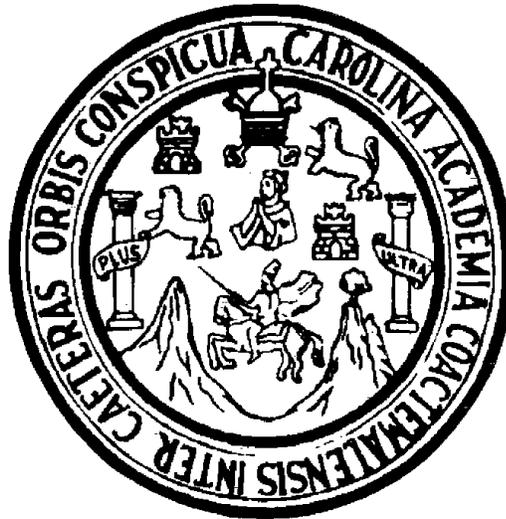


**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE  
CARRERA DE GEOLOGÍA**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN**



**TESIS:**

**“Uso de Refracción Sísmica y Análisis Multicanal de Ondas Superficiales  
para la determinación de módulos elásticos, en la finca Viento Blanco, San  
Vicente Pacaya, Escuintla”**

**JULIO NERY MENDOZA SANTA MARÍA**

**COBÁN, ALTA VERAPAZ, NOVIEMBRE DE 2 015**

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE  
CARRERA DE GEOLOGÍA**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN**

**TÉSIS**

**“Uso de Refracción Sísmica y Análisis Multicanal de Ondas Superficiales  
para la determinación de módulos elásticos, en la finca Viento Blanco, San  
Vicente Pacaya, Escuintla”**

**PRESENTADO AL HONORABLE CONSEJO DIRECTIVO DEL CENTRO  
UNIVERSITARIO DEL NORTE**

**POR  
JULIO NERY MENDOZA SANTA MARÍA  
CARNÉ 200940030**

**COMO REQUISITO PREVIO A OPTAR AL TÍTULO DE GRADO  
DE INGENIERO GEÓLOGO**

**COBÁN, ALTA VERAPAZ, OCTUBRE DE 2 015**

## **AUTORIDADES UNIVERSITARIAS**

### **RECTOR MAGNÍFICO**

Dr. Carlos Guillermo Alvarado Cerezo

### **CONSEJO DIRECTIVO**

PRESIDENTE: Lic. Zoot. M.A. Fredy Giovani Macz Choc  
SECRETARIA: Lic. T.S. Floricelda Chiquin Yoj  
REPRESENTANTE DE DOCENTES: Ing. Geol. César Fernando Monterroso Rey  
REPRESENTANTE EGRESADOS: Ing. Agro. Julio Oswaldo Méndez Morales  
REPRESENTANTES ESTUDIANTILES: Br. Fredy Enrique Gereda Milián  
PEM. César Oswaldo Bol Cú

### **COORDINADOR ACADÉMICO**

Lic. Zoot. Erwin Gonzalo Eskenasy Morales

### **COORDINADOR DE LA CARRERA**

Ing. Geol. Sergio David Morán Ical

### **COMISIÓN DE TRABAJOS DE GRADUACIÓN**

**COORDINADOR:** Ing. MSc. Bernie Gamaliel Castillo Moeschler  
**SECRETARIA:** Inga. Geol Silvia Fríne Cortez Bendfeldt  
**VOCAL:** Ing. MSc. Osmín Jared Vásquez Hernández

### **REVISOR DE REDACCIÓN Y ESTILO**

Ing. Geol. Rircardo Enrique Milán de la Cruz

### **REVISOR DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**

Ing. MSc. Osmín Jared Vásquez Hernández

### **ASESORA**

Inga. Geol Silvia Fríne Cortez Bendfeldt

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



02 de julio de 2015

**CENTRO UNIVERSITARIO  
DEL NORTE – CUNOR –  
CARRERA GEOLOGÍA**

Código Postal 16001 – Cobán, Alta Verapaz  
Telefax: 7952-1064 y 7956-6600 Ext. 209  
Guatemala, C. A.  
E-mail: [geologiausac@gmail.com](mailto:geologiausac@gmail.com)

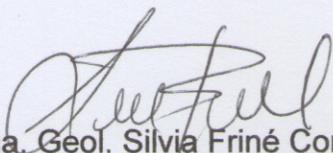
Señores  
Comisión Trabajos de Graduación  
Carrera Geología  
CUNOR

Respetables Señores:

Por este medio informo a ustedes que he procedido a la **ASESORÍA** del informe final de Trabajo de Graduación del **T.U. GEOL. JULIO NERY MENDOZA SANTA MARÍA**, carné No. **200940030**, titulado: **“USO DE REFRACCIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES PARA LA DETERMINACIÓN DE MÓDULOS ELÁSTICOS, EN LA FINCA VIENTO BLANCO, SAN VICENTE PACAYA, ESCUINTLA”**, el cual considero llena los requisitos establecidos para su aprobación, por lo que someto a consideración de ustedes dicho informe.

