mas alineado posible y los geófonos fueron ubicado sobre el tendido del mismo (ver fig. 20b), con una separación de 2 m entre ellos, el cable se conecto al sismógrafo en uno de sus extremos a la misma vez, en donde también se conecto el computador portátil que serviría para descargar instantáneamente los datos registrados por el mismo (ver fig. 20a).



Fig. 20 a) Adquisición de registros MASW activo. b) Línea de geófonos de 46 m de longitud.

Para el presente estudio fue de vital importancia usar el esquema del WalkAway ya que este arreglo permite la obtención de registros en bajas frecuencias o longitud de ondas más largas lo cual condiciona la profundidad deseada, en este caso superior a los 50 metros de profundidad. Por lo cual se decidió usar una separación de geófonos de 2.0 metros y disparos una distancia inicial igual a la separación entre recibidores, posteriormente se hicieron tres disparos mas a intervalos de 48 metros hasta construir un registro de 96 trazas en total.

In situ, las posiciones del primer y último geófono se miden con GPS (receptor de sistema de posicionamiento global), para su representación en un mapa de ubicación (ver anexo II-1).

4.3.3 Procesamiento de datos

Los datos adquiridos fueron procesados en el software SurfSies 1.5 (desarrollado por Kansas Geological Survey). Este software es usado para generar perfiles de velocidad de ondas cortantes en 2D versus profundidad de la línea de prueba en superficie a través de los procedimientos correspondientes a los registros multicanales obtenidos en el campo.

Los pasos necesarios para el procesamiento de los datos en SurfSeis 1.5, son los siguientes:

- a) El formato: los datos adquiridos fueron cambiados del formato SEG-2 al formato KGS.
- b) Geometría de campo: a los datos del paso anterior se le asigna la geometría del tendido aplicada en el campo para la toma de los registros (ver fig. 21).

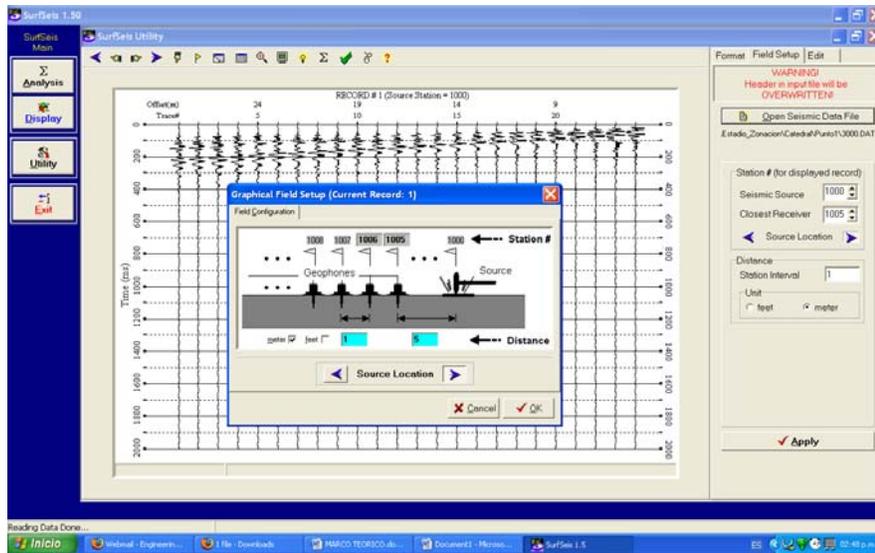


Fig.21 Introducción de la geometría de campo

- c) Pre-procesamiento de registros para eliminar efectos de fuentes externas y definir mejor el modo fundamental de las ondas de superficie (ver fig. 22).

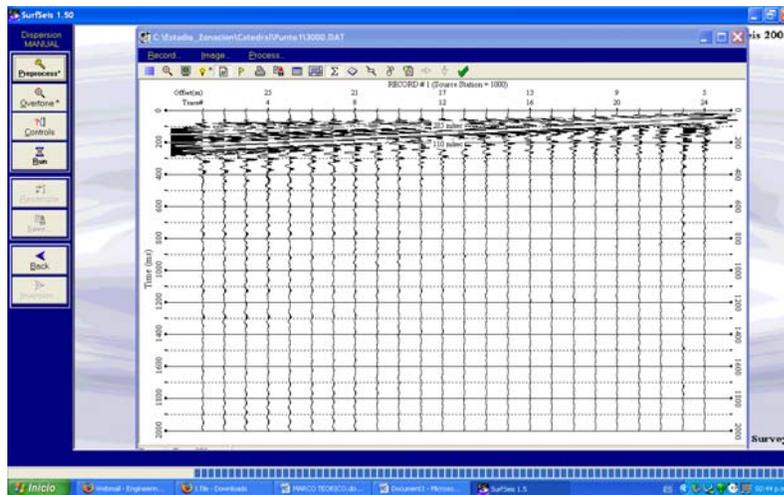


Fig. 22 Pre-procesamiento de datos crudos

Este paso incluye la corrección de los registros con la opción *Mute* la cual permite eliminar el efecto de las ondas de cuerpo a la hora de determinar la imagen de dispersión (ver fig. 23a).

Así mismo se le aplico un filtrado “Band pass” (ver fig. 23b) con el fin de aislar las frecuencias de interés en este caso de 5-50Hz.

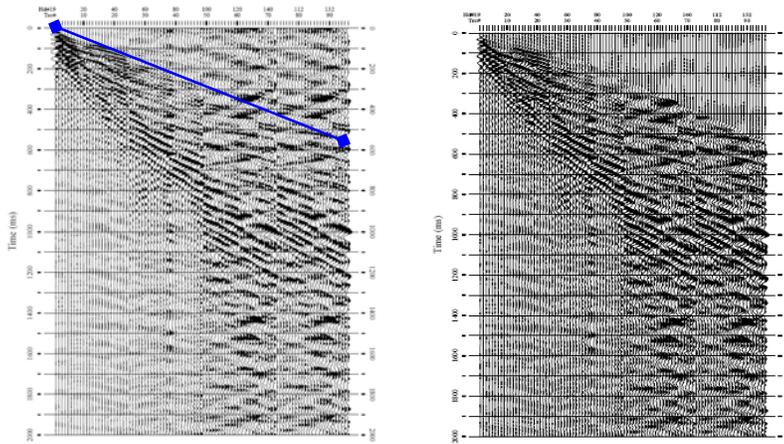


Fig.23 a) Registro WalkAway sin corregir b) registro pre-procesado.

- d) Generación de imagen de dispersión para la identificación y extracción de curva de dispersión (Modo fundamental). El análisis dispersión muestra características multimodales lo cual indica el nivel de sensibilidad del método (ver fig. 24). La identificación de las características de los estratos de suelos son extraídos a partir del modo fundamental.

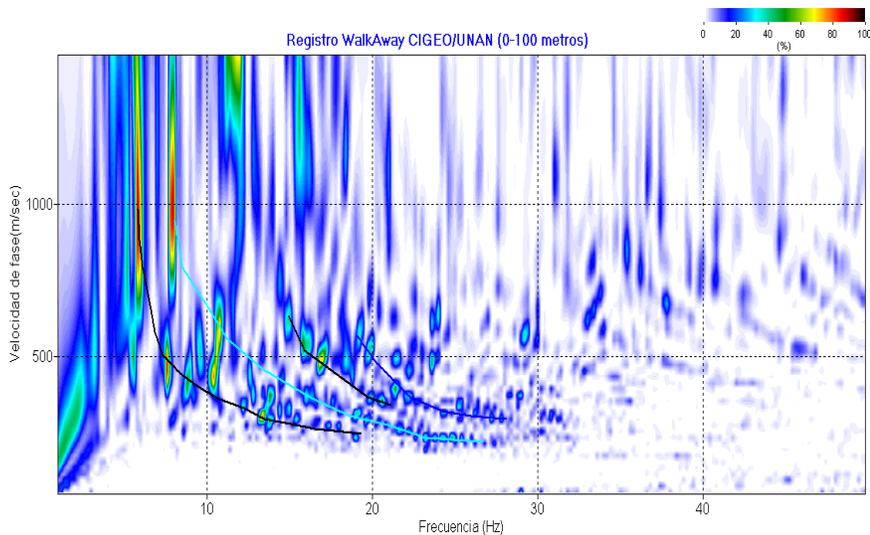


Fig.24 Análisis de dispersión

- e) A la imagen obtenida en el análisis de dispersión correspondiente al modo fundamental de vibración del subsuelo se le obtiene la curva de dispersión (ver fig. 25).

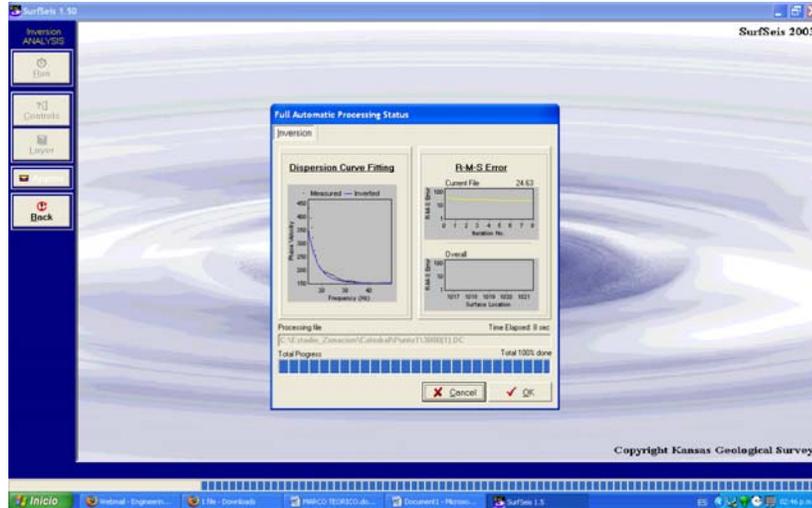


Fig.25 Curva de dispersión, como resultado del análisis de dispersión.

- f) Finalmente la curva de dispersión se invierte para la obtención del perfil de velocidad en 2D de ondas cortantes *versus* profundidad (ver fig. 26). La inversión de múltiples curvas de dispersión de un sitio da el perfil en 2D del sitio que representa la velocidad de ondas cortantes y la profundidad a lo largo de la línea de prueba.

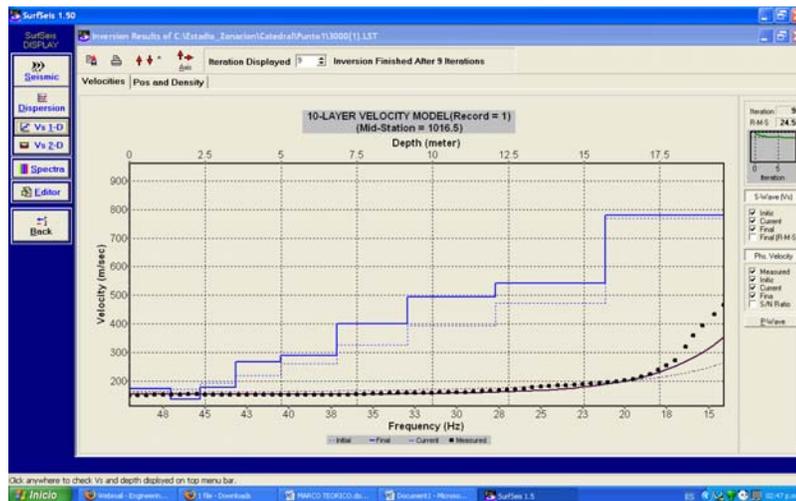


Fig. 26 Ejemplo del Modelo de velocidad (V_s) en 2D

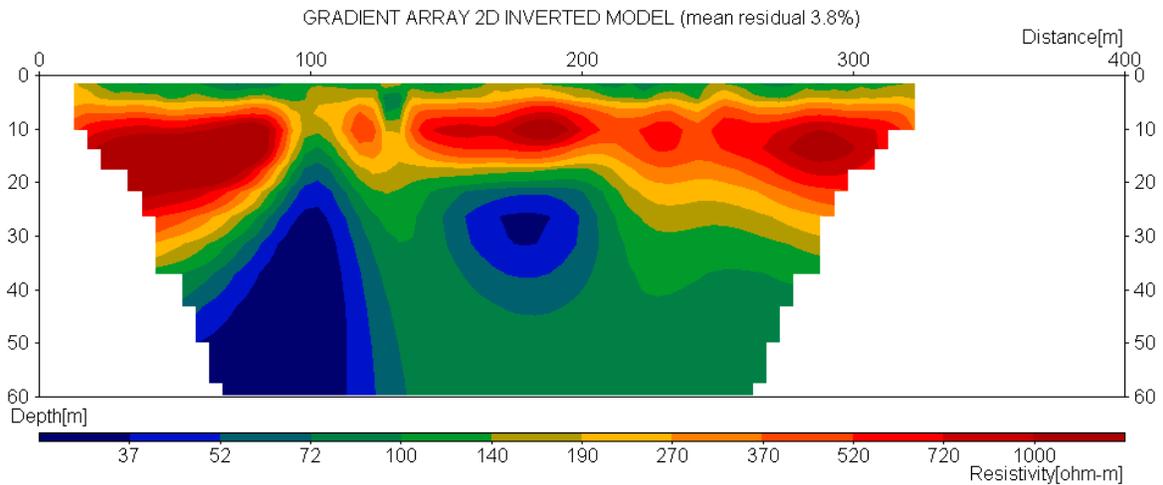
CAPITULO 5

ANALISIS DE RESULTADOS

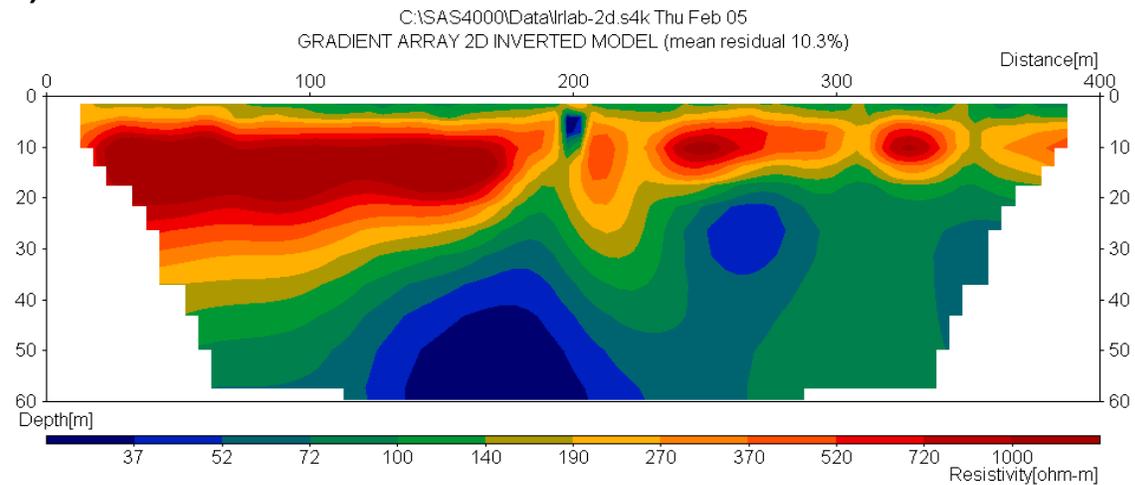
5.1 Perfiles de imágenes de resistividad

Como resultado de la aplicación de este método, se obtuvieron tres perfiles de imágenes de resistividad, ver figuras (A, B, C).

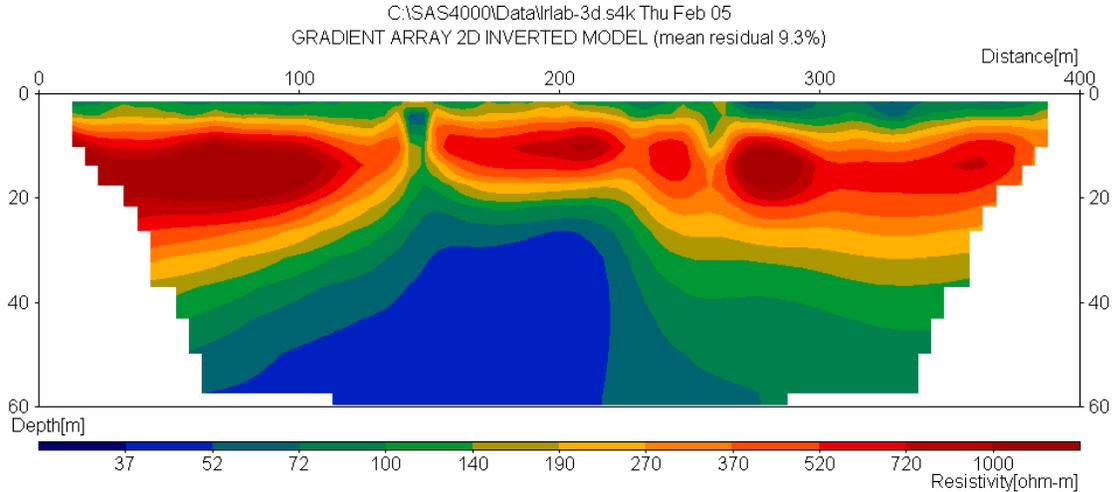
A) Dirección Oeste - Este



B) Dirección Noreste



C) Dirección Noroeste



Las profundidades alcanzadas con los perfiles de imágenes resistividades alcanzaron los 60 m.

Desde el punto de vista de resistividades en los tres perfiles se pueden observar 11 unidades, las unidades mas superficiales con resistividades entre 72 y 270 Ωm y espesores de aproximadamente 7m, estas resistividades se le atribuyen a materiales blandos pocos compactos y considerablemente seco, seguidamente unidades con altas resistividades entre 270 y 1000 Ωm y profundidades comprendida entre 7 – 25 m aproximadamente, atribuidos a materiales muy densos, compactos y relativamente seco, por debajo de los 25 m hasta los 60 m aproximadamente, el material presenta resistividades mas bajas que varian entre aproximadamente 52 Ωm , 72 Ωm y 100 Ωm en ciertos puntos del perfil, esto se debe a la existencia de un material poroso lo cual fue una indicación a priori de que a esta profundidad no se podía instalar el Hyposensor.

La porosidad es una propiedad que disminuye la resistividad por el espacio que existe entre los granos y por el contrario aumenta la conductividad, es muy difícil atribuir esta disminución de resistividad a que el material es relativamente menos consolidado y compacto, porque a esta profundidad existe una presión grande que ejercen las capas más jóvenes sobre la más antigua muy considerable.

Los valores de resistividades pueden ser explicados con el perfil estratigráfico encontrado con geotécnica porque el mismo está basado en una clasificación granulométrica lo cual permite explicar los valores de resistividades encontrada según la teoría antes mencionada.

En los primeros 7 m los valores de resistividades corresponden a arena limosas, y estos van ascendiendo porque la distribución de los granos (porcentajes) de arenas con respecto a los limos tienen buena distribución lo cual permite una mejor acomodamiento de las partículas reduciendo los poros.

El aumento repentino y alto de los valores de resistividades en los siguientes 18 m (7 m – 25 m) para el mismo material se debe a la presencia de un mayor porcentaje de material fino que reduce aun más el espacio entre las partículas.

La disminución gradual de las resistividades de los 25 m a 60 m se debe quizás a la humedad, el porcentaje de arena gruesa disminuye, poca presencia de grava y hay buena distribución de los porcentajes de arena media, arena fina y limos.

La resistividad de la roca u otro material compacto o bien consolidado no depende solo de su litología, sino que también su capacidad de alojar en sus poros soluciones salinas que favorezcan la conducción eléctrica a través de iones en solución. Para esto resultan factores importantes como porosidad, salinidad de las soluciones, compactación, y variables del ambiente como presión y temperatura.

5.2 Perforación

Los resultados obtenidos de las muestra tomadas durante la perforación son los siguientes.

5.2.1 Estudio Geológico

El estudio geológico únicamente consistió en la descripción de la columna estratigráfica del área de estudio, la misma esta compuesta principalmente por un suelo moderno en la parte superior, a este le subyace materiales aluviales y tefra, también se puede encontrar muchos depósitos de ceniza a lo largo de la columna, así como suelos limosos, limo – arenosos y arenoso, todos ellos con variaciones de colores productos de los agentes físicos y químicos que han actuado sobre ellos (ver también anexo II-5).

Los materiales que componen la columna encontrada son muy característicos para el área de Managua, son materiales piroclásticos productos de la diferentes aportaciones que le han dado las erupciones volcánicas ocurridas en tiempos pasados y se encuentran como rellenos debido a las condiciones geomorfológica de Managua, esta se encuentra en el graven o depresión de Nicaragua.

Haciendo una correlación con el perfil de resistividad a los 60 m, evidentemente existe un material poroso, suelo limo – arenoso con un bajo contenido de grava, el resultado presentado en la parte del estudio geológico es una breve descripción basado en el concepto de caracterización antes mencionado.

5.2.2 Estudio Geotécnico

Aplicando el sistema unificado de suelos SUCS, se pudo determinar que la columna estratigráfica esta compuesta por limos inorgánicos con alto porcentaje de arena entre 41 y 44%, también se encontró casi en toda la columna arena con altos contenido de limos (arena limosa) entre 22 y 49 %, el porcentaje de

grava encontrado vario entre 1 y 10% tanto para limos como para arena, existe casi uniformidad en la existencia de arenas y limos - en cuanto a porcentaje se refiere - en toda la columna estratigráfica encontrada (ver también anexo II-6).

Existe correspondencia con los perfiles de resistividades a los 60 m, a esta profundidad se encontró arena limosa con grava, de igual forma tiene correspondencia con la descripción geológica a los 60 m, en donde se encontró suelo limoso - arenoso con grava, la ligera diferencia que se da entre las dos descripciones radica en la metodología de identificación utilizada, para la descripción geológica se usaron los sentidos del tacto, la vista y experiencia de ingenieros geólogos que colaboraron en esta parte y en la descripción geotécnica se utilizaron equipos y técnicas normalizadas por ASTM.

También se puede ver la correspondencia que existe con los sondes de SPT realizados cerca del área cuyas profundidades alcanzadas variaron de 7 a 10 m aproximadamente, suelos compuesto predominantemente por arenas con mezcla de limos y gravas variando en el contenido de arcillas, esta ligera diferencia se le atribuye al sistema de muestreo aplicado en la perforación. Esta comparación se hace a partir de los 5m de profundidad de cada sondeo aproximadamente debido a la diferencias de elevaciones entre la perforación que tiene 174 m sobre el nivel del mar y los sondeos cuyas elevaciones varían entre los 167 m y 170 m sobre el mismo nivel de referencia.