Atentamente

**“ID Y ENSEÑAD A TODOS”**

  
Inga. Geol. Silvia Friné Cortez Bendfeldt  
Docente Asesora  
Carrera Geología, CUNOR



c.c. archivo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



**CENTRO UNIVERSITARIO  
DEL NORTE – CUNOR –  
CARRERA GEOLOGÍA**

Código Postal 16001 – Cobán, Alta Verapaz

Telefax: 7952-1064 y 7956-6600 Ext. 209

Guatemala, C. A.

E-mail: [geologiausac@gmail.com](mailto:geologiausac@gmail.com)

Ref. 15-CG-276/2015  
18 de agosto de 2015.

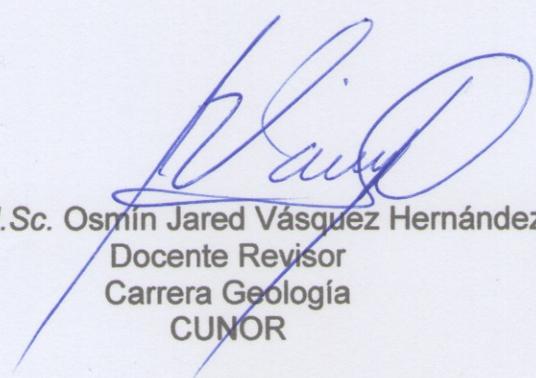
Señores  
Comisión Trabajos de Graduación  
Carrera Geología  
CUNOR

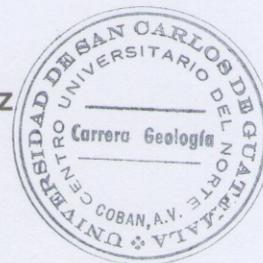
Respetables Señores:

Por este medio informo a ustedes que he procedido a la **REVISIÓN** del informe final de Trabajo de Graduación del T.U. **GEOL. JULIO NERY MENDOZA SANTA MARÍA**, carné No. **200940030**, titulado: **“USO DE REFRACCIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES PARA LA DETERMINACIÓN DE MÓDULOS ELÁSTICOS, EN LA FINCA VIENTO BLANCO, SAN VICENTE PACAYA, ESCUINTLA”**, el cual considero llena los requisitos establecidos para su aprobación, por lo que someto a consideración de ustedes dicho informe.

Atentamente

**“ID Y ENSEÑAD A TODOS”**

  
Ing. M.Sc. Osmín Jared Vásquez Hernández  
Docente Revisor  
Carrera Geología  
CUNOR



c.c. archivo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



**CENTRO UNIVERSITARIO  
DEL NORTE – CUNOR –  
CARRERA GEOLOGÍA**

Código Postal 16001 – Cobán, Alta Verapaz

Telefax: 7952-1064 y 7956-6600 Ext. 209

Guatemala, C. A.

E-mail: [geologiausac@gmail.com](mailto:geologiausac@gmail.com)

Ref. 15-CG-373/2015  
07 de octubre de 2015.

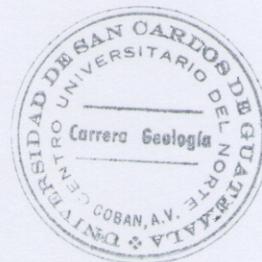
Señores  
Comisión Trabajos de Graduación  
Carrera Geología  
CUNOR

Respetables Señores:

Por este medio remito el informe Final de Trabajo de Graduación a nivel de grado titulado: **“USO DE REFRACCIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES PARA LA DETERMINACIÓN DE MÓDULOS ELÁSTICOS, EN LA FINCA VIENTO BLANCO, SAN VICENTE PACAYA, ESCUINTLA”**, realizado por el (la) T.U. GEOL. JULIO NERY MENDOZA SANTA MARÍA, carné No. **200940030**, el cual ya fue revisado por la **COMISIÓN DE REDACCIÓN Y ESTILO** de la Carrera de Geología, quienes consideramos llena los requisitos establecidos para su aprobación.