5.3 Análisis multicanal de ondas superficiales

Según los resultados en la figura (27) se puede ver que la profundidad alcanzada fue aproximadamente 95 m en donde se identifican 10 unidades de suelos desde el punto de vista de velocidades de ondas cortantes, es notable el incremento de las velocidades con la profundidad lo cual es muy común hipotéticamente, excepto en los primero 6m en donde se da una disminución de la misma a partir de los 2.5m hasta los 6m lo cual también es común para los

estratos mas superficiales porque están relativamente menos consolidados, geológicamente corresponden a material aluvial con alto contenido de limo y fragmentos líticos de diferentes composiciones y a un deposito de ceniza volcánica alterada con fragmentos líticos de la misma composición, y geotécnicamente corresponden a arenas limosas.

De acuerdo a la clasificación del nuevo Reglamento Nacional de la Construcción (2007) o NHERP (ver tabla 1), los primeros 6 m correspondes a tipos de suelos E y D, luego de los 6 m a los 44 m se encuentra un tipo de suelo C y finalmente de los 44 m hasta los 95 m aproximadamente el tipo de suelos es B.

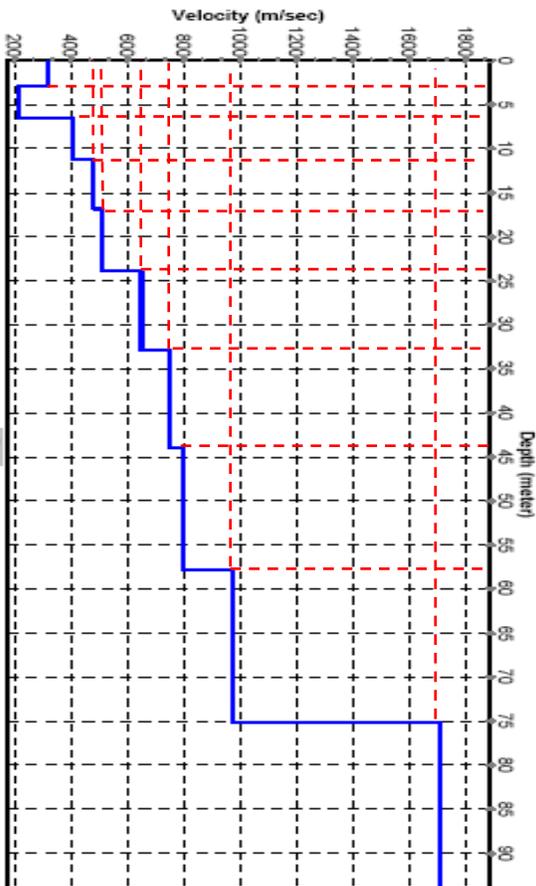


Fig. 27 Modelo de Vs obtenido en el área de estudio

La determinación de este parámetro dinámico resulta muy compleja para los diferentes métodos de campos y laboratorio que existen y considerando que este

es un método indirecto Obando E. comparó el perfil de velocidad obtenido con un estudio de vibración ambiental utilizando la técnica de Nakamura en la misma área de estudio (en preparación para publicación).

Para obtener un modelo más aproximado del terreno en la zona de estudio se comparó el modo fundamental de vibración o frecuencia a partir de los registros obtenidos con ruido ambiental (ver fig. 28) y la frecuencia de vibración calculada a partir del modelo de Vs estimado con el MASW.

La técnica de Nakamura da como resultado el modo fundamental de vibración o frecuencia de vibración del subsuelo cuya profundidad depende del máximo contraste entre los estratos, y de acuerdo al perfil de velocidad obtenido (ver fig. 28) se observa a los 33 m en donde se da un cambio de velocidad de 650 m/s a 760 m/s aproximadamente.

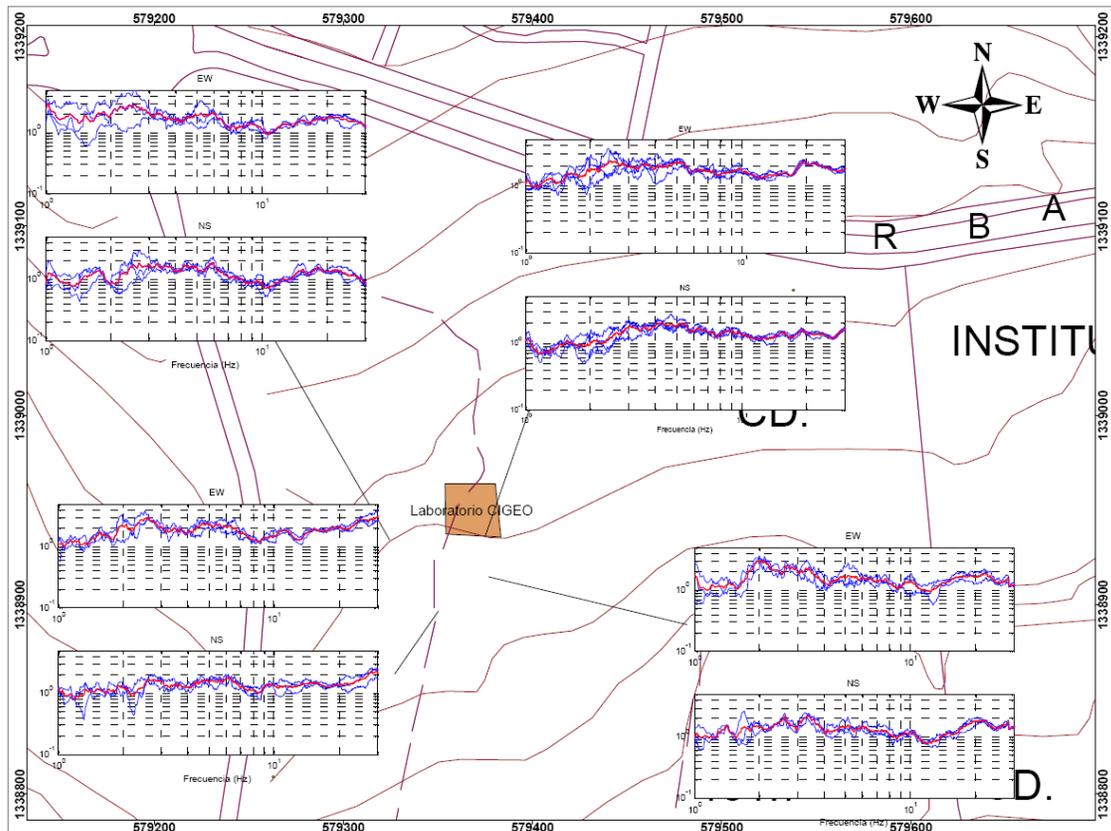


Fig. 28 Registros de vibración ambiental realizados en el área de estudio

Con estos registros el subsuelo suelo vibra aproximadamente por 2.7Hz o 0.37 segundos según la función característica de vibración (ver fig. 29).

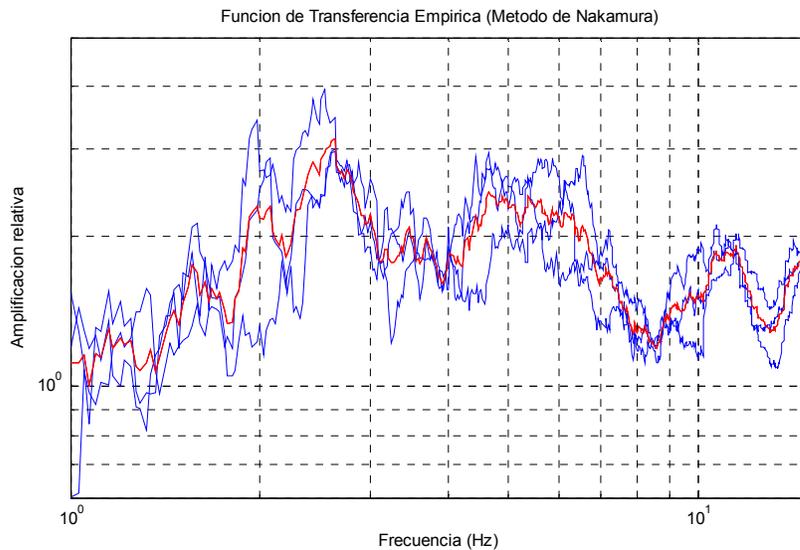


Fig. 29 Función (empírica) característica de vibración del área de estudio (Obando E.)

Según Obando E. partiendo del perfil de Vs obtenido con MASW se puede delinear los estratos más prominentes de manera que se puede deducir un modelo de estratos promedios (ver fig. 30). Las líneas en rojo denotan los límites de estratos más sobresalientes dentro del modelo.

Y haciendo algunos ajustes a velocidades promedios y espesores se puede definir un modelo basado en la mejor envolvente obtenida (Teoría de multireflexion). Por lo tanto del modelo de velocidades inicial resulta la siguiente envolvente (ver fig. 31), en donde se demuestra que el perfil de Vs estimado con el MASW está en concordancia con la función de vibración característica para la zona de estudio.

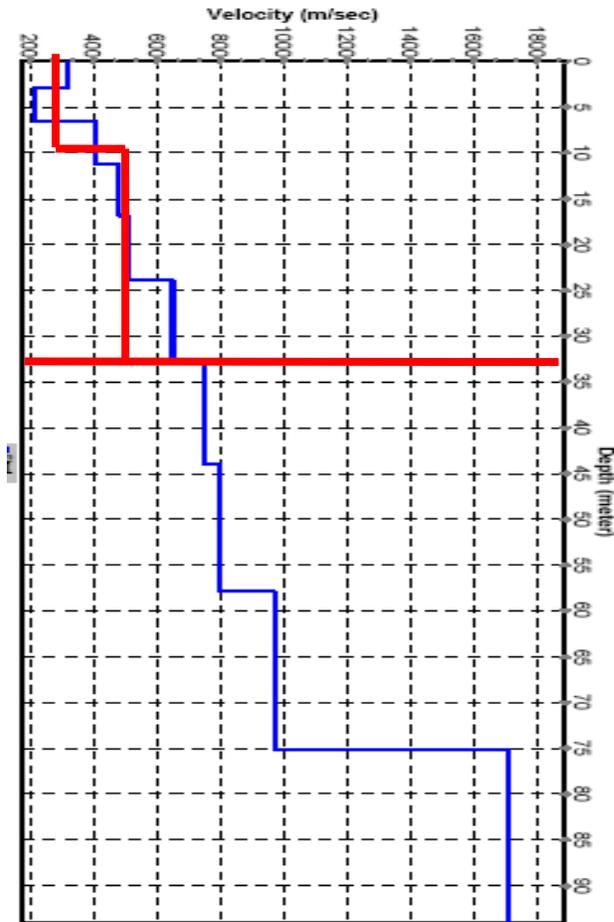


Fig.30 Modelo de velocidad utilizado para calcular la función de de frecuencia.

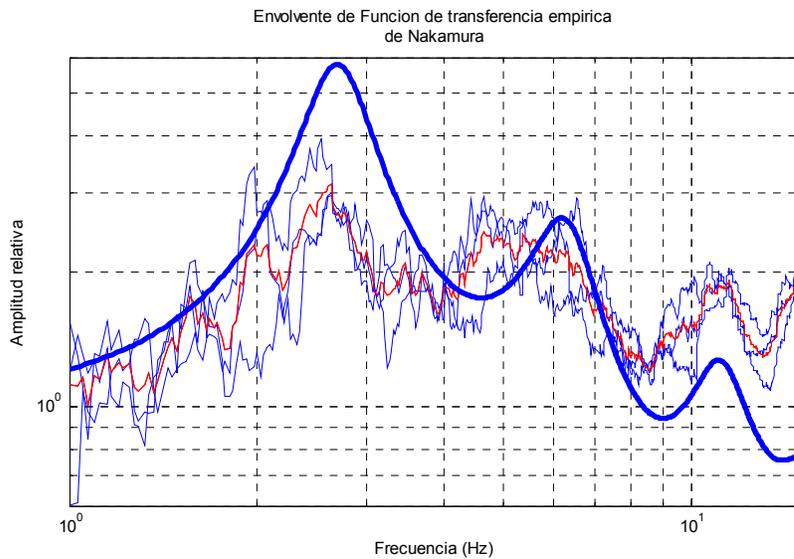


Fig.31 Función de vibración obtenida con la técnica de NaKamura y función de vibración obtenida a partir del perfil de velocidad con el método MASW (Azul gruesa).

CAPITULO 6

MODELAMIENTO TEORICO

Uno de los problemas mas importante que se puede encontrar en la ingeniería geotécnica de terremoto es la evaluación de la respuesta de sitio al movimiento sísmico, esto es útil para predecir el movimiento en superficie y así diseñar espectros de respuesta y determinar las fuerzas inducidas por un terremoto que pueden llevar a la inestabilidad de las estructuras (S. L. Kramer 1996, Pág. 254).

Una condición ideal para hacer un análisis completo de la respuesta de sitio sería un modelo de mecanismo de ruptura en la fuente de un sismo; la propagación de las ondas a través del subsuelo bajo un sitio particular desde el “basamento” hasta la superficie determinaría como el movimiento esta influenciado por el suelo que descansa sobre el basamento rocoso, pero esto es muy complicado.

Esta influencia ha sido reconocida por muchos años, desde 1920 sismologo y más recientemente ingenieros geotécnicos de terremotos han trabajado en el desarrollo de métodos cuantitativo para predecir la influencia de las condiciones locales de un sitio en grandes movimientos sísmicos, estos métodos están agrupados de acuerdo al dimensionamiento del problema y direcciones de análisis, el modelamiento teórico de respuesta de sitio realizado en este estudio esta basado en el análisis en una dimensión a través del software SHAKE2000.

6.1 Análisis de respuesta sísmica del subsuelo en una dimensión.

Esta teoría considera la respuesta asociada con la propagación vertical de las ondas cortantes a través de un sistema lineal visco elástico. El sistema consiste de N capas horizontales que se extienden infinitamente en la dirección horizontal y tiene como estrato limite en la dirección vertical el semiespacio.

Cada capa es homogénea e isotrópica y esta caracterizada por un espesor h , densidad de masa ρ , modulo cortante G y modulo de amortiguamiento β . Bajo esta misma teoría funciona shake2000 cuyo modelo matemático (algoritmo) se detalla en la sección siguiente.

6.2 Modelo matemático usado por SHAKE2000.

La propagación vertical de onda S a través de un medio viscoelástico podría causar desplazamiento solo en la dirección vertical:

$$u = u(z, t) \quad (1)$$

Considerando que el recorrido de las ondas SH al aproximarse a la superficie, se propaga en dirección vertical a partir de un punto de referencia para el análisis (ver fig. 32).

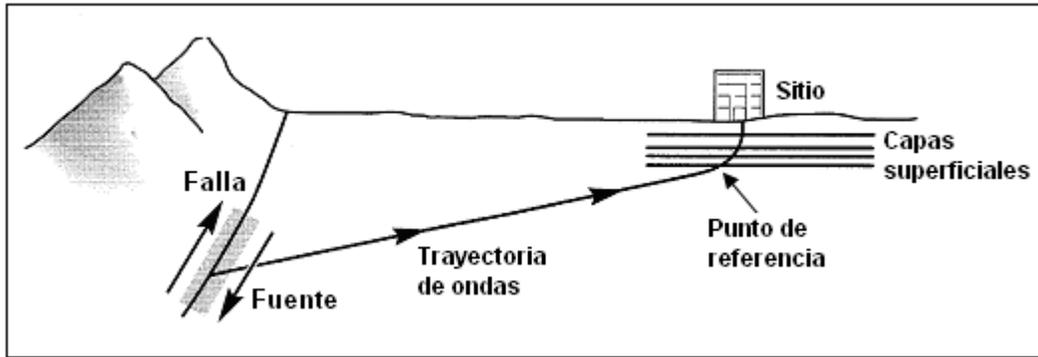


Fig. 32 Proceso de refracción que produce la propagación de ondas casi verticales cerca de la superficie. Fuente: L. Kramer Steven, 1996, p.255

Este desplazamiento debería satisfacer la ecuación de onda,

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} \quad (2)$$

El desplazamiento armónico con la frecuencia angular w puede ser escrito de la siguiente forma:

$$u(z, t) = U(z) e^{iwt} \quad (3)$$

Sustituyendo la ecuación (3) en la ecuación (2), resulta una ecuación diferencial

ordinaria:

$$(G + iw\eta) \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \rho w^2 U \quad (4)$$

Lo cual tiene la solución general:

$$U(z) = Ee^{ikz} + Fe^{-ikz} \quad (5)$$

De lo cual se obtiene $k^2 = \frac{\rho w^2}{G + iw\eta} = \frac{\rho w^2}{G^*}$ (6)

Donde k es el numero de onda compleja y G^* es el modulo cortante complejo. El porcentaje de amortiguamiento critico β , esta relacionado con la viscosidad η por: $w\eta = 2G\beta$

Los experimentos sobre muchos materiales de suelo indican que la G y β son casi constantes sobre el rango de frecuencia que es del interés principal en el análisis. Por lo tanto es conveniente expresar el modulo cortante complejo en términos del porcentaje de amortiguamiento crítico en vez de la viscosidad:

$$G^* = G + iw\eta = G(1 + 2i\beta) \quad (7)$$

Donde G^* se puede asumir por ser independiente de la frecuencia. La ecuación (3) y (5) dan la solución de la ecuación de la onda para un movimiento harmónico con frecuencia w .

$$u(z, t) = Ee^{i(kz+wt)} + Fe^{-i(kz-wt)} \quad (8)$$

Donde el primer termino representa las ondas incidentes y el segundo termino las ondas reflejadas. La ecuación (8) es valida para cada una de las capas, introduciendo un sistema de coordenadas locales Z para cada capa (ver fig. 33), los desplazamientos en la parte superior y en el fondo de la capa m son:

$$u_m(Z = 0) = (E_m + F_m) e^{iwt} \quad (9)$$

$$u_m(Z = h_m) = (E_m e^{ik_m h_m} + F_m e^{-ik_m h_m}) e^{iwt} \quad (10)$$

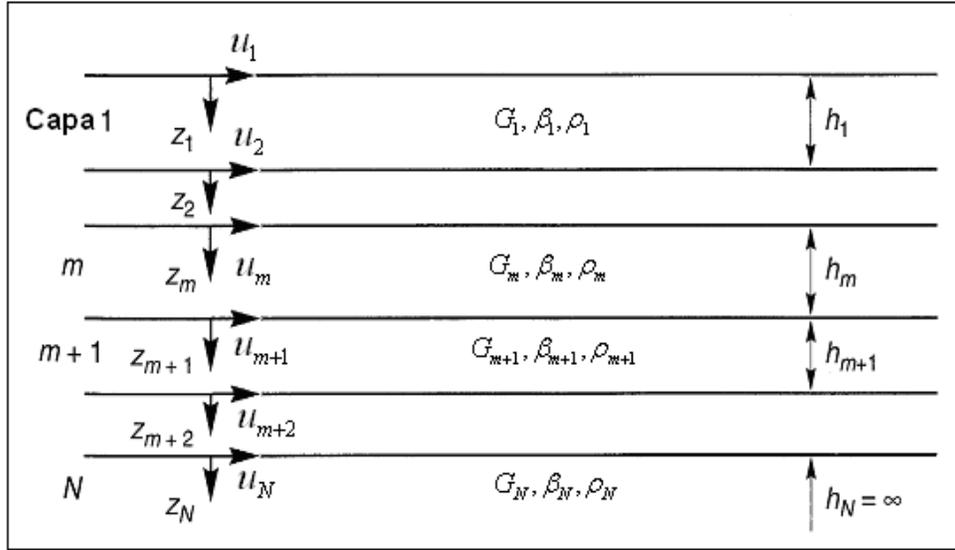


Fig. 33 Distribuciones de las capas para el análisis en una dimensión. Fuente: L. Kramer Steven, 1996, p.268

El esfuerzo cortante en el plano horizontal es:

$$\tau(z,t) = G \frac{\partial u}{\partial z} + \eta \frac{\partial u}{\partial z \partial t} = G^* \frac{\partial u}{\partial z} \quad (11)$$

O por la ecuación (8).
$$\tau(z,t) = ikG^* (Ee^{ikz} - Fe^{-ikz}) e^{i\omega t} \quad (12)$$

Y los esfuerzos cortantes en la parte superior y en el fondo respectivamente para capa m son:

$$\tau_m(Z=0) = ik_m G_m^* (E_m - F_m) e^{i\omega t} \quad (13)$$

$$\tau_m(Z=h_m) = ik_m G_m^* (E e^{ik_m h_m} - F e^{-ik_m h_m}) e^{i\omega t} \quad (14)$$

Los esfuerzos y los desplazamientos deben de ser continuo en toda las interfaces. Por las ecuaciones (9), (10), (13) y (14):

$$E_{m+1} + F_{m+1} = E_m e^{ik_m h_m} + F_m e^{-ik_m h_m} \quad (15)$$

$$E_{m+1} - F_{m+1} = \frac{k_m G_m^*}{K_{m+1} G_{m+1}^*} (E_m e^{ik_m h_m} - F_m e^{-ik_m h_m}) \quad (16)$$

La sustracción y adición de las ecuaciones (15) y (16) producen las siguientes formulas de recursion para amplitudes, E_{m+1} y F_{m+1} de la onda incidente y reflejada en la capa $m + 1$ expresada en términos de las amplitudes en la capa m :

$$E_{m+1} = \frac{1}{2} E_m (1 + \alpha_m) e^{ik_m h_m} + \frac{1}{2} F_m (1 - \alpha_m) e^{-ik_m h_m} \quad (17)$$

$$F_{m+1} = \frac{1}{2} E_m (1 - \alpha_m) e^{ik_m h_m} + \frac{1}{2} F_m (1 + \alpha_m) e^{-ik_m h_m} \quad (18)$$

Donde α_m es el porcentaje de impedancia compleja,

$$\alpha_m = \frac{k_m G_m^*}{k_{m+1} G_{m+1}^*} = \left(\frac{\rho_m G_m^*}{\rho_{m+1} G_{m+1}^*} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (19)$$

Y también es independiente de la frecuencia, en la superficie libre el esfuerzo cortante debe ser cero, además la ecuación (12), con τ_1 y X_1 igual a cero da como resultado $E_1 = F_1$, las amplitudes de las ondas incidentes y reflejadas siempre son iguales en la superficie. Iniciando con la capa superficial, el uso repetido de las formulas de recursion (17) y (18), permiten las siguientes relaciones de amplitudes entre la capa m y aquellas capas en la superficie:

$$E_m = e_m(w) E_1 \quad (20)$$

$$F_m = f_m(w) E_1 \quad (21)$$

Las funciones de transferencia e_m y f_m son simplemente las amplitudes para el caso $E_1 = F_1 = 1$, y pueden ser determinada sustituyendo esta condición en las formulas de recursion.

6.3 Parámetros de entrada

Los mínimos parámetros de entrada requerido por SHAKE2000 son:

6.3.1 Tipo de material y espesor

El perfil estratigráfico, así como el espesor de cada estrato son muy importantes para el modelamiento, permite tener conocimiento en que estratos las ondas sísmicas se amplifican o que estratos son los que vibran mas.

El tipo de material y espesor para el modelamiento se definió a partir de la clasificación geotécnica, porque esta detalla el material a partir de sus propiedades físicas, luego en el SHAKE2000 cada suelo se define como material, siguiendo este requerimiento se define que la columna esta compuesta por cuatro tipos de materiales:

1. Limos inorgánicos (Material 1)
2. Arena limosa (material 2)
3. Arena arcillosa (material 3)
4. El semiespacio (material 4)

6.3.2 Velocidad de onda cortante

Esta es importante porque depende del material y de la profundidad del mismo, para efecto del modelamiento se correlaciono la columna geotécnica con el perfil de velocidad de ondas cortantes. Esto permitió delimitar la profundidad de la columna a utilizarse en el mismo la cual fue de aproximadamente 35 m de profundidad debido a que ahí la velocidades de onda cortantes encontradas fueron de 780 m/s correspondiente al semiespacio (roca) según los requerimientos de SHAKE2000, entonces la profundidad restante tendría un modo de vibrar no muy significativo y poco interés para evaluarla.

6.3.3 Peso unitario

El peso unitario de un suelo, esta definido como el peso de la muestra, sobre su volumen. Este es uno de los parámetros usado para medir el grado de compactación del suelo, los valores usados en el modelamiento fueron obtenidos de la prueba realizada a cada muestra seca (peso unitario seco suelto) con el propósito de tener una idea del deposito en su estado natural a través de los granos de la muestra alterada, ver anexo II-7.

6.3.4 Porcentaje de amortiguamiento

En general el amortiguamiento actúa como una fuerza opuesta a la vibración debido al movimiento del suelo y es el responsable de la disminución de las amplitudes en las ondas. En este estudio la curva y valores del porcentaje de amortiguamiento fueron tomados de la base datos del SHAKE2000 de acuerdo al tipo de material que fue introducido, siendo las curvas usadas las de Vucetic & Dobry, JGE 1/91 y Seed & Idriss 1970.

6.3.5 Movimiento de entrada

Este consiste en un registro actual o la simulación de movimientos grandes (sismos con magnitud alta). Se uso como movimiento de entrada un sismo ocurrido en el Salvador, el 13 de enero del 2003 con una magnitud (Mw) igual a 7.6, esta magnitud es mucho mayor que la ocurrida en 1972 en la Ciudad de Managua que varió entre 5.6 y 6.2 lo cual es muy representativa.

Se logro correlacionar todos los resultados obtenidos en la caracterización del sitio para formar un solo perfil del que se tomaron los datos utilizado en el modelamiento teórico. (ver anexo II-7).

6.4 Procesamiento de datos y resultados

Los datos de entradas son editados en SHAKE2000, y automáticamente el software construye su perfil estratigráfico a utilizar, el procesamiento de estos datos consiste en la solución continua de la ecuación de la onda para movimientos rápidos o transitorios a través del algoritmo de la transformada de Fourier a partir del perfil introducido (ver fig. 34).

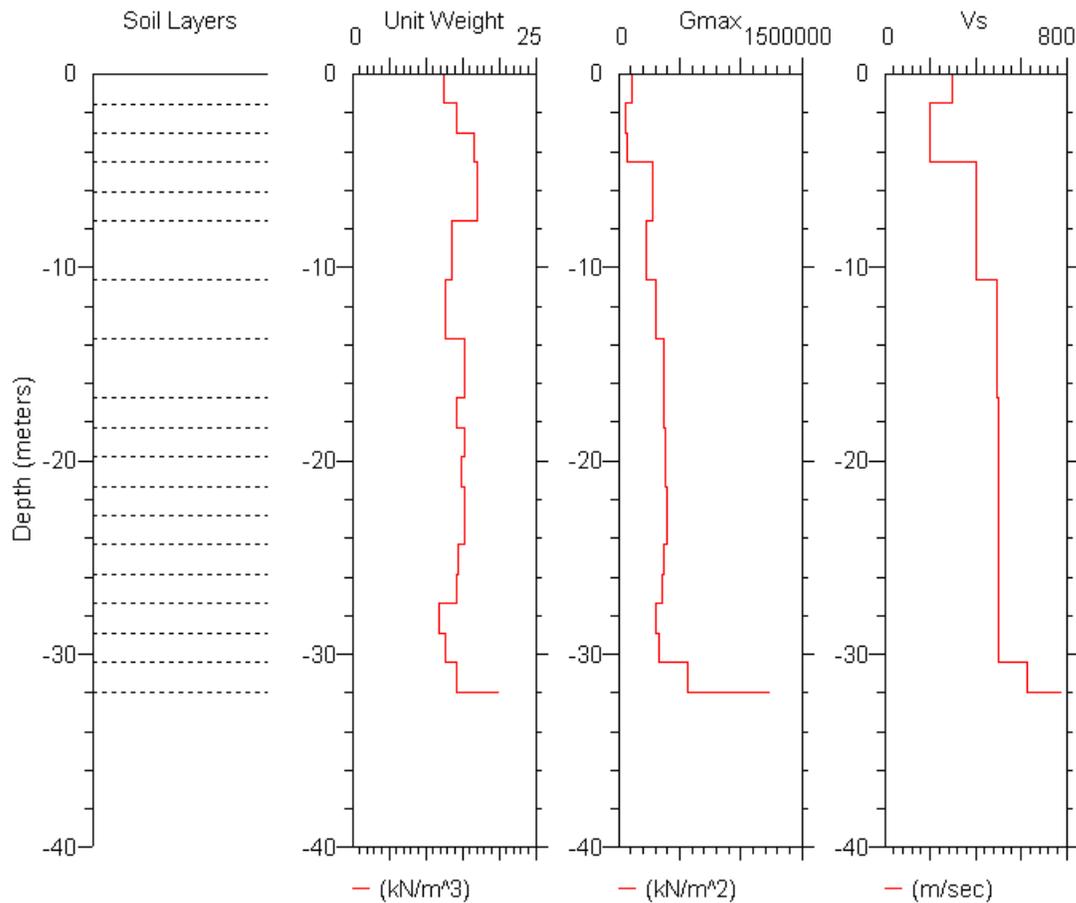


Fig. 34 Perfil usado para el modelamiento teórico

La no linealidad del modulo cortante y el amortiguamiento es justificada por el uso de las propiedades lineales equivalente del subsuelo usando un procedimiento iterativo para obtener valores de modulo y amortiguamiento compatible con los esfuerzos efectivos en cada capa. Tomando estas

consideraciones el programa lee el movimiento de entrada y encuentra la máxima aceleración registrada en superficie, lee los datos del depósito del subsuelo y calcula el periodo fundamental del mismo, calcula nuevos movimiento en el límite superior de cada estrato, calcula el espectro de amplificación entre dos capas cualquiera y la respuesta espectral del movimiento, entre otros parámetros.

De los resultados proporcionado por SHAKE2000, los datos tomados para la evaluación de la respuesta de sitio fueron; el espectro de aceleración de las ondas, el espectro de amplificación y el espectro de respuesta.

En el espectro de aceleración se puede observar que la máxima aceleración registrada es de 0.8 g (ver fig. 35) y una duración de aproximadamente 60 seg.

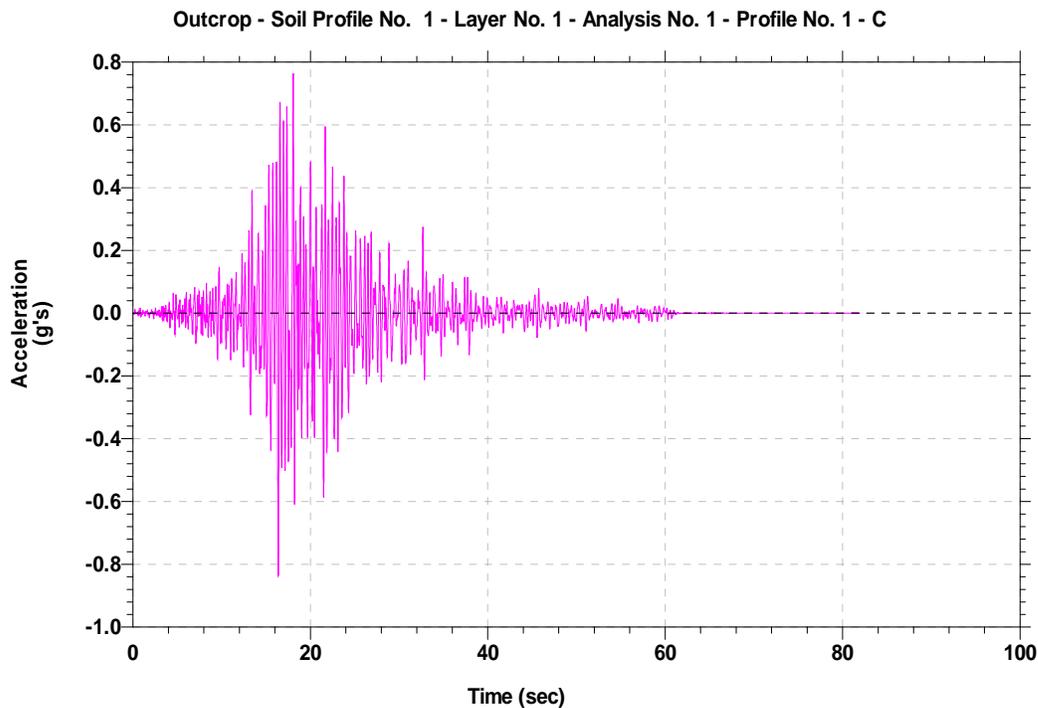


Fig. 35 Espectro de Aceleración en superficie

En el espectro de amplificación (ver fig. 36) se puede ver que el factor de amplificación del movimiento del suelo es de aproximadamente 3.4 para periodos menores de 0.4 s y en el espectro de respuesta (ver fig. 37) se pueden observar la variación de los máximos valores de desplazamiento con respecto al periodo para diferentes valores de amortiguamiento.

El desplazamiento espectral se determinó para amortiguamientos de 1%, 2.5%, 5% y 10%. El factor de amortiguamiento depende de la tipología estructural, de los materiales empleados y del nivel de esfuerzos a que se haya sometido la estructura. Se pueden observar que a medida que aumenta el factor de amortiguamiento el desplazamiento espectral disminuye. Para un factor del 1% el máximo desplazamiento espectral es 0.4 m, para 2.5% es 0.28 m, para 5% es 0.23 m y para el 10% es 0.18 m aproximadamente.

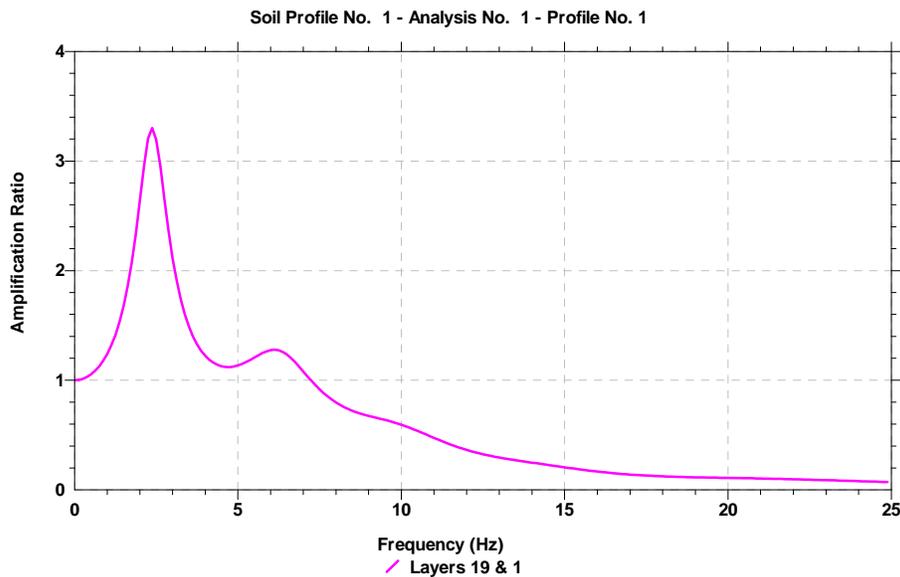


Fig. 36 Espectro de amplificación de ondas

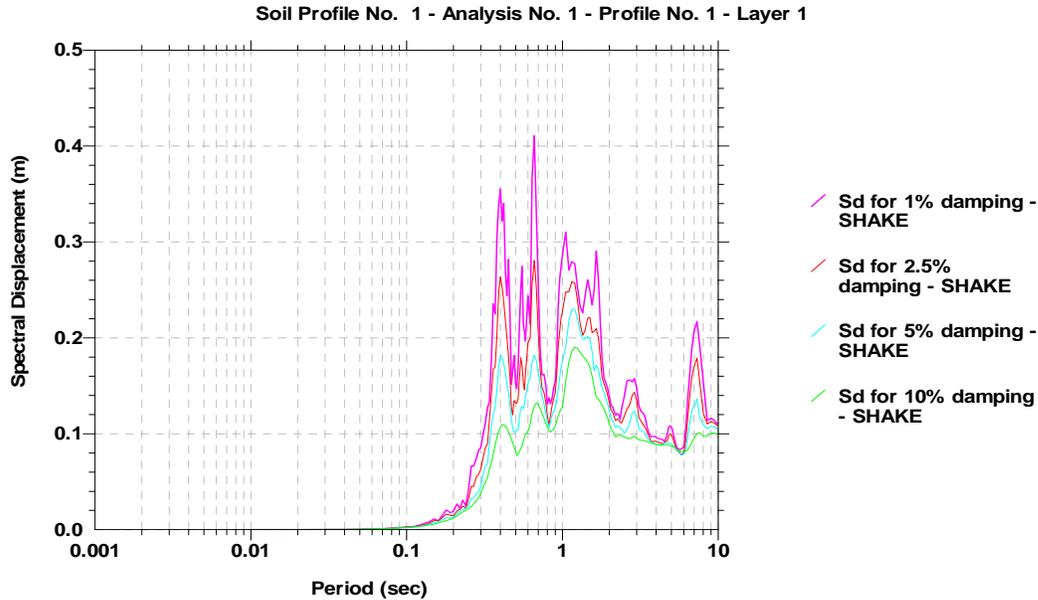


Fig. 37 Espectros de desplazamientos del subsuelo para diferentes factores de amortiguamiento

6.5 Análisis de resultados

Una explicación más clara del modelamiento sería que se registro un sismo de magnitud 7.6 con una aceleración máxima de 0.44 g, a una profundidad de 0.035 km (equivalente al semiespacio o material 4). Se obtuvo una aceleración máxima en superficie de 0.8 g, evidentemente se da un aumento de aceleración y comparada con la aceleración mínima que puede soportar una estructura evitando perdidas de vidas humanas y reduciendo los costos económicos que suelen originar los sismos siendo esta de 0.06 g causaría grandes daños a estructuras cimentadas bajo estas condiciones.

La aceleración aumenta al llegar a la superficie por la presencia de un suelo denso que contribuye con la misma, según la columna geológica es Toba con una resistividad entre 270 y 1000 Ωm , el aumento de la aceleración registrada en superficie tiene un efecto de gran importancia, pero por efecto de modelamiento se le puede asociar a la profundidad en que se simulo el sismo, podría considerarse muy superficial es decir muy cerca de la estación de registro se debe tomar en cuenta que la energía de las ondas disminuye con la

distancias por efectos del medio en que se desplaza, además el análisis fue únicamente en la dirección vertical.

El factor de amplificación por efecto local es 3.4, pero solo para periodos cortos menores de 0.4 seg o 2.5 Hz. Esto indica que para estructura con periodos por debajo de este son las mas afectadas y corresponde a estructuras de pocos pisos, menores de 5 pisos.

Este valor se suele usar para calcular el desplazamiento relativo del suelo y corresponde a la frecuencia encontrada con la técnica de Nakamura y la que se determino con el método MASW comprobado de esta manera que el perfil de velocidades Vs esta bastante aproximado a la realidad.

Se ha demostrado que la aceleración del terreno no esta correlacionada con la magnitud del sismo y por lo tanto no esta correlacionada con el daño causado por este, es decir que para un sismo con una aceleración baja los daños pueden ser muy considerables y que para un sismo con una aceleración alta los daños no son apreciables. El desplazamiento espectral es un indicador de la destructividad de un sismo y su principal condicionante es el factor de amortiguamiento.

Las mayorías de las normas sísmicas presentan espectro de diseño para un factor de amortiguamiento del 5% para estructuras de concreto armado en la que se espera un agrietamiento considerable en los elementos estructurales ante un sismo severo y para estructura de aceros el factor de Amortiguamiento es de 3%.

El espectro de respuesta máxima obtenido en el modelamiento es elástico expresado en término del desplazamiento que puede experimentar una estructura bajo la acción de un sismo y un factor de amortiguamiento del subsuelo.

Para factores de amortiguamiento de 2.5% y 5% el desplazamiento espectral del suelo es de 0.25 m y 0.22 m respectivamente para un períodos de 1.3 seg, estos valores de amortiguamiento se aproximan a estructuras de acero y concreto normalmente con periodos de vibración entre 0 y 3 o 0 y 5 segundos indicando que no afecta a estas estructuras si este fuera el análisis.

Para entender mejor estos resultados, se puede entonces deducir que para una estructura que tenga un amortiguamiento del 5% y un periodo de 1.3 seg., experimentará un desplazamiento de 0.23 m al estar sometida a un sismo de magnitud igual a 7.6. Entonces para una nueva construcción se debe diseñar con valores de desplazamientos mayores que este para que no colapse ante un sismo de mayor magnitud.

Se puede observar que el amortiguamiento tiene un efecto benéfico sobre la respuesta estructural dado que reduce los valores de desplazamiento, esto se debe a que por la acción del amortiguamiento se disipa energía, generalmente en forma de calor y sonido disminuyendo así, la vibración de la estructura.

CAPITULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El sitio de estudio fue caracterizado en profundidad de acuerdo a las exigencias del mismo, como fue la instalación del arreglo vertical para monitoreo sísmico.

La caracterización se realizó a través de estudios geofísicos, geológicos y geotécnicos para tener conocimiento del subsuelo, cuya información es útil para estudios de interacción suelo – sismo, esperando que esta contribuya con estudios afines que se desarrollen dentro del área de Managua.

7.1 Conclusiones

1). Los perfiles de resistividad alcanzaron una profundidad de 60 m compuesta por 11 unidades desde el punto de vista resistivo e indican que el subsuelo está compuesto por estratos densos pero bastante porosos. Las unidades que se encuentran de 0 a 7 m de profundidad, tienen resistividades que están en el rango 72 – 270 Ωm , estas son las capas más superficiales y están en proceso de consolidación, corresponden a estratos de limos inorgánicos y arenas limosas. La resistividad encontrada entre 7 y 24 m varía de 270 Ωm a 1000 Ωm , correspondiente a depósitos de materiales consolidados muy secos como arena limosa limpia, y las resistividades de las unidades que se encuentran entre 24 y 60 m, presentan una disminución de los 1000 Ωm hasta los 52 Ωm , 72 Ωm y 100 Ωm en a lo largo de los perfiles, Ωm , correspondiente a materiales porosos como arenas con mezclas de gravas.

2). La aplicación del método Análisis Multicanal de Ondas Superficiales, dio como resultado un perfil de velocidades de ondas cortantes cuya profundidad alcanzada fue de 95 m aproximadamente, en el cual se pueden diferenciar 10 unidades desde esta misma perspectiva. Unidades que van de los 200 m/s hasta

1700 m/s aproximadamente y de acuerdo a la clasificación de The National Earthquake Hazards Reduction Program of Los Estados Unidos (NEHRP) y el Reglamento Nicaragüense de la construcción los primeros 6 m corresponden a tipos de suelos E y D cuyas velocidades varían entre 180 a 360 m/s correspondiente a un suelos rígido, luego de los 6 m a los 44 m se encuentra un tipo de suelo C con velocidades que varían entre 360 y 760 m/s y se le asignan a suelo muy denso y finalmente de los 44 m hasta los 95 m aproximadamente el tipo de suelos es B cuyas velocidades varían de 160 a 1500 m/s muy característico de la roca.

3). Durante la perforación se tomaron muestras para ser analizada por la geotecnia y la geología, dentro del análisis geológico se realizo una clasificación del suelo desde el punto de vista granulométrico y dentro del estudio geotécnico se determinaron: Granulometría, límites Atterberg y Peso unitario.

4). La caracterización geotécnica y geológica que se realizo dio como resultado una columna estratigráfica en ambas ciencias aplicadas lo que significa un aporte al estudio del subsuelo de Managua, porque no existen columnas estratigráficas registradas hasta los 100 m, también se realizo un perfil en el que se combinan los parámetros determinados en esta caracterización.

5) Los perfiles de imágenes de resistividades indicaron que a 60 m de profundidad no se podía instalar el hyposensor porque había un estrato de baja resistividad correspondientes a arenas muy porosas, por lo que se procedió a perforar a 100 m como una metodología utilizada en estos tipos de proyectos cuando no se tiene información del subsuelo y para garantizar que a esta profundidad habían condiciones para instalar el Hyposensor se procedió al análisis del subsuelo con geotecnia y geología, después se determinó velocidades de ondas cortantes con MASW obteniéndose velocidades de ondas S de 1700 m/s correspondiente a suelos altamente denso o roca, lo que garantiza que hay un estrato que presta las condiciones de instalación a 100 m.

5). El perfil que resulto de la combinación de todos los parámetros obtenido fue utilizado para realizar un modelamiento teórico de la respuesta dinámica del suelo, resaltando así, la importancia de la caracterización de sitio en donde se instalen estaciones de monitoreo sísmico.

De este modelamiento se llego al conocimiento de que este perfil del suelo bajo las condiciones de un sismo de magnitud 7.6, experimenta un aumento en la aceleración a 0.8 g, tiene un factor de amplificación del movimiento de 3.4 y desplazamiento espectral de 0.22 m y 0.25 para un periodo de 1.3 seg. con amortiguamientos del 5% y 2.5% respectivamente, siendo estos los mas usados en diseños de estructuras de concreto y acero.

7.2 Recomendaciones

Las limitaciones son inherentes a cada estudio, por ende la visión es mejorar en cada trabajo de investigación, por lo que se recomienda:

1). Para mas detalle del estudio geológico se recomienda hacer dataciones a cada muestra para asignarle una edad mas especifica, hacer un análisis mineralógico para identificar su origen, hacer correlaciones con otros sondeos levantados a diferentes elevaciones topográfica con el fin de estudiar la secuencia de los estratos o depósitos y para un mejor correlación con resistividad .

2). Siempre que se cuente con los equipos necesarios para muestreo de pozos, seria mucho mejor tomar muestra lo menos alterada posible para un mejor análisis detallado y confiable de la misma desde el punto de vista geológico y geotécnico.