**“ID Y ENSEÑAD A TODOS”**

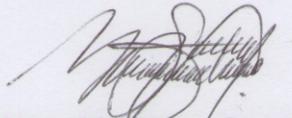
Ing. Geol. Ricardo Enrique Milián de la Cruz  
Comisión Redacción y Estilo  
Carrera Geología, CUNOR



c.c. archivo

### HONORABLE COMITÉ EXAMINADOR

En cumplimiento a lo establecido por los estatutos de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a consideración de ustedes el trabajo de graduación titulado, **“Uso de Refracción Sísmica y Análisis Multicanal de Ondas Superficiales para la determinación de módulos elásticos, en la finca Viento Blanco, San Vicente Pacaya, Escuintla”** como requisito previo a optar al título profesional de Ingeniero Geólogo



Julio Nery Mendoza Santa María  
Carné No. 200940030

## **RESPONSABILIDAD**

“La responsabilidad del contenido de los trabajos de graduación es: Del estudiante que opta al título, del asesor y del revisor; la Comisión de Redacción y Estilo de cada carrera, es la responsable de la estructura y la forma”.

Aprobado en punto SEGUNDO, inciso 2 .4, subinciso 2.4.1 del Acta No. 17-2012 de Sesión extraordinaria de Consejo Directivo de fecha 18 de julio del año 2012.

## AGRADECIMIENTOS

A Dios padre creador del Universo por el don de la vida, por iluminarme, fortalecerme, guiarme y mostrarme el camino correcto en la vida.

A mis padres, Julio Arnoldo y Nurian Suzette por su sacrificio, apoyo, ejemplo, comprensión y paciencia brindada en la realización de cada una de mis metas.

A mi hermana por el apoyo incondicional en cada etapa de mi vida.

A mis abuelitos con mucho cariño por su ejemplo y sabios consejos de vida.

A mis tíos por su cariño, respeto y apoyo incondicional brindado.

Al Ing. Juan Pablo Ligorria y Ing.. Luis Felipe López, por el apoyo incondicional y los conocimientos brindados para la elaboración de la presente investigación

A mi novia por su apoyo incondicional

A mis amigos y compañeros de estudio por los buenos momentos compartidos, las enseñanzas y muestras de aprecio en los momentos débiles de la vida.

A la Universidad de San Carlos de Guatemala, especialmente al Centro Universitario del Norte, por permitirme alcanzar mis metas en mi formación académica

A la carrera de Geología y cada uno de los catedráticos que la conforman, por las enseñanzas y guía en las distintas áreas de la misma, sin lo cual, no hubiese sido posible la culminación de la presente investigación.

A todos ellos muchas gracias  
El autor.

## ÍNDICE

RESUMEN	v
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3

### CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes	5
1.2 Planteamiento Del Problema	6
1.3 Justificación	6
1.4 Hipótesis	7
1.5 Variables	7
1.5.1 Variables Independientes	7
1.5.2 Variables Dependientes	7
1.6 Alcances y Límites	7
1.6.1 Alcances	7
1.6.2 Limites Espacial y Temporal	8
1.7 Localización y Extensión	8
1.7.1 Accesos	10
1.8 Revisión de Literatura	10
1.8.1 Teoría de la elasticidad	10
1.8.2 Teoría de ondas	11
1.8.3 Leyes que rigen la propagación de ondas sísmicas	12
1.8.4 Propagación de Ondas	14
1.8.5 Ondas de compresión	14
1.8.6 Ondas de corte	15
1.8.7 Ondas superficiales	16
1.8.8 Módulos elásticos	20
1.8.8.1 Módulo de Young	20
1.8.8.2 Módulo de Poisson	21
1.8.8.3 Módulo de rigidez	22
1.8.8.4 Módulo de Bulk	22
1.8.9 Métodos sísmicos	23
1.8.9.1 Sísmica de refracción	25
1.8.9.2 Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW)	28

## **CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA**

<b>2.1</b> Metodología	31
<b>2.1.1</b> Etapa de diagnóstico y bibliográfica	31
<b>2.1.2</b> Etapa Campo	31
<b>2.1.3</b> Etapa gabinete o procesamiento de datos	34