3). Para realizar un mejor análisis de la respuesta dinámica del suelo de la ciudad de Managua ante un evento sísmico, se necesitan más arreglos verticales distribuidos en toda la ciudad, esto puede ayudar a tener un fundamento sólido acerca de las propiedades dinámicas y comportamiento del suelo del área, que a la vez aportarían al Reglamento Nicaragüense de Construcción, posiblemente a través de nuevos espectros de diseños, formulas de atenuación para la ciudad de Managua. Etc.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Álvarez Rubio, Sonia (1999), [En línea]: El efecto local sobre el movimiento sísmico del suelo: Fenomenología y resultados recientes. Monografía, Universidad Politécnica de Madrid. [Consulta: 11 de enero 2008]. Disponible en: <http://www.ucm.es/BUCM/revistas/fis/02144557/articulos/FITE9999110141A.PDF>

Annual Book of ASTM Standard (2001): construction, vol 04.08. Editorial staff, U.S.A.

Badillo Juárez, Eulalio & Rico Rodríguez, Alfonso (2001): Mecánica de suelos teoría y aplicaciones de la mecánica de suelos. Editorial LIMUSA.

Bice, D. C. (1985a): Quaternary volcanic stratigraphy of Managua, Nicaragua. Correlation and source assignment for multiple overlapping plinian deposits. Geological Society of America Bulletin.

Bice, D. C. (1980b): Tephra stratigraphy and Physical Aspects of recent volcanism near Managua, Nicaragua. Ph. D, Thesis, Berkeley, California, University of California.

Black Geotechnical (2006) [En línea]: Multi-Channel Analysis of Surface Wave (MASW). Consulting Geotechnical Engineers [Consulta: 12 enero 2008]. Disponible en: <http://www.blackgeotechnical.com.au/innovations.html>

Casanova Matera, Leonardo (2002) [En línea]: Topografía plana, aplicaciones de las curvas de nivel. Ula, Mérida [Consulta: 15 enero 2008]. Disponible en: <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/Inova/Archivos/FORMATO-PDF/CAP-9.pdf>

Choon B. Park (2003): SurfSeis, Multichannel Analysis of Surface Wave User's Manual v 1.5, Kansas Geological Survey, Mary Brohammer

Crespo Villalaz, C. (1999). Mécanica de suelos y cimentaciones (4^a ed.). Mexico: LIMUSA Noriega Editores.

Dévoli Graciela y Strauch Wilfried (2002) [En línea]: Actualización del mapa de fallas geológicas de Managua. Informe técnico. INETER, Mayo (2002). [Consulta: 28 febrero 2008]. Disponible en: <http://www.ineter.gob.ni/geofisica/proyectos/fallas-2001/informe/01-introduccion.html>

Escuela universitaria politécnica: Mecánica de suelos y estudios geotécnicos en obras de ingeniería [En línea]: Documento electrónico. [Consulta: 11 enero 2008]. Disponible en:

http://tar5.eup.us.es/master/ponencias/modulo6/ponencias_modulo06_master_05-07/mecanica_de_suelos_y_estudios_geotecnicos.pdf

Espinoza Martínez, Francisco J. (2007): Neotectónica de la Falla Nejapa porción Oeste del graven de Managua. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México – CIGEO/UNAN – Managua.

Fortán Palestra, Jorge [En línea]: Descripción de suelos y rocas. Reglamento CIRSOC 401 [Consulta: 11 enero 2008]. Disponible en:

<http://www.inti.gov.ar/cirsoc/pdf/401/reglamento/reglamentocap8.pdf>

G. Dile John, A. Steller Robert, L. Nigbor Robert (2003) [En línea]: Borehole Accelerometer Installation, KINEMATICS [Consulta: 12 enero 2008]. Disponible en: <ftp://ftp.kmi.com/pub/AppNotes/apnote%2052a.pdf>

INETER (2005) [En línea]: Red de Monitoreo y Alerta Temprana Contra Fenómenos Geológicos en Nicaragua. Dirección General de Geofísica.

[Consulta: 20 julio 2008]. Disponible en:

<http://www.ineter.gob.ni/geofisica/sistema-short.html>

INGEOMINAS (2002) [En línea]: Requisitos mínimos para la instalación de acelerógrafos. Norma NRS – 98. Subdirección de amenazas geoambientales, red nacional de acelerógrafo de Colombia [Consulta: 20 octubre 2007]. Disponible en:

http://bdrsnc.ingeminas.gov.co/publicaRNAC/PUBLICACIONES/Complemento_NSR_98/COMPLEMENTO_NSR_98.pdf

Kansas Geological Survey (2006), [En línea]: Introduction to MASW Acquisition and Processing. The university of Kansas. [Consulta: 9 de enero 2008]. Disponible en: <http://www.kgs.ku.edu/software/surfseis/masw.html>

Kutterolf S, Freundt A, Perez W, Wehrmann H, Schmincke H. (2007): Late Pleistocene to Holocene temporal succession and magnitudes of highly – explosive volcanics eruptions in west – central Nicaragua. Journal of Volcanology and Geothermal Research.

Koloski, J. W., Schwarz, S. D., Tubbs, D. W (1989): Geotechnical properties of geologic material. Washington division of geology and earth resources, bulletin 78. [Consulta: 10 julio 2008]. Disponible en:

<http://www.tubbs.com/geotech/geotech.htm>

L. Kramer, Steven (1996): Geotechnical Earthquake Engineering. University of Washington. William J. Hall

Martínez P. Alejandro, Alvarado F. Carlos, Ruviano V. Diana, Ojeda Aníbal [En línea]: Posibles implicaciones de las condiciones locales de estaciones de referencia para la evaluación de la respuesta dinámica. Simposio Colombiano de Sismología [Consulta: 26 noviembre 2007]. Disponible en: <http://bdrsnc.ingeminas.gov.co/publicaRSNC/CondicLocales-Ojeda.pdf>

Mendoza J. Alfredo, Obando Edwin (2007): Proyecto sistema de intercepción de aguas residuales de la ciudad de Managua. Levantamiento Geofísico con perfiles de imágenes de resistividad eléctrica y refracción sísmica.

Molina Padron, Water M. (2006) [En línea]: Comparación de los métodos 1-D y 2-D de resistividad eléctrica por medios de sondeos tipo Wenner, Dipolo-Dipolo y Wenner - Schlumberger con la utilización de los programas DCINV, RES2DMOD Y RES2DINV. Proyecto de grado, Universidad Simón Bolívar, Sartenejal [Consulta: 23 noviembre 2007]. Disponible en: <http://www.gc.usb.ve/geocoordweb/Tesis/Pre/Walter%20Molina.pdf>

Ordeñez, Gustavo A. (2006): SHAKE2000 A Computer Program for the 1-D Analysis of Geotechnical Earthquake Engineering Problems. User's Manual. Pascual, Jorge Sainz [En línea]: Estudio Geotécnico. Curso de Geotecnia Grupo INZAMAC, España [Consulta: 13 enero 2008]. Disponible en: <http://www.forcal.es/pdf/cursogeotecnia.pdf>

P. Higuera y R. Oyarzun [En línea]: Mineralogía y procesos de contaminación del suelo. España: origen del suelo. Departamento de Ingeniería geológica y minera [Consulta: 11 enero 2008]. Disponible en: http://www.uclm.es/users/higuera/MGA/Tema03/Tema_03_Suelos_1.htm

Pazos García, Antonio A. (2003): Estación sísmica digital. Tratamiento digital de señales. Tesis doctoral. Universidad de Cádiz, departamento de Física Aplicada [Consulta: 4 Julio 2008]. Disponible en: <http://www.minas.upm.es/fundacion/jgs/ftproot/2004-2005/GrupoA/AAPazos/APazos.pdf>

Perez, W. and Freundt, A., 2006: The Youngest Highly explosive basaltic eruptions from Masaya Caldera, Nicaragua. Stratigraphy and Hazard assessment. In: W. I. Rose, G. J. S. Bluth, M. J. Carr, J. Ewert, L. C. Patino and J. W. Vallance (Editors), Volcanic hazards in Central American. Geol. Soc. Am. Spec. public., pp.189 – 2007.

Ranjan, Rajiv (2005) [En línea]: Seismic response análisis of Dehradun city, india [Consulta: 16 enero 2008]. Disponible en: http://www.itc.nl/library/Papers_2005/msc/ereg/ranjan.pdf

Reglamento Nacional de la Construcción (2007): Ministerio de Transporte e Infraestructura, MTI. Dirección General de Normas de Construcción y Desarrollo Urbano, Managua, Nicaragua Marzo 2007.

Rosales Climent, Cristina Isabel (2001): Sobre el comportamiento sísmico de los depósitos de suelos del área de Cañaveralejos, Cali, Colombia. Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería.

Sánchez, F. Javier [En línea]: Prospecciones geofísicas “sondeos eléctricos verticales”. Departamento de Geología, Universidad Salamanca, España.

[Consulta 12 enero 2008]. Disponible en:

<http://web.usal.es/~javisan/hidro/temas/SEV.pdf>

Sowers B. George y Sowers F. George (1990): Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones, Tercera edición. Editorial LIMUSA, México.

Universidad Católica de Chile, Ingeniería Civil, Departamento de Estructura y Geotecnia [En línea]: El problema sísmico [Consulta: 10 enero 2008]. Disponible en: <http://www.ieg.uc.cl/docs/Problema.pdf>.

Valle O. Marvin (2006a): Estudio geológico por fallamiento superficial del terreno “Edificio centro de investigaciones geocientíficas CIGEO/UNAN – Managua”, CEDOC –CIGEO.

Valle O. Marvin (2007b): Estudio geológico por fallamiento superficial del terreno, de un lote destinado a la construcción de un edificio para bodegas ubicado al sur de la Universidad Iberoamericana de ciencia y tecnología, Managua.

Yesica Fazzito, Sabrina (2004) [En línea]: Método de procesamiento de datos para determinar la resistividad dieléctrica del subsuelo. Tesis de grado [Consulta: 10 enero 2008]. Disponible en:

http://focuslab.lfp.uba.ar/public/CursoTErrores2k4/Monografias2005/Sabrina_Yesica_Fazzito.pdf

Zea Constantino, Carmelina, y Rivera Constantino, Rigoberto (2004) [En línea]: notas sobre los fundamentos de mecánica de suelos [Consulta: 11 enero 2008].

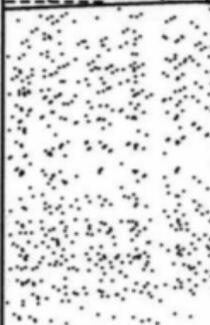
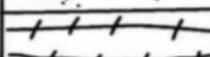
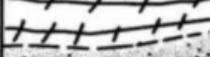
Disponible en:

<http://www.ingenieria.unam.mx/~posgradoingcivil/DocsGeotecnia/PropeFunMecSue2005V.1.pdf>.

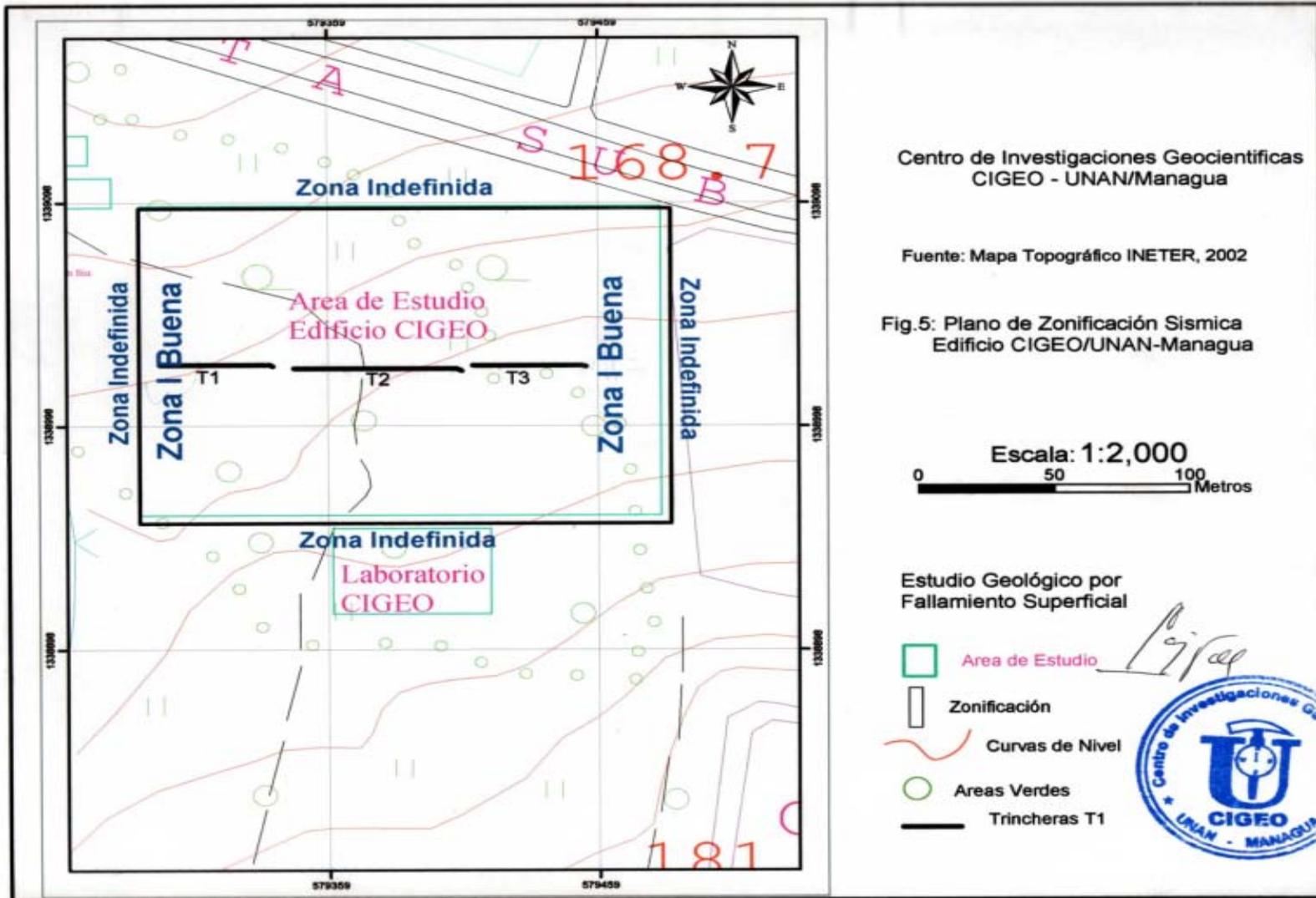
ANEXOS

ANEXO I

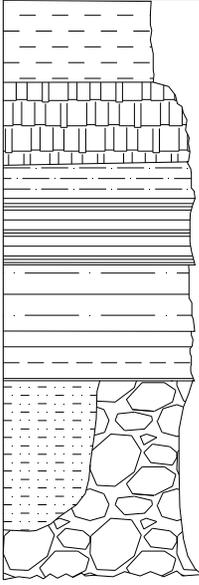
I - 1. Columna estratigráfica del sitio donde se construirá un edificio para oficinas

PROFUNDIDAD (m)	EDAD	LITOLOGÍA	ESPESOR (m)	DESCRIPCIÓN
 <p>3.5 m</p>	<p>Holoceno</p>	 <p>Hs</p>	0.3 m	Suelo moderno
		 <p>Hsf3</p>	1.6 m	Suelo fosil
		 <p>Hrt (w)</p>	0.43 m	Toba El retiro meteorizada
		 <p>Hsf2</p>	0.13 m	Suelo fosil limoso
		 <p>Hrt</p>	0.15 m	Toba El Retiro
		 <p>Hsj</p>	0.45 m	Escoria San Judas
		 <p>Hsf1</p>	Indefinido	Suelo arenoso

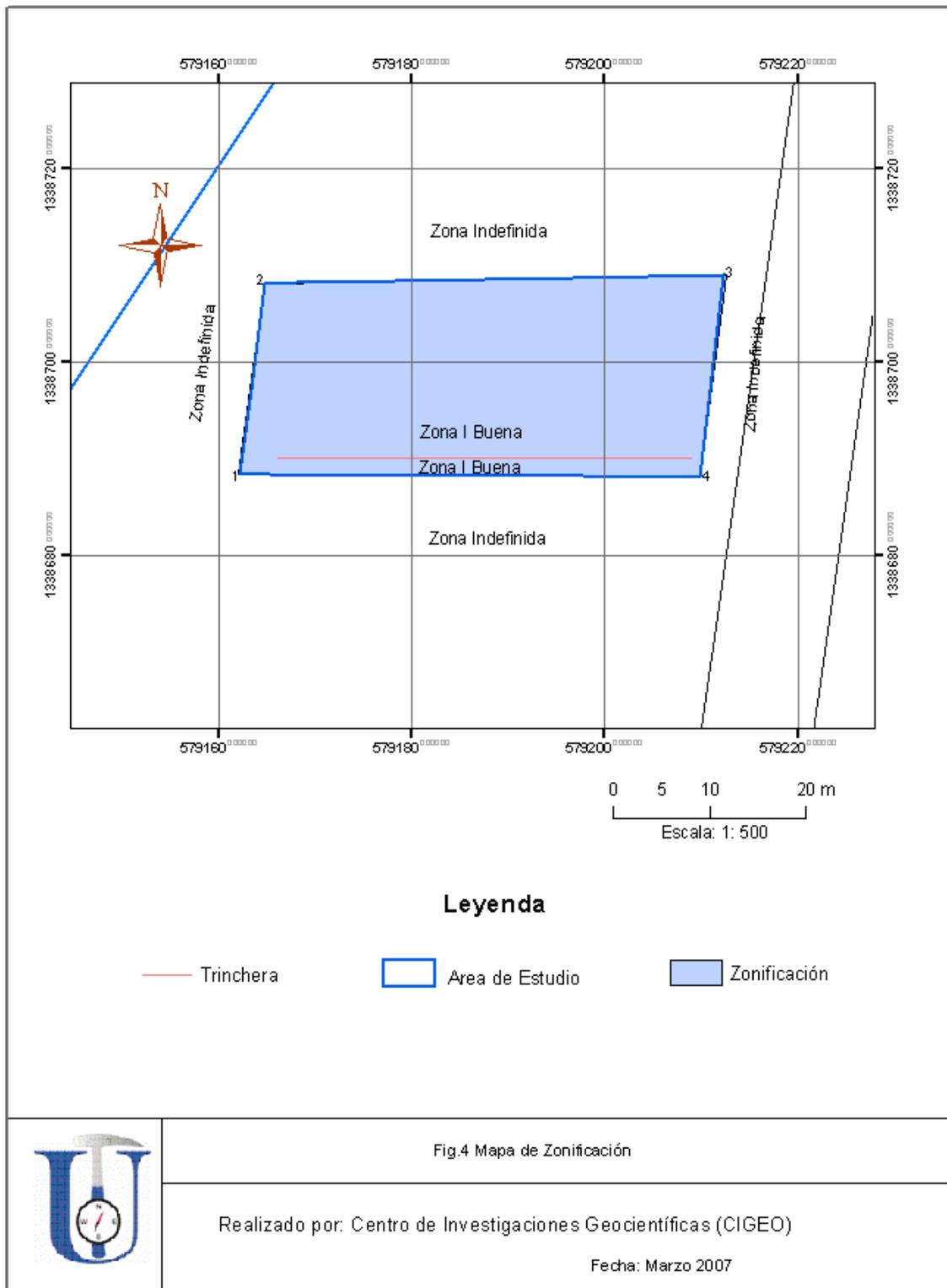
I - 2. Zonificación sísmica de sitio para la construcción de un edificio para oficinas



**I - 3. Columna estratigráfica del sitio destinado para bodegas, ubicado al sur de la UNICIT
Esc:1:50**

Profundidad (m)	Edad	Litología	Espesor (m)	Descripción	
 <p>3.5</p>	CUATERNARIO		Hs	0.5	Suelo moderno, color café oscuro de grano fino.
		Hrt	1	Toba El Retiro, meteorizada, de color gris claro.	
		Pfs3	0.20	Suelo fósil de color café claro limo-arenoso.	
		Hsj	0.40	San Judas, alternancia de capas de escoria y toba.	
		Pfs2	0.40	Suelo fósil de color café oscuro de grano fino tamaño limo.	
		Pfs1	0.30	Suelo fósil color café oscuro, con fragmentos de pómez.	
		Hal	1.20	Aluvial	

I - 4. Zonificación sísmica del sitio destinado para bodegas, ubicado al sur de la UNICIT

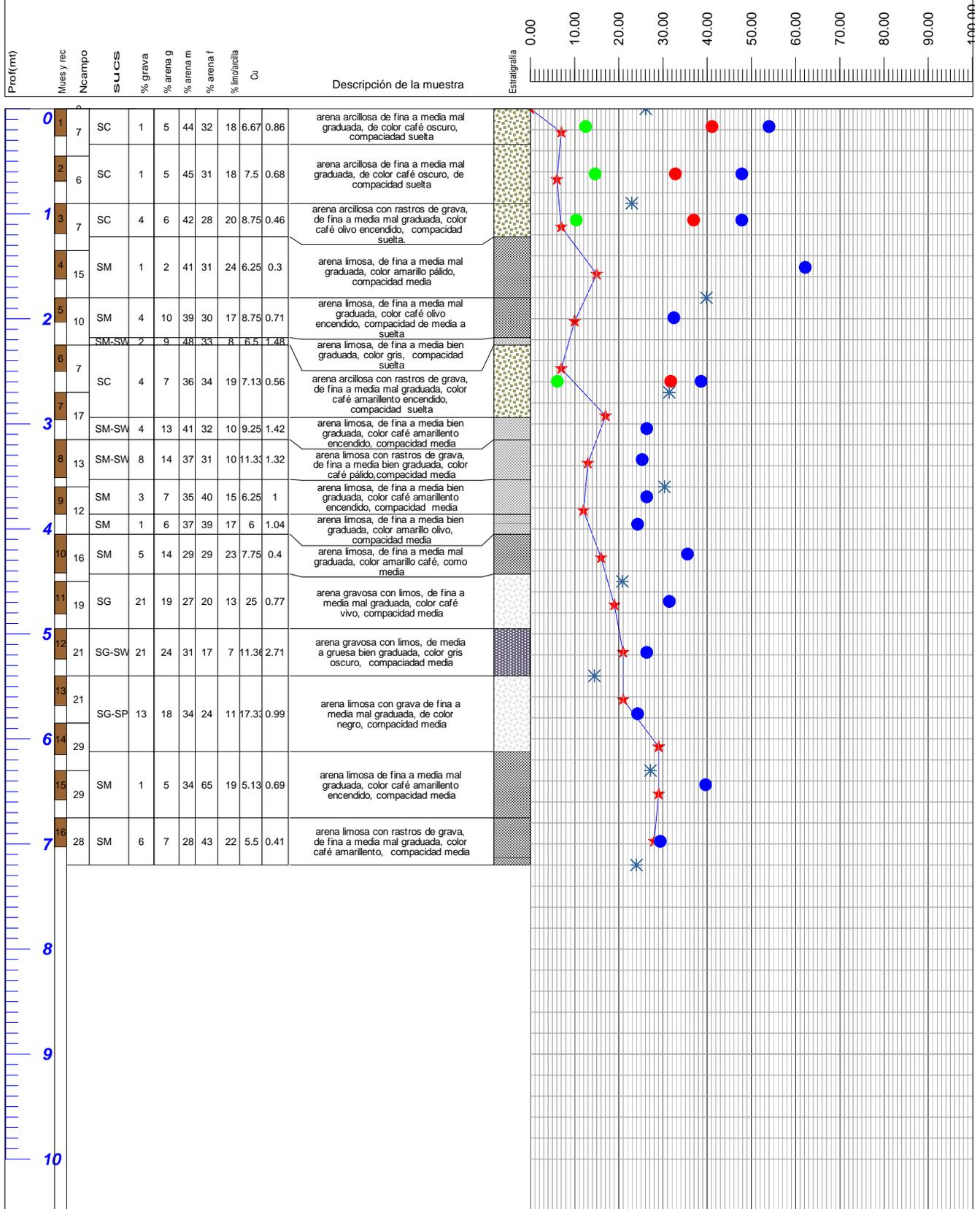


I - 5. Sondeos de SPT existentes

Sondeo: prs-1

Proyecto: CIGEO(UNAN).
 Localización: Recinto Rubén Darío UNAN-Managua
 Elevación superior (msnm): snm
 Profundidad del nivel freático(msnm):