## **CAPÍTULO 3**

### **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

<b>3.1</b> Geología Local	41
<b>3.2</b> Refracción Sísmica y <i>MASW</i>	43
<b>3.2.1</b> Sitio No. 1	48
<b>3.2.2</b> Sitio No. 2	50
<b>3.2.3</b> Sitio No. 3	52
<b>3.2.4</b> Sitio No. 4	54
<b>3.2.5</b> Sitio No. 5	56
<b>3.2.6</b> Sitio No. 6	58
<b>3.2.7</b> Sitio No. 7	60
<b>3.3</b> Módulos Elásticos	62
<b>3.3.1</b> Módulos Elásticos del sitio No. 1	62
<b>3.3.2</b> Módulos Elásticos del sitio No. 2	64
<b>3.3.3</b> Módulos Elásticos del sitio No. 3	65
<b>3.3.4</b> Módulos Elásticos del sitio No. 4	67
<b>3.3.5</b> Módulos Elásticos del sitio No. 5	68
<b>3.3.6</b> Módulos Elásticos del sitio No. 6	70
<b>3.3.7</b> Módulos Elásticos del sitio No. 7	71

<b>CONCLUSIONES</b>	73
---------------------	----

<b>3.4</b> Conclusión General	73
<b>3.5</b> Conclusiones Específicas	73

<b>RECOMENDACIONES</b>	75
------------------------	----

<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	77
---------------------	----

<b>ANEXOS</b>	79
---------------	----

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>1</b> a) Ley de Snell; b) Principio de Huygens	14
<b>2</b> Modelo de propagación de ondas P	15
<b>3</b> Modelo de Propagación de Onda S	16
<b>4</b> Velocidades de propagación normalizadas segun la velocidad de ondas de corte	17
<b>5</b> Modelo de propagación onda de Rayleigh	18
<b>6</b> Desplazamiento en la superficie de un semiespacio homogéneo; (a) movimiento horizontal radial; (b) movimiento vertical; (c) sentido de ondas de Rayleigh	19
<b>7</b> Modelo de dos capas, ondas de menos longitud de onda viajaran por el estrato superior de menor rigidez mientras que las de mayor longitud de onda viajaran a través de ambos estratos.	20
<b>8</b> Principio matemático del módulo de Young	21
<b>9</b> Principio matemático módulo de Poisson	21
<b>10</b> Principio matemático del módulo de rigidez	22
<b>11</b> Principio matemático del módulo de Bulk	23
<b>12</b> Modelo de generación y registro de ondas	24
<b>13</b> Esquema de ensayos superficiales	24
<b>14</b> Modelo de propagación de las ondas P para dos capas horizontales de parámetros Z y $V_{p2} = 2 V_{p1}$ .	26
<b>15</b> Esquema de análisis para hallar la profundidad de los estratos	27
<b>16</b> Onda Rayleigh	28
<b>17</b> Curva de Dispersión	29
<b>18</b> Adquisición de datos de campo	33
<b>19</b> Procesamiento de Refracción Sísmica	35
<b>20</b> Análisis Multicanal de Ondas Superficiales(MASW)	36
<b>21</b> Dromocronas y perfil de velocidades de Onda P No.1	48
<b>22</b> Estratigrafía de capas y de profundidad vs velocidad de onda P y onda S del perfil sísmico 1	50
<b>23</b> Dromocronas y perfil de velocidades de Onda P No. 2	51
<b>24</b> Estratigrafía de capas y de profundidad vs velocidad de onda P y onda S del perfil sísmico 2	52
<b>25</b> Dromocronas y perfil de velocidades de Onda P No. 3	53
<b>26</b> Estratigrafía de capas y de profundidad vs velocidad de onda P y onda S del perfil sísmico 3	54
<b>27</b> Dromocronas y perfil de velocidades de Onda P No. 4	55
<b>28</b> Estratigrafía de capas y de profundidad vs velocidad de onda P y onda S del perfil sísmico 4	56
<b>29</b> Dromocronas y perfil de velocidades de Onda P No. 5	57
<b>30</b> Estratigrafía de capas y de profundidad vs velocidad de onda P y onda S del perfil sísmico 5	58
<b>31</b> Dromocronas y perfil de velocidades de Onda P No.6	59
<b>32</b> Estratigrafía de capas y de profundidad vs velocidad de onda P y onda S del perfil sísmico 6	60
<b>33</b> Dromocronas y perfil de velocidades de Onda P No. 7	61