Fecha de inicio de perforaciones: 12/01/06
 Fecha de finalización de las perforaciones: 19/01/06
 Método de perf. y muestreo: ASTM D 1586-99



Leyenda

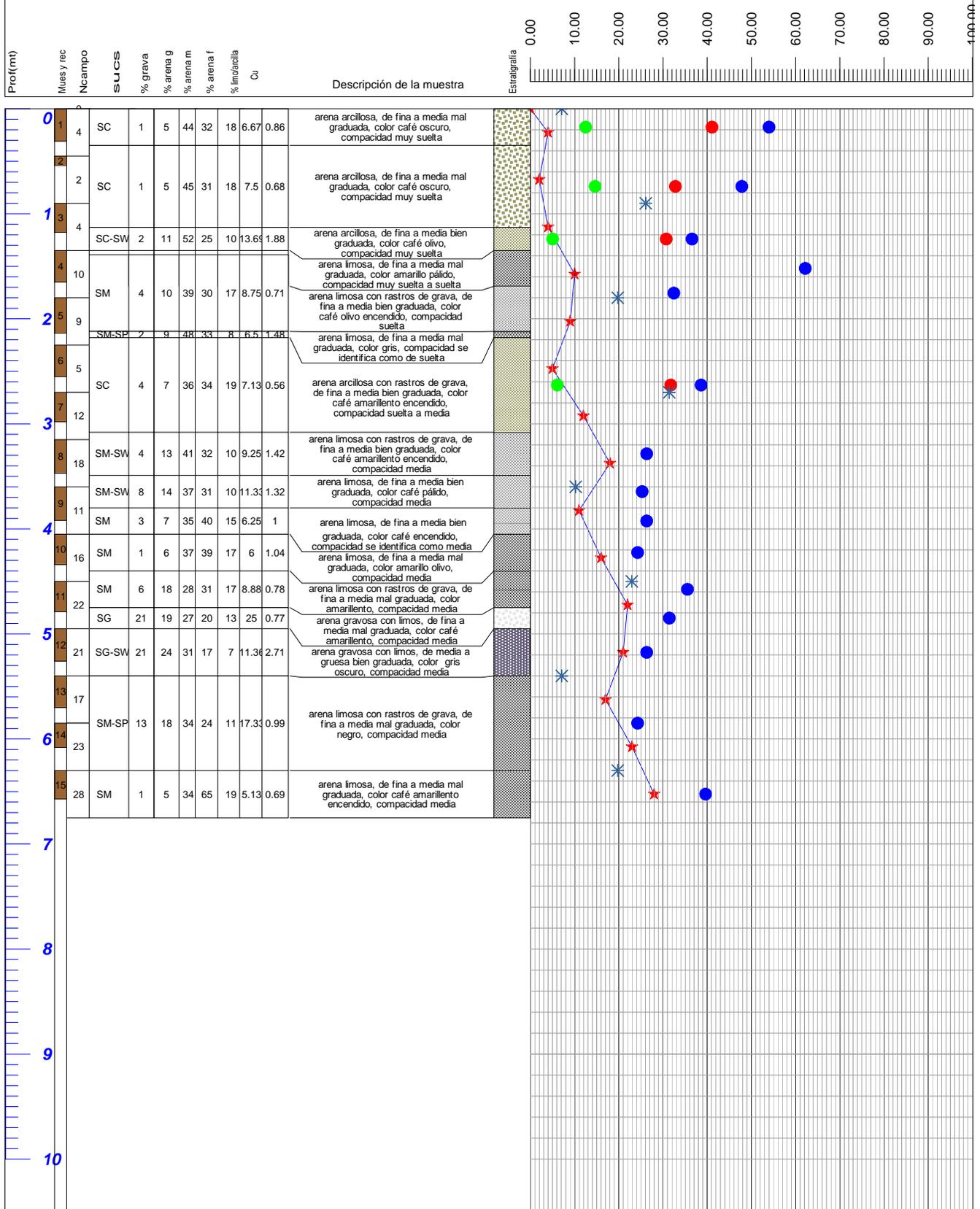
- ★ Número de golpes
- ✳ Humedad in-situ
- [Dotted Pattern] Arena arcillosa mal graduada
- [Dotted Pattern] arena gravosa mal graduada
- Límite líquido
- Índice de plasticidad
- [Horizontal Lines Pattern] Arena limosa bien graduada
- [Horizontal Lines Pattern] Arena gravosa bien graduada
- Límite plástico
- [Vertical Lines Pattern] Arena limosa mal graduada
- [Vertical Lines Pattern] Arena arcillosa bien graduada
- [Cross-hatch Pattern] Arena arcillosa y limosa

Registro de perforación

Sondeo: prs-2

Proyecto: CIGEO(UNAN).
 Localización: Recinto Rubén Darío UNAN-Managua
 Elevación superior (msnm): snm
 Profundidad del nivel freático(msnm):

Fecha de inicio de perforaciones: 12/01/06
 Fecha de finalización de las perforaciones: 19/01/06
 Método de perf. y muestreo: ASTM D 1586-99



Leyenda

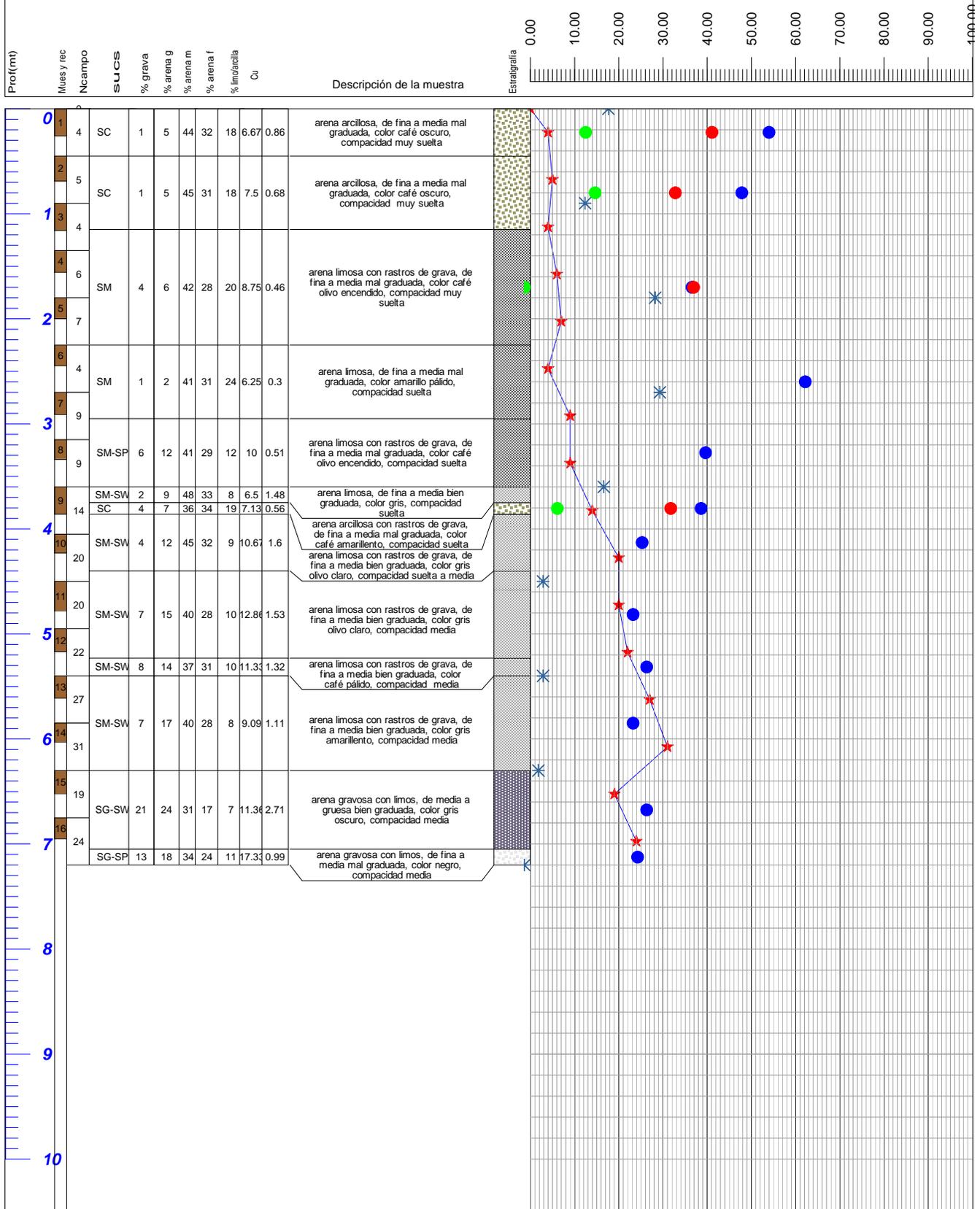
- Número de golpes
- Humedad in-situ
- Arena arcillosa mal graduada
- arena gravosa mal graduada
- Límite líquido
- Índice de plasticidad
- Arena limosa bien graduada
- Arena gravosa bien graduada
- Límite plástico
- Arena limosa mal graduada
- Arena arcillosa bien graduada
- Arena arcillosa y limosa

Registro de perforación

Sondeo: prs-3

Proyecto: CIGEO(UNAN).
 Localización: Recinto Rubén Darío UNAN-Managua
 Elevación superior (msnm): snm
 Profundidad del nivel freático (msnm):

Fecha de inicio de perforaciones: 12/01/06
 Fecha de finalización de las perforaciones: 19/01/06
 Método de perf. y muestreo: ASTM D 1586-99



Legenda

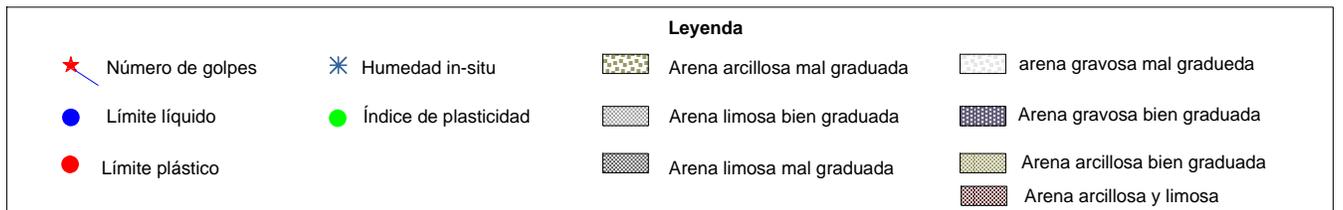
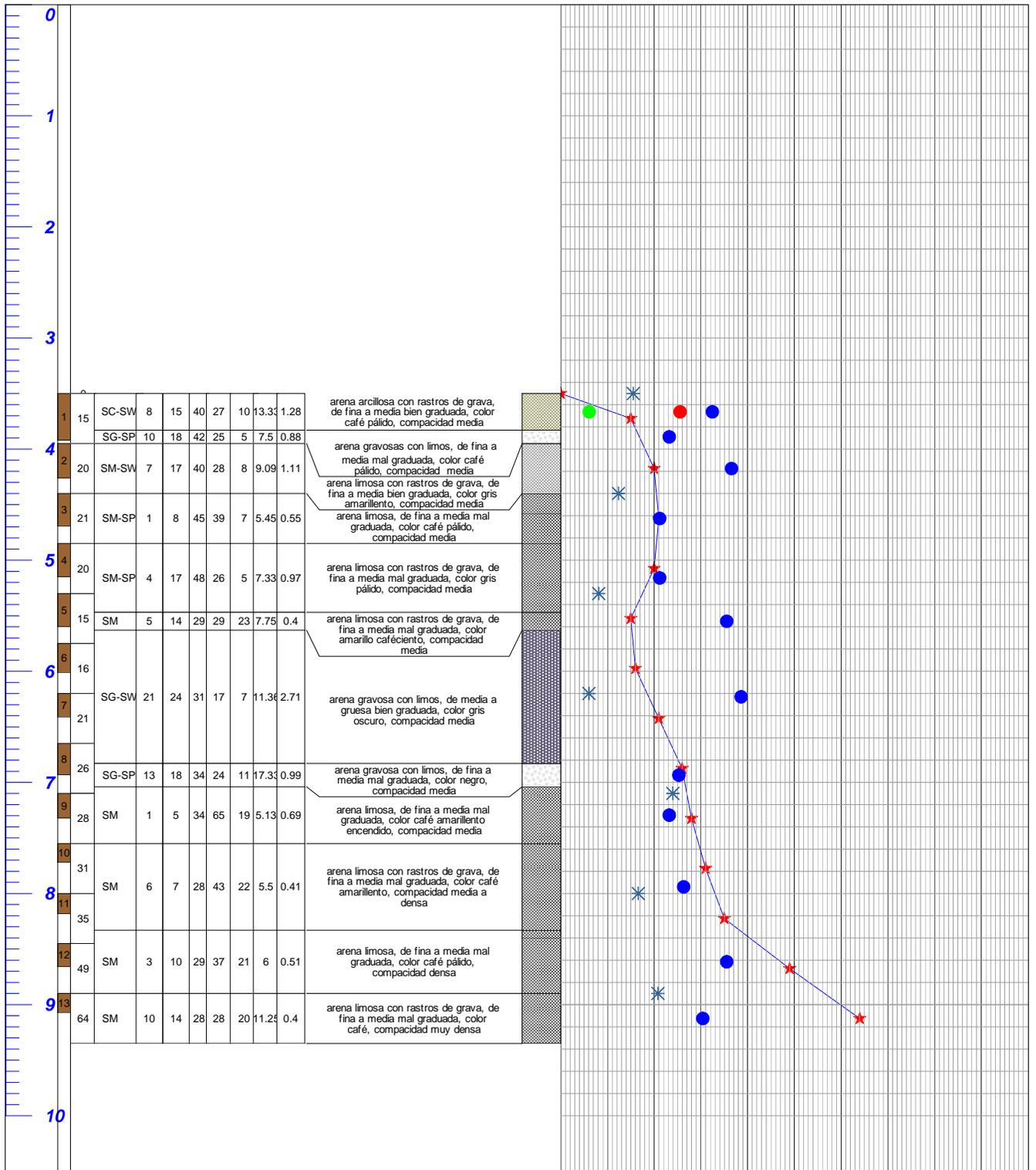
- Número de golpes
- Humedad in-situ
- Arena arcillosa mal graduada
- arena gravosa mal graduada
- Límite líquido
- Índice de plasticidad
- Arena limosa bien graduada
- Arena gravosa bien graduada
- Límite plástico
- Arena limosa mal graduada
- Arena arcillosa bien graduada
- Arena arcillosa y limosa

Registro de perforación

Sondeo: prs-4

Proyecto: CIGEO(UNAN).
 Localización: Recinto Rubén Darío UNAN-Managua
 Elevación superior (msnm): snm
 Profundidad del nivel freático (msnm):

Fecha de inicio de perforaciones: 12/01/06
 Fecha de finalización de las perforaciones: 19/01/06
 Método de perf. y muestreo: ASTM D 1586-99

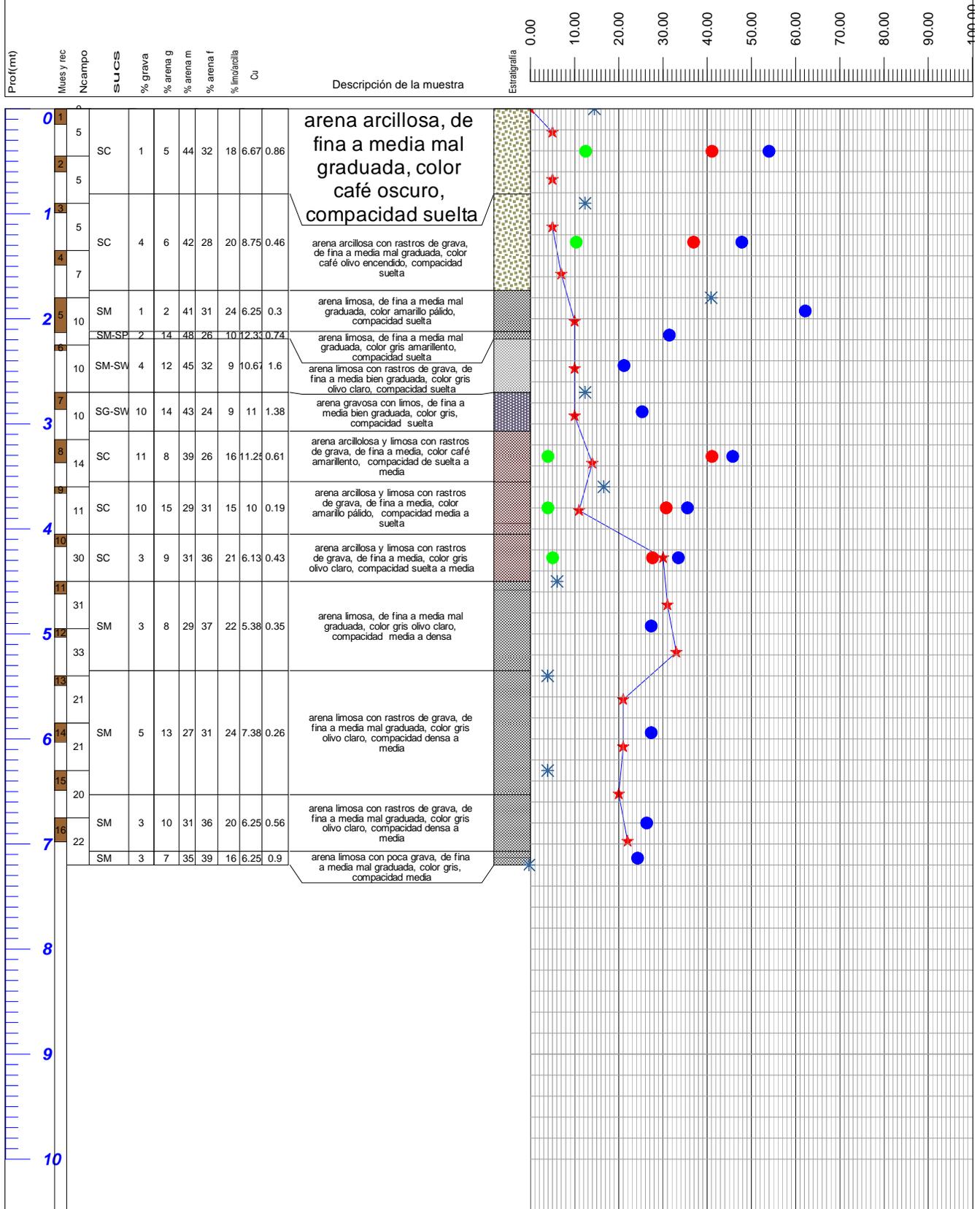


Registro de perforación

Sondeo: prs-5

Proyecto: CIGEO(UNAN).
 Localización: Recinto Rubén Darío UNAN-Managua
 Elevación superior (msnm): snm
 Profundidad del nivel freático (msnm):

Fecha de inicio de perforaciones: 12/01/06
 Fecha de finalización de las perforaciones: 19/01/06
 Método de perf. y muestreo: ASTM D 1586-99



Legenda

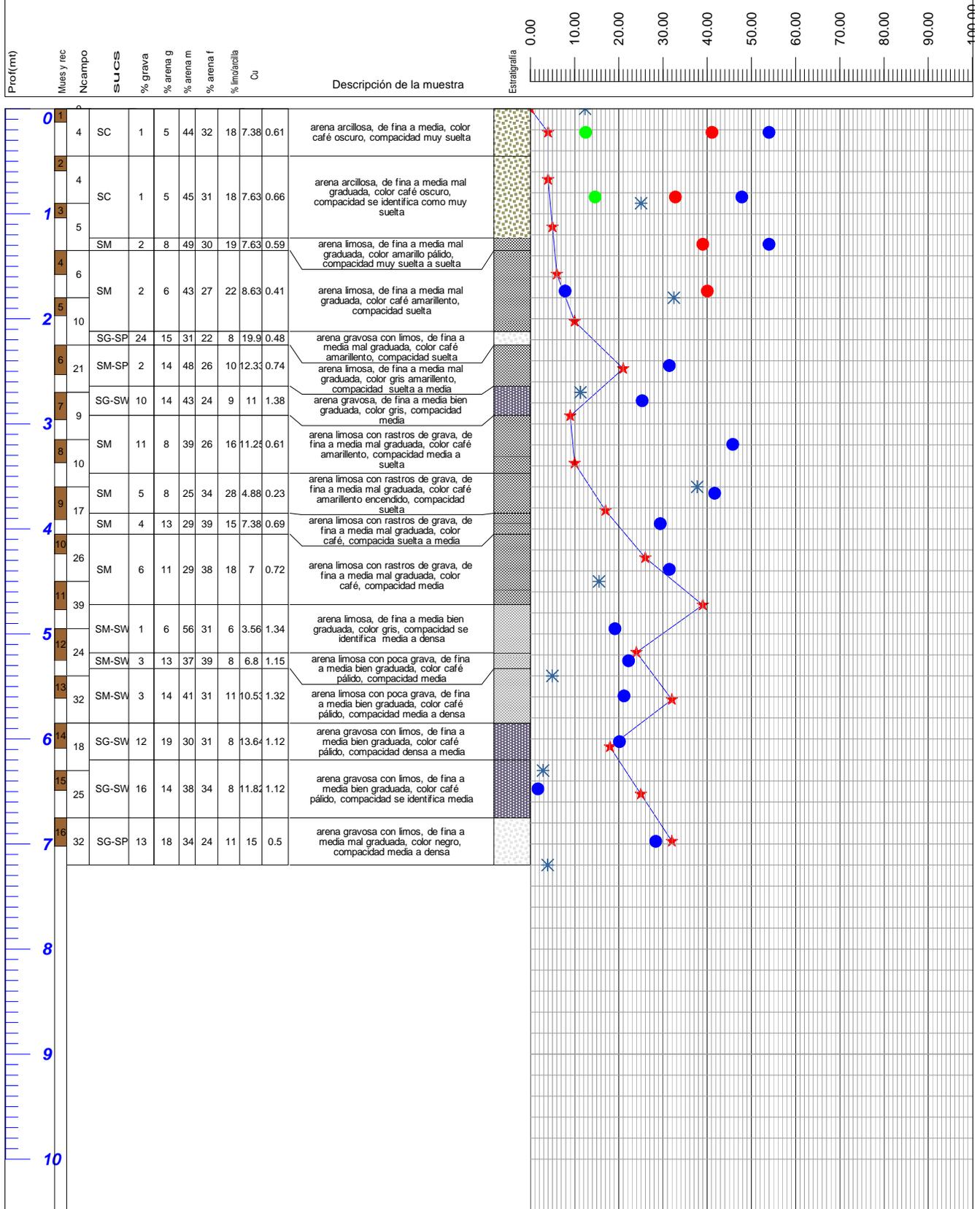
- Número de golpes
- Humedad in-situ
- Arena arcillosa mal graduada
- arena gravosa mal graduada
- Límite líquido
- Índice de plasticidad
- Arena limosa bien graduada
- Arena gravosa bien graduada
- Límite plástico
- Arena limosa mal graduada
- Arena arcillosa bien graduada
- Arena arcillosa y limosa

Registro de perforación

Sondeo: prs-6

Proyecto: CIGEO(UNAN).
 Localización: Recinto Rubén Darío UNAN-Managua
 Elevación superior (msnm): snm
 Profundidad del nivel freático (msnm):

Fecha de inicio de perforaciones: 12/01/06
 Fecha de finalización de las perforaciones: 19/01/06
 Método de perf. y muestreo: ASTM D 1586-99



Leyenda

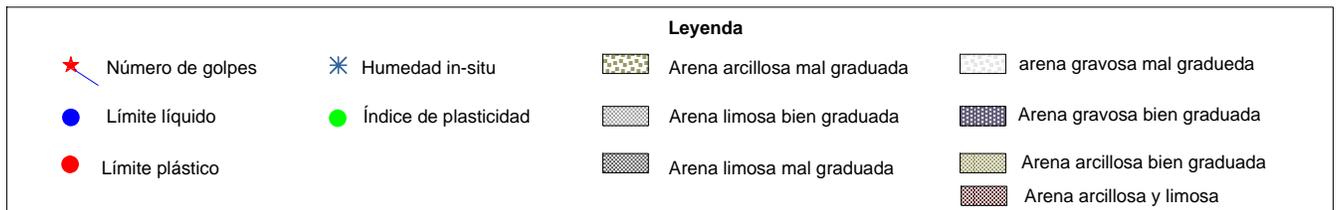
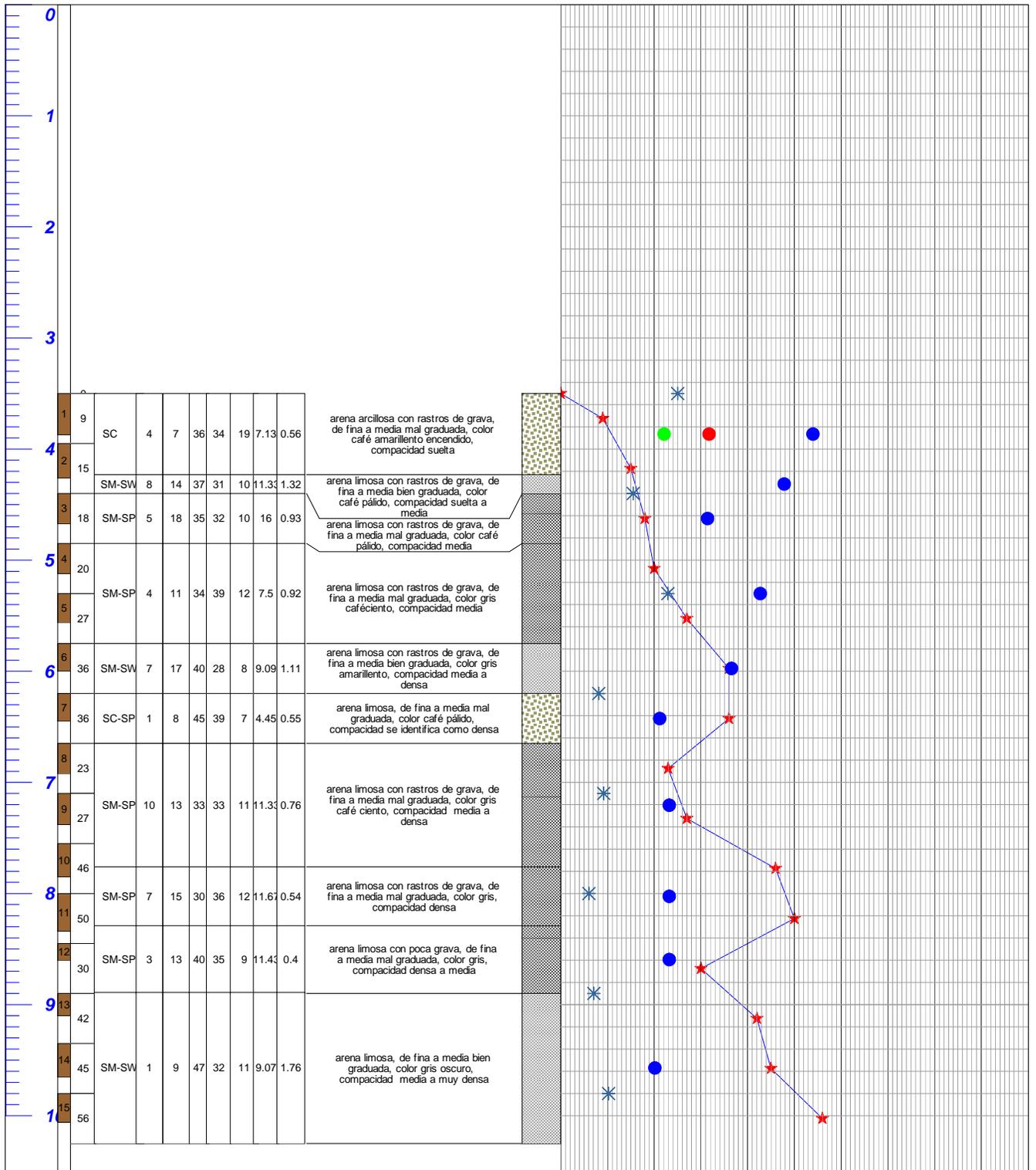
- Número de golpes
- Humedad in-situ
- Arena arcillosa mal graduada
- arena gravosa mal graduada
- Límite líquido
- Índice de plasticidad
- Arena limosa bien graduada
- Arena gravosa bien graduada
- Límite plástico
- Arena limosa mal graduada
- Arena arcillosa bien graduada
- Arena arcillosa y limosa

Registro de perforación

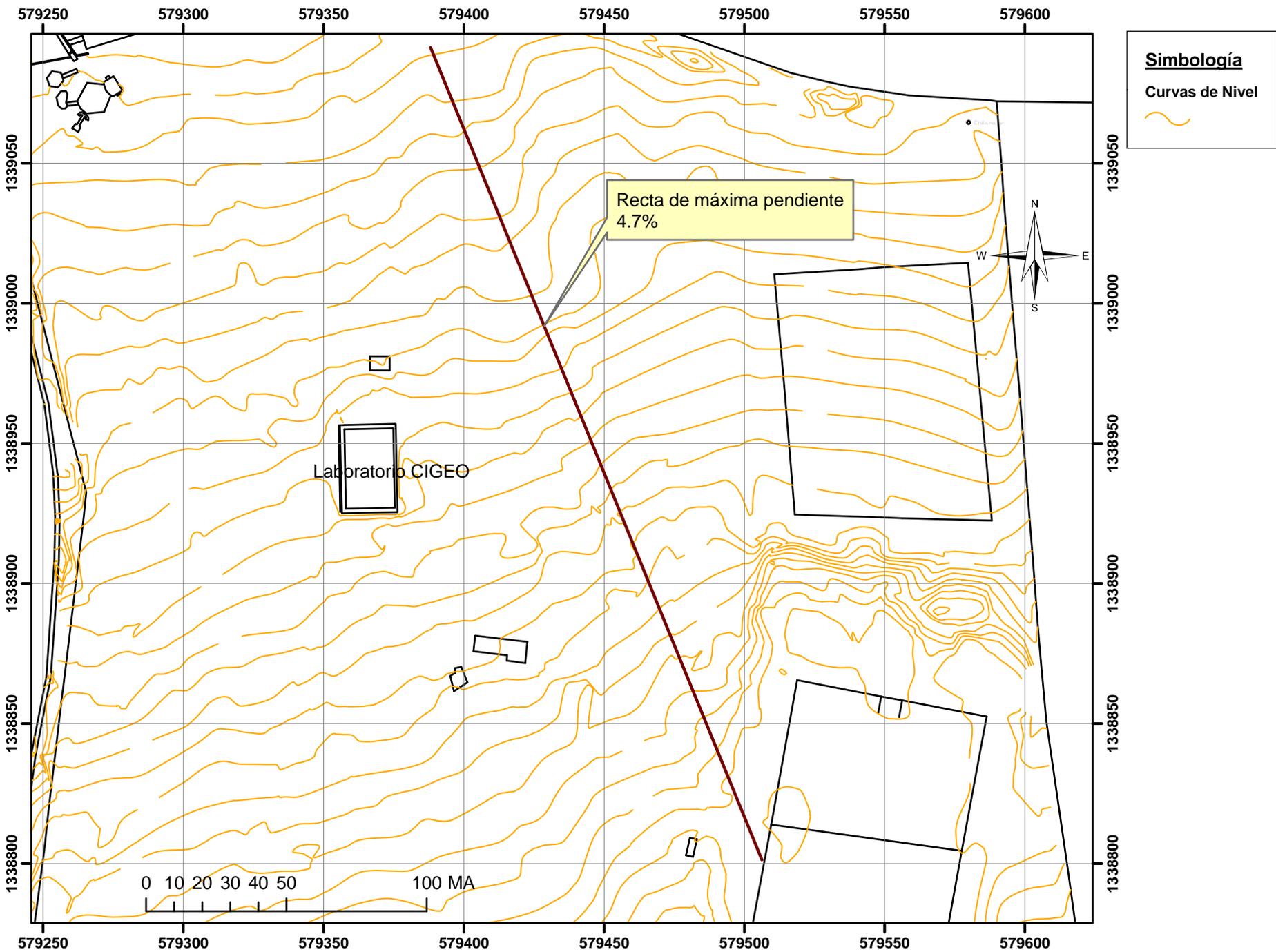
Sondeo: prs-7

Proyecto: CIGEO(UNAN).
 Localización: Recinto Rubén Darío UNAN-Managua
 Elevación superior (msnm): snm
 Profundidad del nivel freático (msnm):

Fecha de inicio de perforaciones: 12/01/06
 Fecha de finalización de las perforaciones: 19/01/06
 Método de perf. y muestreo: ASTM D 1586-99



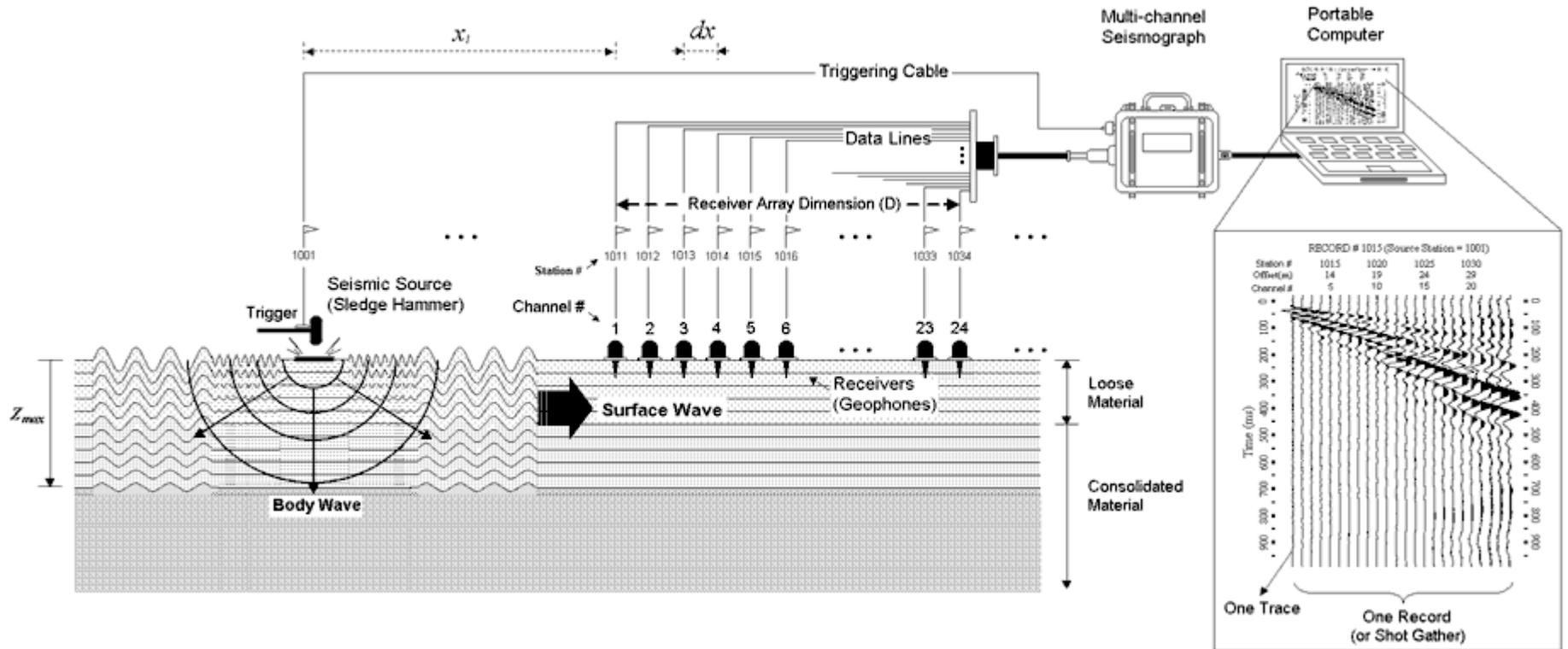
I - 6. Area Representativa para Determinar la Máxima Pendiente



I - 7 Sistema unificado de clasificación de suelos SUCS

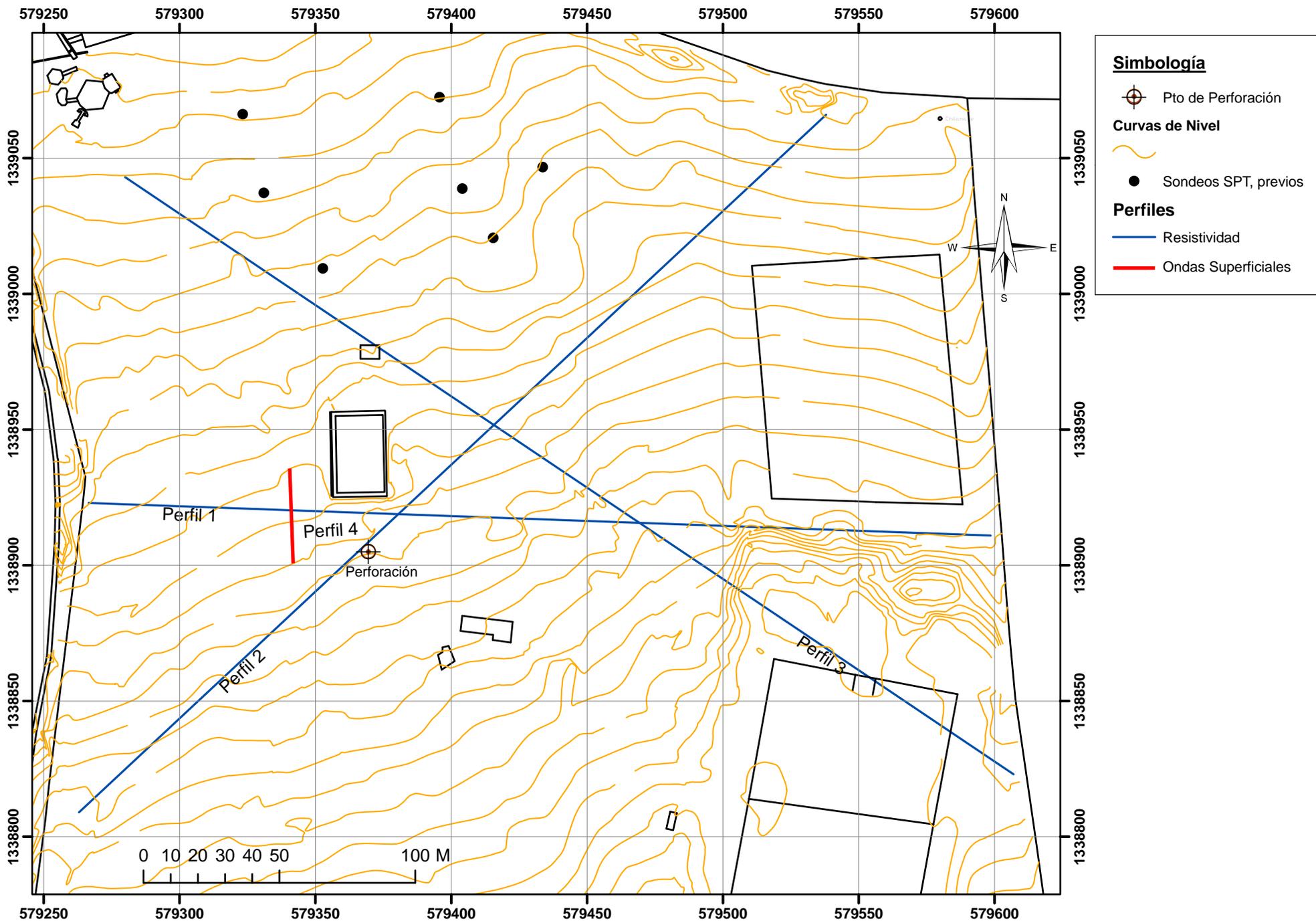
DIVISIONES PRINCIPALES		Símbolo del subgrupo	NOMBRES TÍPICOS	IDENTIFICACIÓN DE LABORATORIO	
<p style="text-align: center;">Suelos de grano grueso Mas de la mitad del material es retenido en el tamiz n° 200</p>	<p style="text-align: center;">Gravas Mas de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el Tamiz n° 4 (4.76 mm)</p>	Gravas limpias (sin o con pocos finos)	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava-arena, pocos finos o sin finos.	<p>Determinar porcentaje de grava y arena en la curva granulométrica, según el porcentaje de finos (fracción inferior al tamiz n° 200). Los suelos de granos gruesos se clasifican como sigue:</p> <p>$C_U = D_{60}/D_{10} > 4$ $C_C = (D_{30})^2/D_{10} \times D_{60}$ entre 1 y 3</p> <p>No cumplen con las especificaciones de granulometría para GW</p> <p>Límites de Atterberg debajo de la línea A o $IP < 4$</p> <p>Límites de Atterberg sobre la línea A con $IP > 7$</p> <p>Encima de línea A con IP entre 4 y 7 son casos límites que requieren doble símbolo.</p>
		GP	Gravas mal graduadas, mezcla de grava-arena, pocos finos o sin finos.		
		GM	Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo.		
		GC	Gravas arcillosas mezclas grava-arena-arcilla.		
	<p style="text-align: center;">Arenas Mas de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz n° 4 (4.76 mm)</p>	Arenas limpias (pocos o sin finos)	SW	Arenas bien graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.	<p>$C_U = D_{60}/D_{10} > 6$ $C_C = (D_{30})^2/D_{10} \times D_{60}$ entre 1 y 3</p> <p>Cuando no se cumplen simultáneamente las condiciones para SW</p> <p>Límites de Atterberg debajo de la línea A o $IP < 4$</p> <p>Límites de Atterberg sobre la línea A o $IP > 7$</p> <p>Los límites situados en la zona rayada con IP entre 4 y 7 son casos intermedios que precisan símbolo doble</p>
		SP	Arenas mal graduadas, arenas con grava, poco finos o sin finos		
		SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.		
		SC	Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla.		
<p style="text-align: center;">Suelos de granos Fino Mas de la mitad del Material pasa por el Tamiz n° 200</p>	<p style="text-align: center;">Limos y Arcillas LL < 50</p>	ML	Limos inorgánicos, y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosas, o limos arcillosos con ligera plasticidad.	<div style="text-align: center;"> <p style="text-align: center;">Abaco de Casagrande</p> </div>	
		CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas.		
		OL	Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas de baja plasticidad.		
	<p style="text-align: center;">Limos y Arcillas LL > 50</p>	MH	Limos inorgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos.		
		CH	Arcillas inorgánicas de plasticidad alta		
		OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a elevada, limos orgánicos.		
	Suelos muy orgánicos		PT		Turba y otros suelos de alto contenido orgánico.

I-8 Configuración General del método de ondas superficiales (MASW)



ANEXOS **II**

II-1 Ubicación de Perfiles de Resistividad y Ondas Superficiales



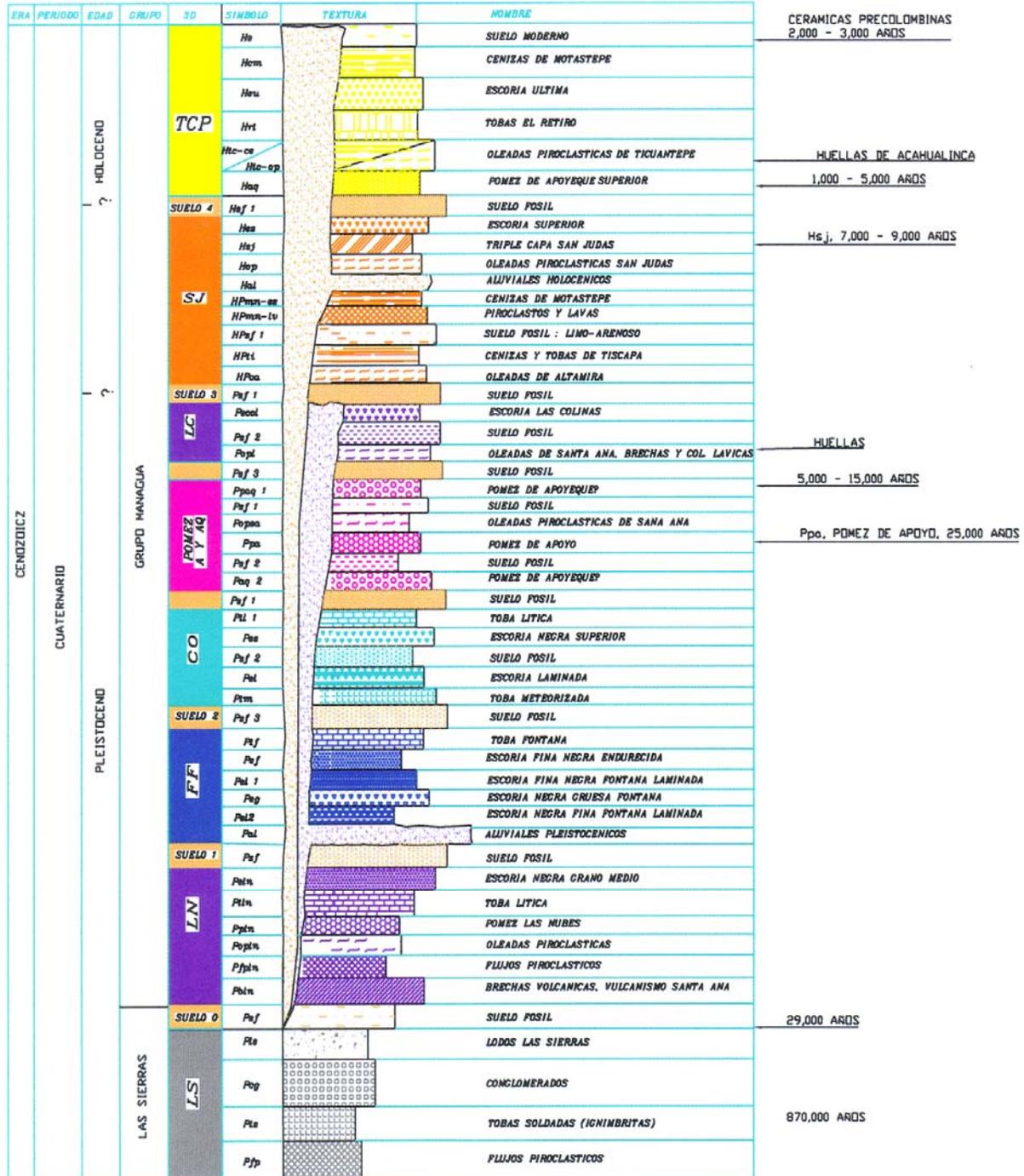
II-2 Comparación entre la clasificación granulométrica utilizada para rocas no-volcánicas (según Udden – Wentworth 1922) y volcánicas según Sohn y Cough (1989).

Tamaños de los clastos		Clasificación no-volcánica	Clasificación volcánica
mm.	phi.	Udden-Wentworth, 1922	Sohn y Cough, 1989
256	-8	Bloque	Bloque grueso
64	-6	Guija	Bloque fino
16	-4	Guijarro	Lapillo grueso
4	-2		Lapillo medio
2	-1	Granulo Arena muy gruesa	Lapillo fino
1/2	1	Arena gruesa Arena media	Ceniza gruesa
1/16	4	Arena fina Arena muy fina limo	Ceniza media
1/64	8	Arcilla	Ceniza fina

II-3. Propuesta de Columna Estratigráfica generalizada de Managua.

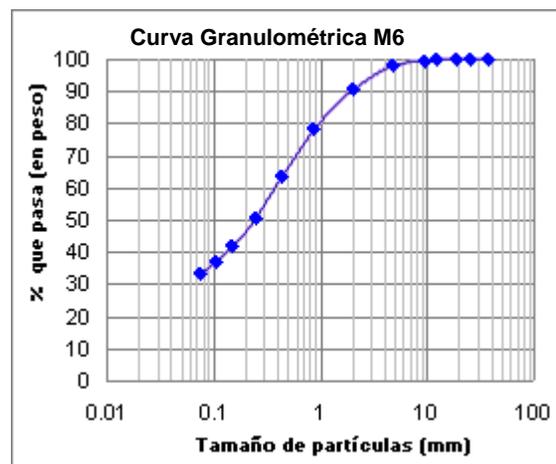
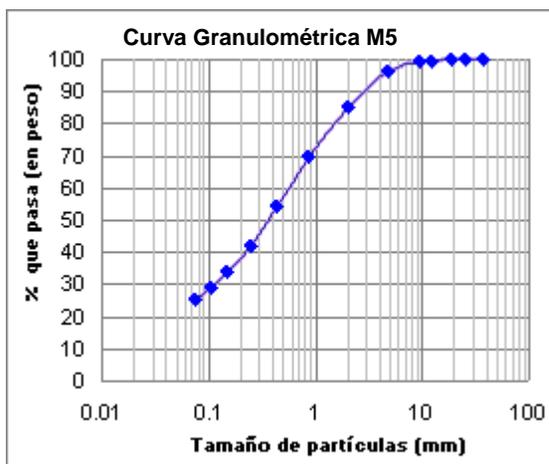
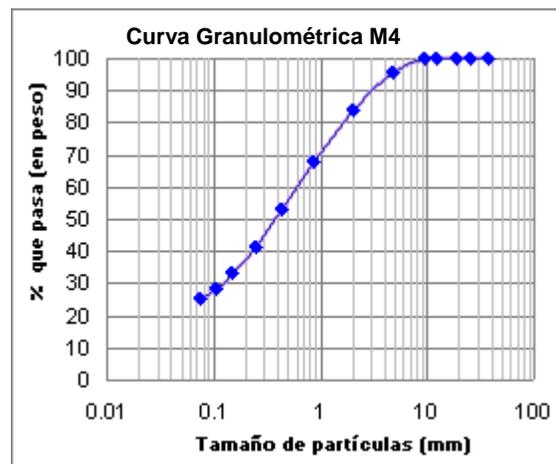
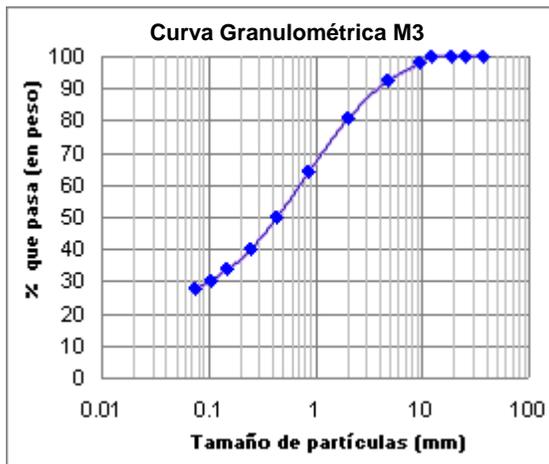
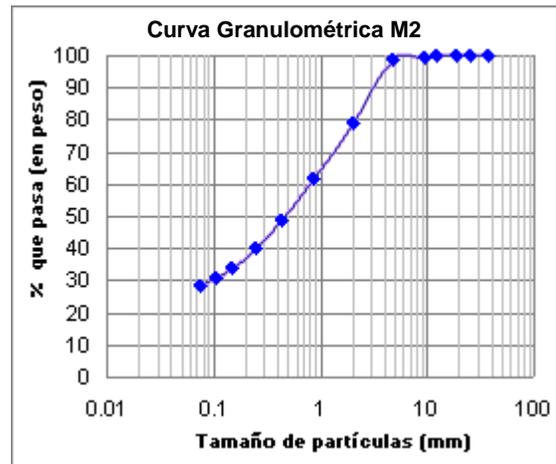
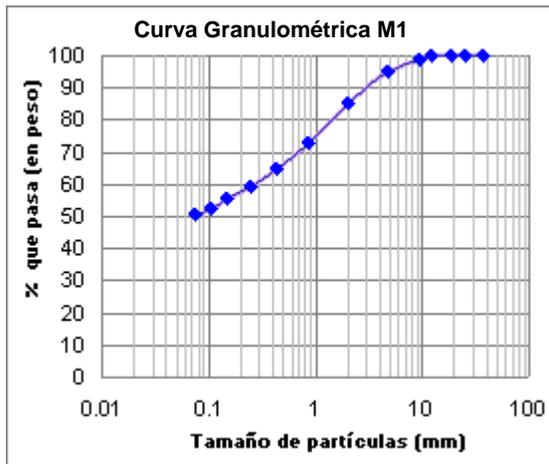
Fuente Rodríguez y Montenegro (2002)

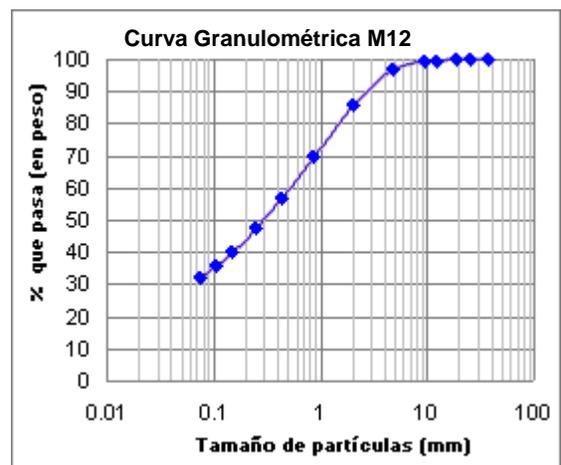
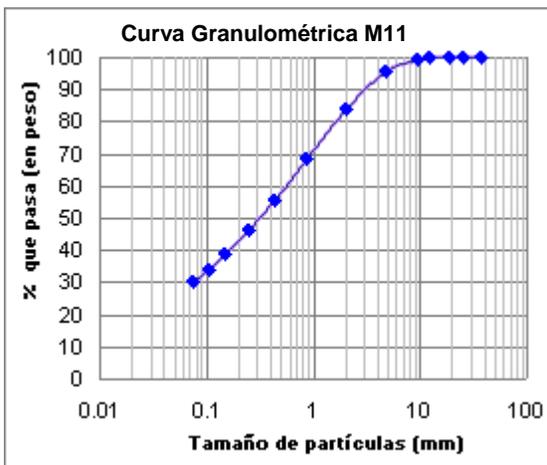
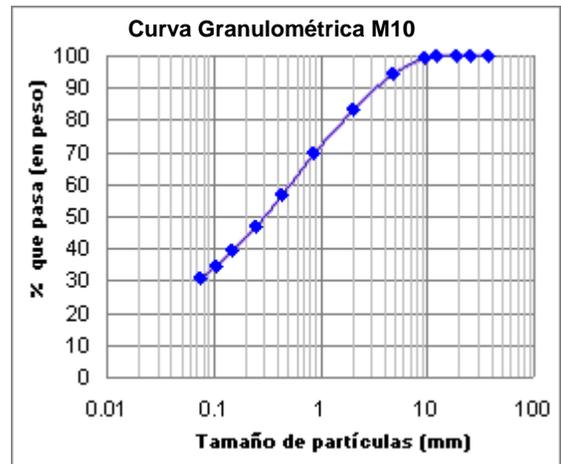
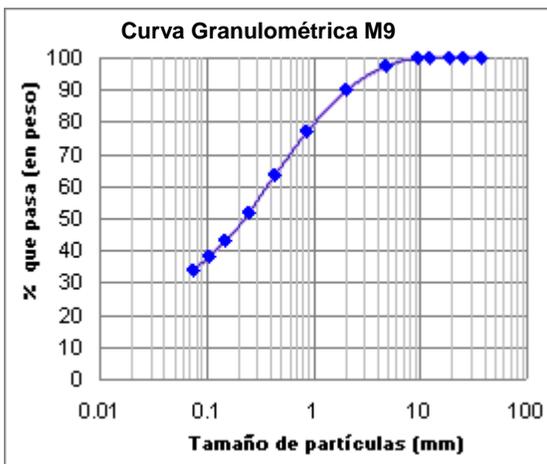
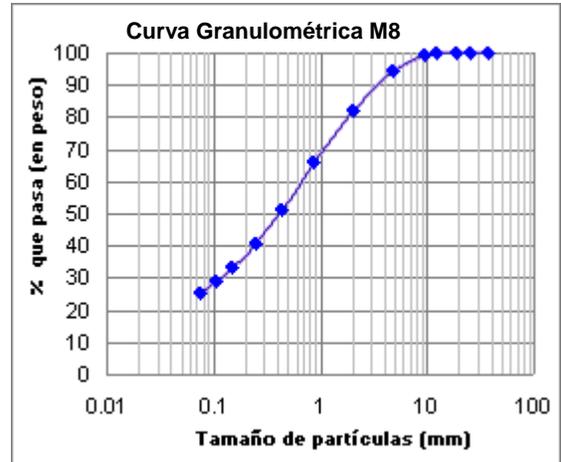
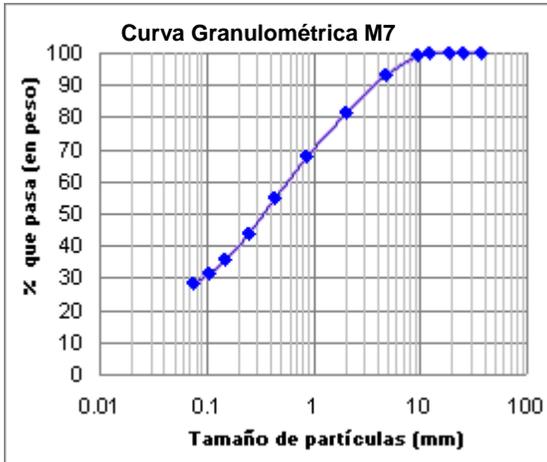
PROPUESTA DE COLUMNA LITOSTRATIGRAFICA

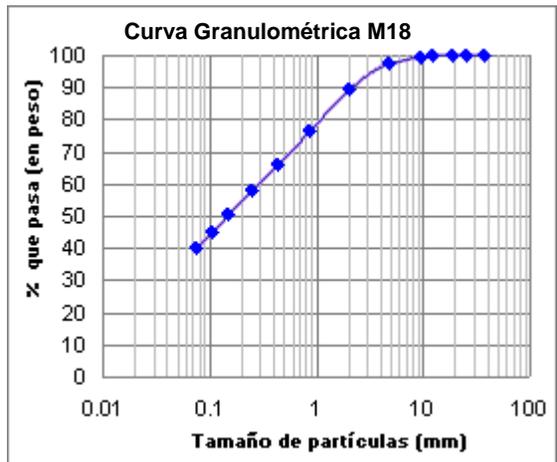
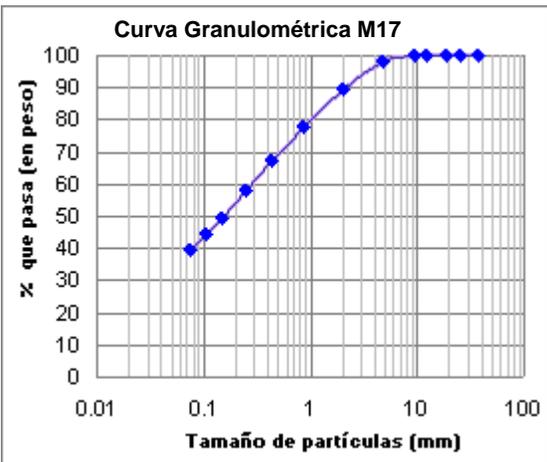
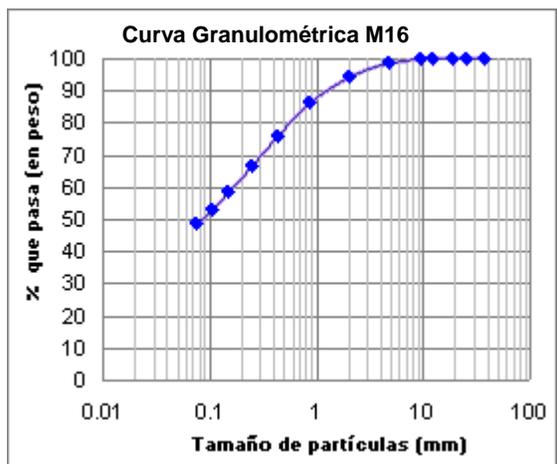
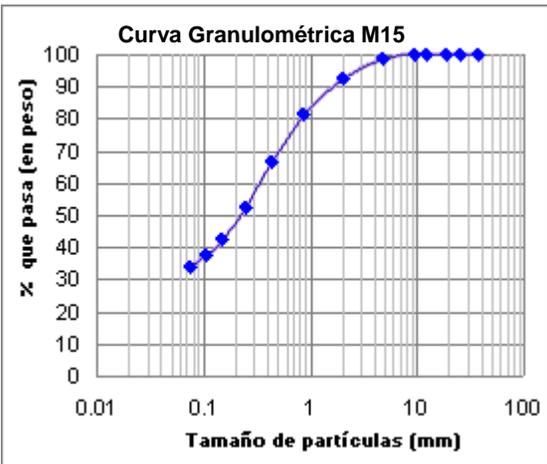
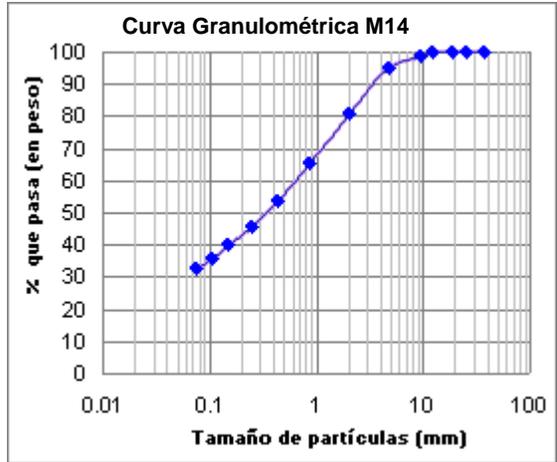
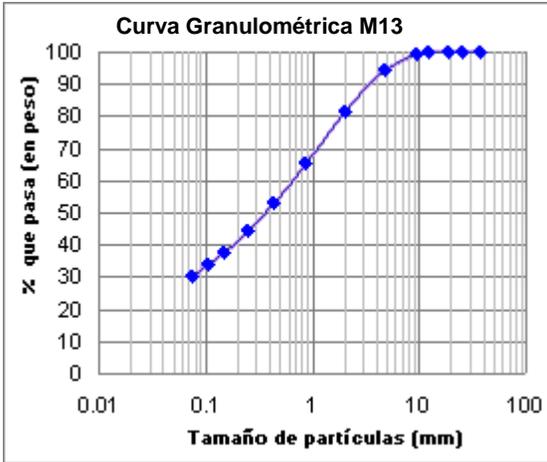


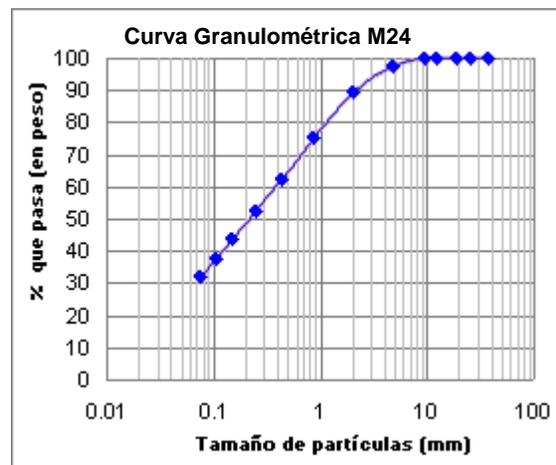
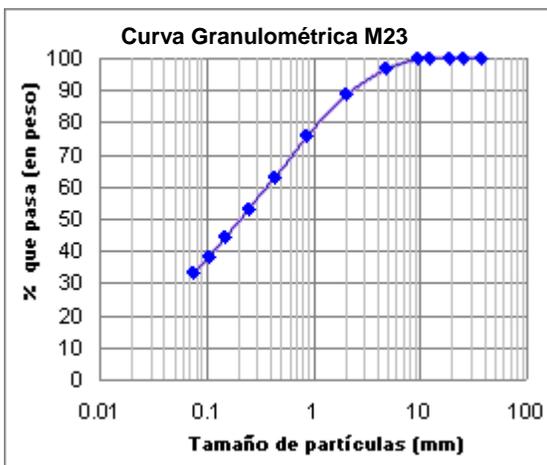
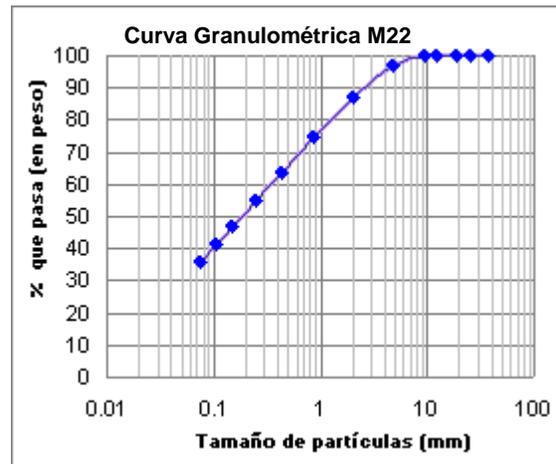
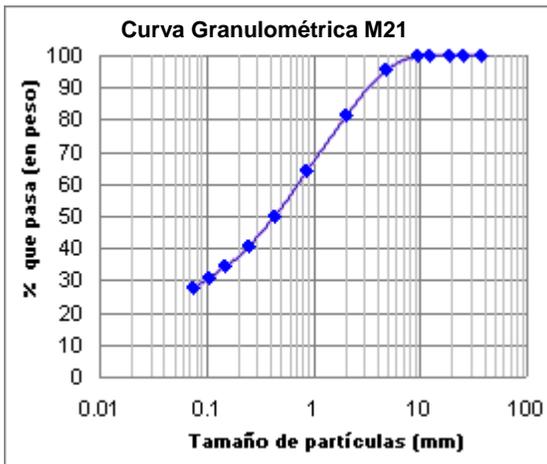
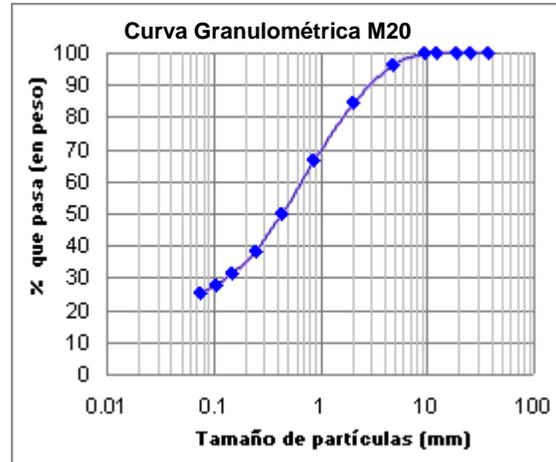
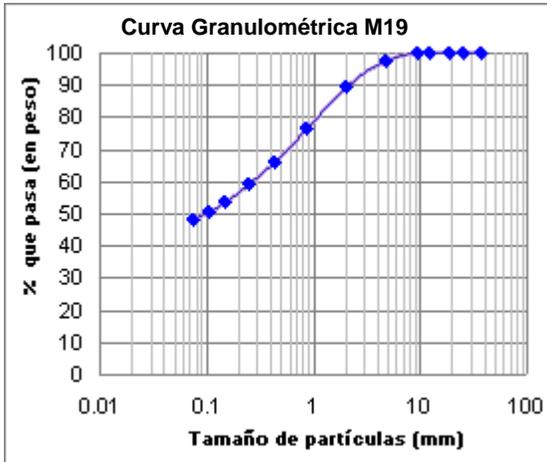
SERVICIO NACIONAL DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

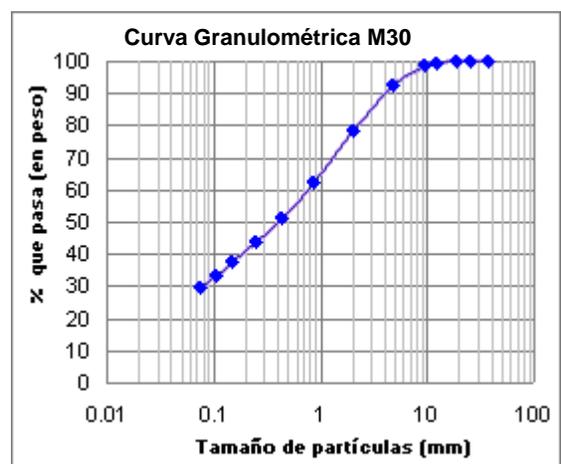
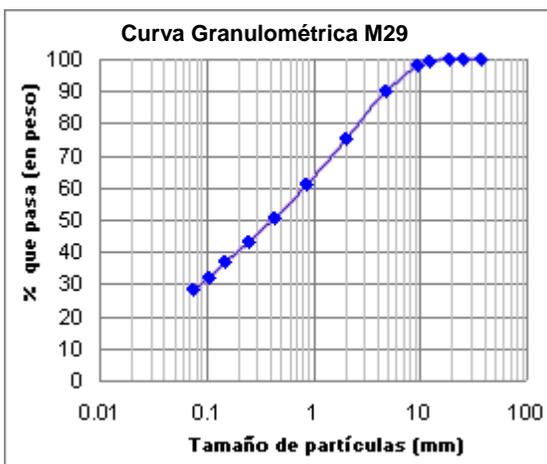
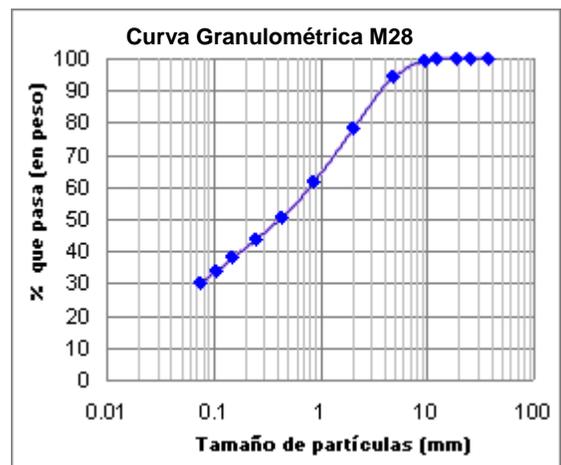
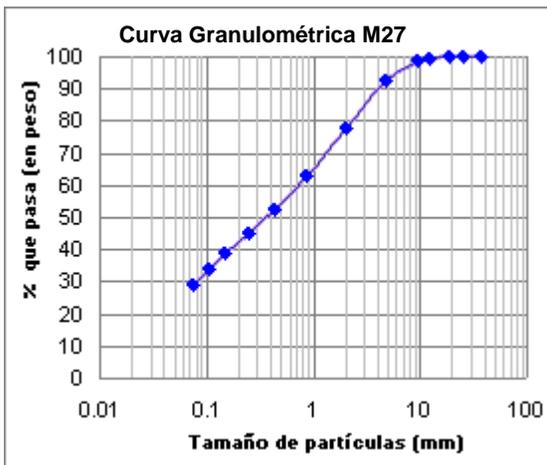
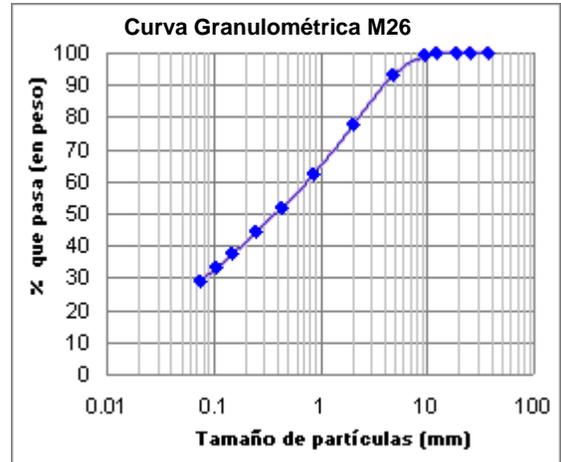
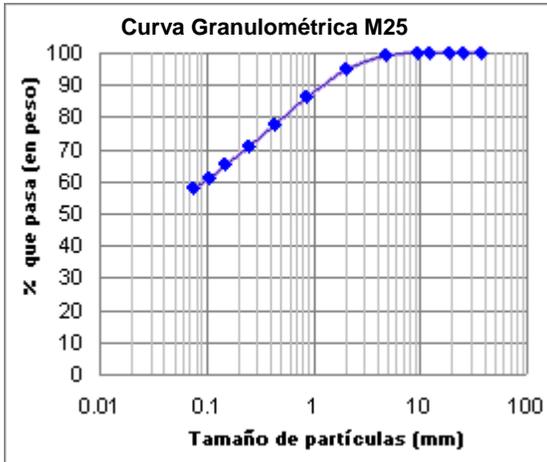
II-4. Curvas granulométricas obtenida para cada muestra

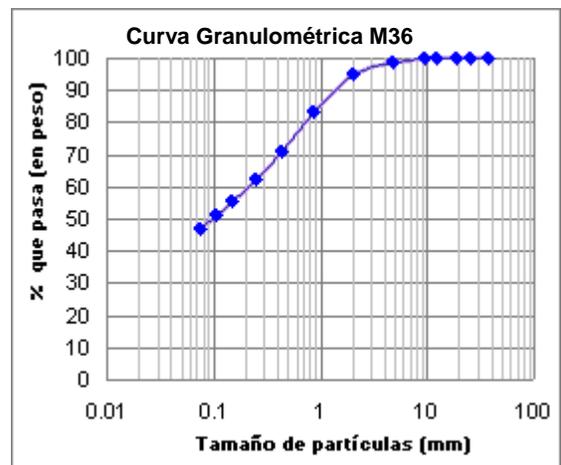
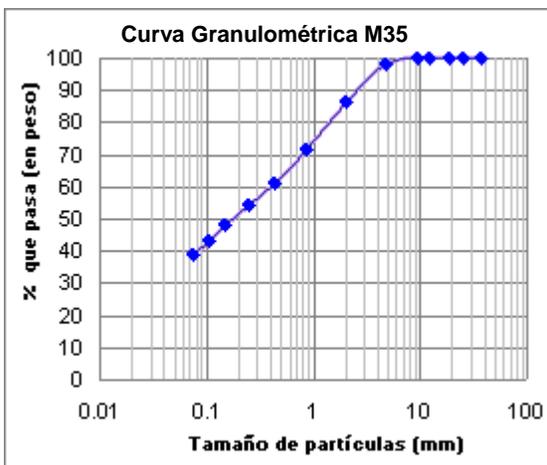
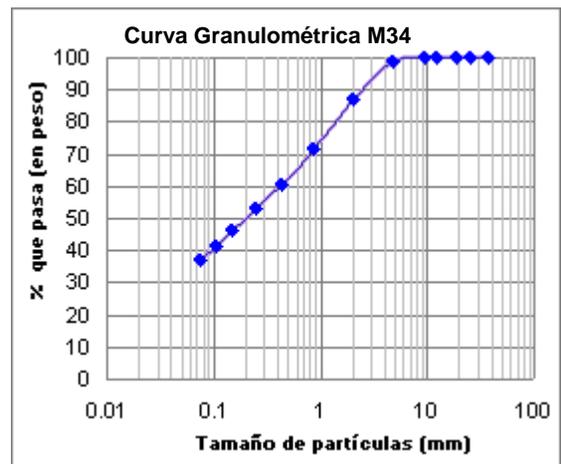
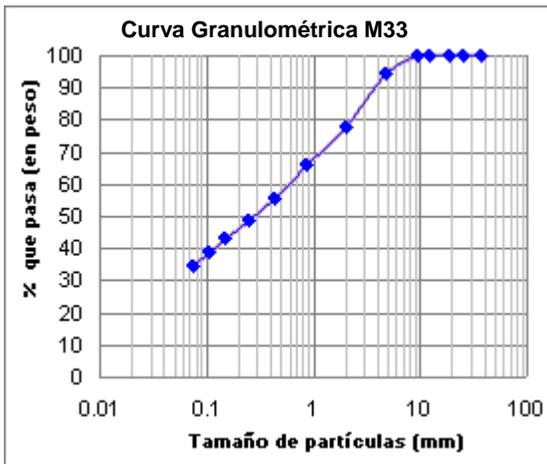
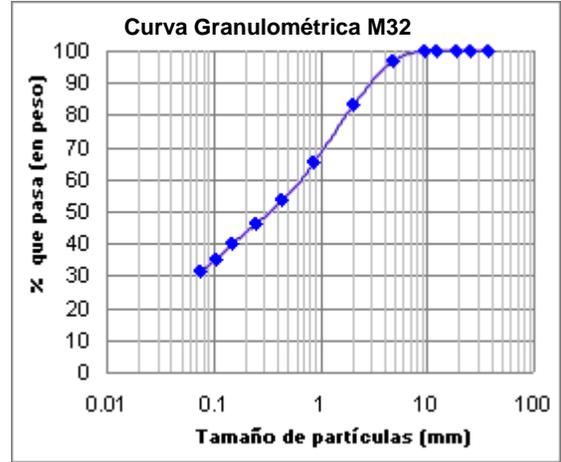
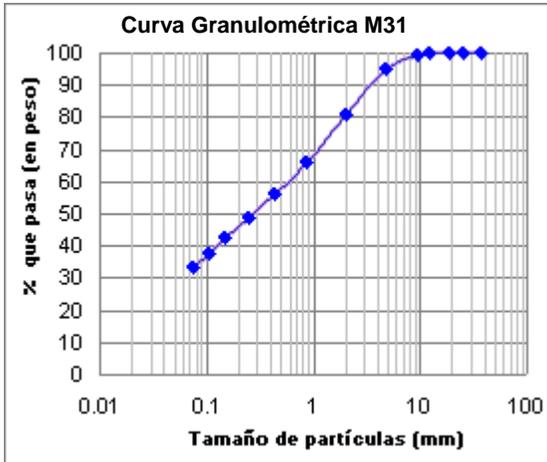


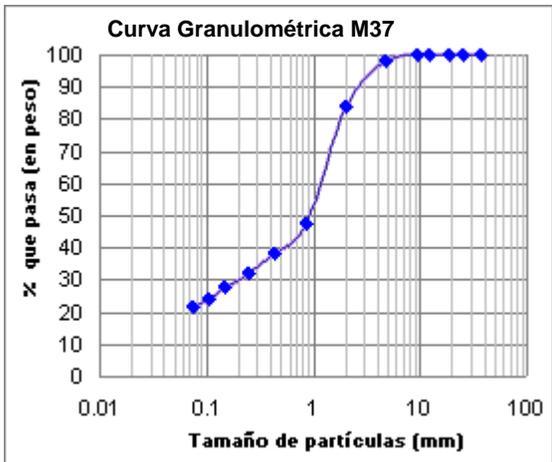












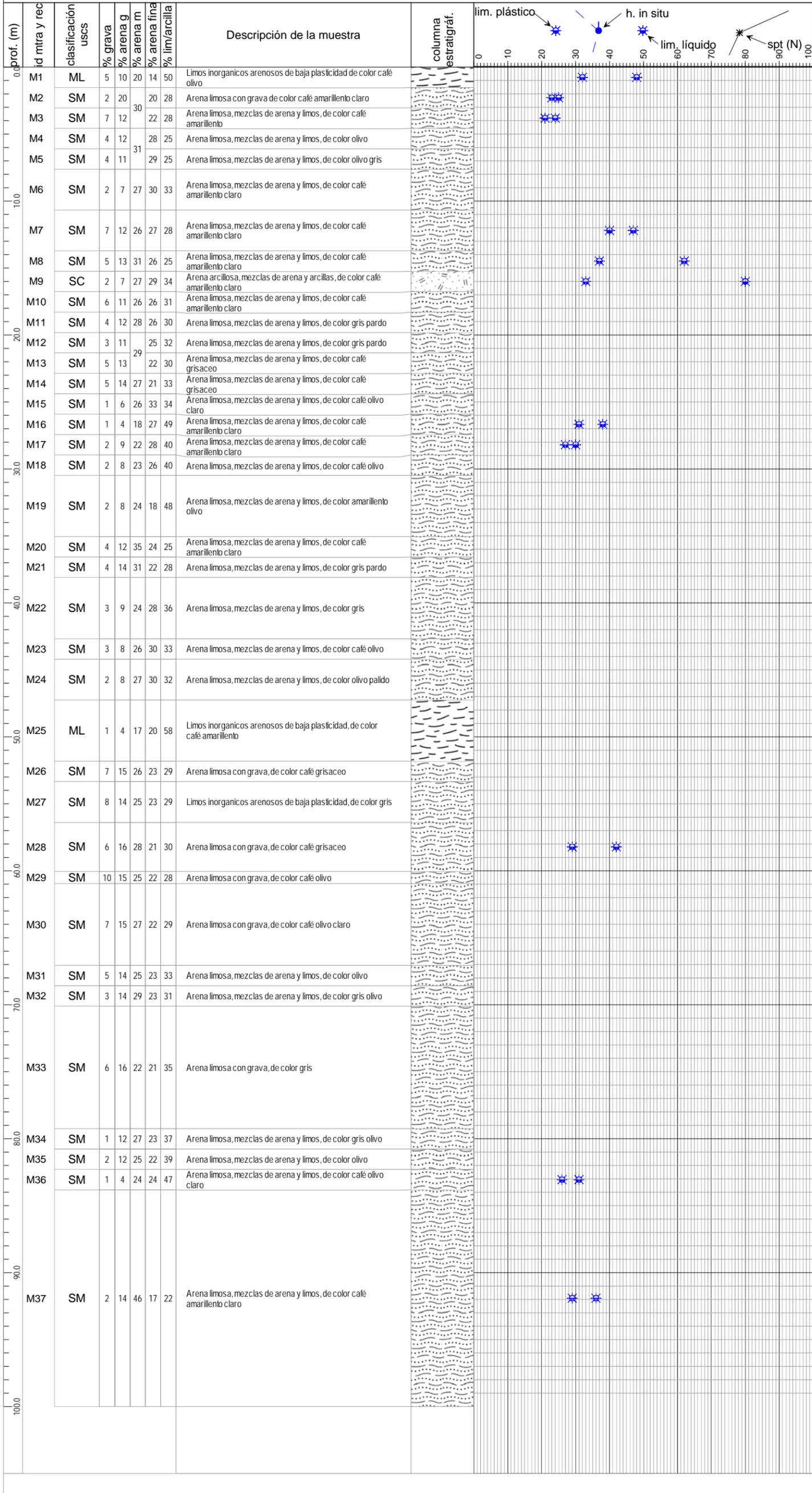
II-5 Perfil estratigráfico del pozo

Edad geológica	Profundidad (m)	Litología	Espesor	Descripción
Cuaternario	1.52 m	Hs	1.52m	Suelo moderno limo-arcilloso con alto contenido organico correspondiente al horizonte A, de color cafe olivo.
	3.04 m	Hal	1.52m	Material aluvial con alto contenido de limo y fragmentos líticos de diferentes composiciones, de color amarillento claro.
	6.09 m	Hrt (w)	3.05m	Deposito de ceniza volcánica alterada con fragmentos líticos de la misma composcion, de color olivo gris.
	9.14 m	Haq	3.05m	Deposito de ceniza volcánica gruesa alterada con pómez, de color cafe amarillento claro.
	12.19 m	Hsj	3.05m	Deposito de ceniza volcánica alterada con fragmentos líticos y fragmentos de lava tamaño lapilli, de color gris pardo.
	13.71 m	Peg	1.52m	Tefra fontana con moderado contenido de ceniza alterada tamaño lapilli, de color cafe amarillento claro.
	15.23 m	Peg	1.52m	Tefra fontana con moderado contenido de ceniza alterada a limo tamaño lapilli, de color cafe amarillento claro.
	16.75 m	Psf 1	1.52m	Suelo limoso con fragmentos de arenas de diferentes composiciones, lavas volcanica y líticos, de color cafe amarillento claro.
	19.80 m	Ptm	3.05m	Ceniza volcánica alterada con fragmentos de lava tamaño lapilli, de color gris pardo.
	25.90 m	Pag 2	6.1m	Ceniza volcánica alterada con fragmentos de lava y pómez, mayor concentración de tamaños grueso lapilli, de color cafe olivo claro.
	27.42 m	Paf 1	1.52m	Suelo limo-arcilloso de color cafe amarillento claro.
	30.46 m	Ptm	1.52m	Ceniza volcánica alterada con limos y fragmentos líticos, de color cafe amarillento claro.
		Ptl	1.52m	Ceniza volcanica con fragmentos líticos de lava, de color cafe olivo.
	31.98 m	Paf 2	1.52m	Suelo limoso con líticos de lava, de color amarillo olivo.
	33.50 m	Paf 3	1.52m	Suelo limoso de color amarillo olivo.
	35.02 m		1.52m	Suelo limoso con líticos redondeados, de color cafe claro.
	36.54 m	Ptm	1.52m	Ceniza volcánica (convirtiendose a suelo) lapilli fino con fragmentos de lava, de color cafe amarillento claro.
	39.59 m		3.05m	Ceniza con abundante lapilli fina, de color gris pardo.
	42.64 m	Ptl	3.05m	Ceniza de color gris.
	44.16 m		1.52m	Suelo limoso cafe olivo.
	47.21 m		3.05m	Ceniza de color olivo palido.
	50.26 m	Psf	3.05m	Suelo limo-arcilloso de color cafe amarillento.
	51.78 m		1.52m	Suelo limoso de color cafe amarillento.
	53.30 m		1.52m	Ceniza alterada con fragmentos lapilli fino, de color cafe grisaceo.
	56.35 m	Ptln	3.05m	Ceniza con fragmentos lapilli fino, de color gris.
	57.87 m		1.52m	Ceniza alterada de color cafe grisaceo.
	67.01 m	Paf 1	9.14m	Suelo limoso-arenoso con alto contenido de arcilla, limo y grava, de color cafe olivo claro.
	80.73 m	Ptl 1	13.72m	Ceniza volcánica con pequeños fragmentos tamaño lapilli, de color gris olivo.
	82.25 m	Ptl	1.52m	Ceniza volcánica de color olivo.
	86.82 m	Paf	4.57m	Suelo arenoso con alto contenido de grava, de color cafe olivo claro.
92.92 m	Pal	6.1m	Suelo limo-arenoso con poca arcilla de alta consistencia, de color cafe amarillento claro.	
100 m	Paf	7.04m	Suelo limo-arcilloso con alto contenido de arena con pequeños fragmentos de lava, de color cafe amarillento claro.	

II-6 Columna Estratigráfica Geotécnica Sondeo: P1

Proyecto: Instalación de arreglo vertical
 Localización del proyecto: Ver mapa de localización
 Ubicación de sondeo: 579367, 1338938
 Elevación superior (msnm): 174
 Elevación o profundidad de agua freática: n/a

Ingeniero supervisor: Edwin Obando
 Ingeniero de campo: Samuel Sevilla Cano
 Fecha y hora de inicio: 24/11/07; 16:15
 Fecha y hora de fin: 20/12/07; 13:20
 Método de perf. y muestreo: Percusión



II-7 Perfil general obtenido de la caracterización

Prof. (m)	Estrato	Espesor (m)	USCS	P. U. (kN/m3)	Vs (m/s)	Resistividad (Ω m)
1.52	1	1.52	ML	12.49	300	72 - 140
3.05	2	1.52	SM	14.14	200	72 - 140
4.57	3	1.52	SM	16.65	200	140 - 270
6.1	4	1.52	SM	17.13	400	140 - 270
7.62	5	1.52	SM	17.06	400	270 - 1000
10.67	6	3.05	SM	13.56	400	1000
13.72	7	3.05	SM	12.67	490	1000
15.24	8	1.52	SM	15.33	490	1000
16.76	9	1.52	SC	14.26	500	1000
18.29	10	1.52	SM	15.23	500	1000
19.81	11	1.52	SM	14.87	500	1000
21.34	12	1.52	SM	15.39	500	1000
22.86	13	1.52	SM	15.34	500	1000
24.38	14	1.52	SM	14.33	500	1000
25.91	15	1.52	SM	14.10	630	270 - 370
27.43	16	1.52	SM	11.90	630	190 - 270
28.96	17	1.52	SM	12.71	630	72 - 190
30.48	18	1.52	SM	14.12	630	72 - 190
35.05	19	4.57	SM	12.98	780	72 - 190
36.58	20	1.52	SM	15.17	780	72 - 190
38.1	21	1.52	SM	15.51	780	72 - 190
42.67	22	4.57	SM	15.20	780	72 - 190
44.2	23	1.52	SM	12.85	780	72 - 140
27.24	24	3.05	SM	13.32	800	72 - 140
51.82	25	4.57	ML	12.46	800	52 - 72
53.34	26	1.52	SM	15.54	800	37 - 52
56.39	27	3.05	SM	16.13	800	37 - 52
60.05	28	3.66	SM	17.00	990	37 - 52
60.96	29	0.91	SM	15.93	990	nm
67.06	30	6.1	SM	16.49	990	nm
68.58	31	1.52	SM	15.57	990	nm
70.1	32	1.52	SM	16.14	990	nm
79.25	33	9.14	SM	16.06	1700	nm
80.77	34	1.52	SM	13.94	1700	nm
82.3	35	1.52	SM	13.08	1700	nm
83.82	36	1.52	SM	13.27	1700	nm
99.97	37	16.15	SM	13.41	1700	nm

nm: valor no medido

	Material 1
	Material 2
	Material 3