<b>34</b>	Estratigrafía de capas y de profundidad vs velocidad de onda P y onda S del perfil sísmico 7	62
<b>35</b>	A) Profundidad vs Módulo de Rigidez, Elástico y Bulk, B) Profundidad vs Módulo de Poisson	63
<b>36</b>	A) Profundidad vs Módulo de Rigidez, Elástico y Bulk B) Profundidad vs Módulo de Poisson	64
<b>37</b>	A) Profundidad vs Módulo de Rigidez, Elástico y Bulk, B) Profundidad vs Módulo de Poisson.	66
<b>38</b>	A) Profundidad vs Módulo de Rigidez, Elástico y Bulk B) Profundidad vs Módulo de Poisson	67
<b>39</b>	A) Profundidad vs Módulo de Rigidez, Elástico y Bulk B) Profundidad vs Módulo de Poisson	69
<b>40</b>	A) Profundidad vs Módulo de Rigidez, Elástico y Bulk B) Profundidad vs Módulo de Poisson	70
<b>41</b>	A) Profundidad vs Módulo de Rigidez, Elástico y Bulk, B) Profundidad vs Módulo de Poisson	72

### ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

<b>1</b>	Equipo de registro para ensayos sísmicos	32
<b>2</b>	A) Colocación de geófonos B) Levantamiento sísmico de refracción y MASW	34
<b>3</b>	Afloramiento de piroclastos volcánicos	41
<b>4</b>	A) Afloramiento de piroclastos con intercalaciones de paleosuelos B) Afloramiento de piroclastos tipo lapilli	42

### ÍNDICE DE MAPAS

<b>1</b>	Ubicación del área de investigación	9
<b>2</b>	Sitios de ensayos superficiales	44

### ÍNDICE DE TABLAS

<b>1</b>	Coordenadas que delimitan el área de investigación	8
<b>2</b>	Velocidades para materiales volcánicos piroclásticos	37
<b>3</b>	Tabla de velocidades para diversos tipos de roca	37
<b>4</b>	Comparativa de valores admisibles de módulo de Young para cimentaciones	39
<b>5</b>	Estimaciones de Vp para cada sitio de estudio	45
<b>6</b>	Estimaciones de Vs para cada sitio de estudio	46
<b>7</b>	Estimación de módulos elásticos para cada sitio	47

## RESUMEN

La investigación consistió en la aplicación de siete ensayos de refracción sísmica y siete de análisis multicanal de ondas superficiales (*MASW* por sus siglas en inglés) los cuales permiten el estudio de ondas sísmicas a través de una inducción de energía artificial.

Éstos ensayos permiten estimar los módulos elásticos del subsuelo hasta una profundidad máxima de 30 metros, con la finalidad de determinar parámetros de soporte para la edificación de torres de aeroturbinas generadoras de energía.

La metodología consistió en un reconocimiento geológico de campo y la aplicación de los dos ensayos sísmicos, en los cuales, se generó una señal sísmica inducida por medio de una liberación de energía, produciendo una deformación en el terreno que fue registrada a través de geófonos y procesada con el *software SeisImager* por medio de un ordenador.

A través del proceso de investigación se concluyó que los ensayos sísmicos, permiten caracterizar las propiedades elásticas dinámicas del suelo con valores variables a diferentes profundidades en cada sitio de cimentación, lo cual indica variaciones leves en las propiedades físicas del material geológico en el subsuelo.

La aplicación de estos ensayos en la determinación de módulos elásticos a través del comportamiento y viaje de las ondas sísmicas en el subsuelo es muy recomendable ya que además de su bajo costo son eficientes, eficaces y proporcionan resultados apagados a la realidad.



## INTRODUCCIÓN

La investigación es de tipo descriptiva, la cual tuvo como propósito describir el uso de ensayos de refracción sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales que son herramientas aplicables a diversos campos como petróleo, minería, geotecnia, geología, ingeniería ambiental, recursos hídricos, infraestructura, entre otros.

El objetivo principal de esta investigación fue estimar los módulos elásticos de los materiales en el subsuelo a través de refracción sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales (*MASW* por sus siglas en inglés), para ser aplicados al cálculo del diseño de cimentación de torres de aeroturbinas en la finca Viento Blanco, Escuintla.

En esta investigación el uso de refracción sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales se deriva de la implementación de métodos indirectos utilizando ondas sísmicas para la obtención de parámetros geotécnicos útiles en cimentaciones

Se determinaron los módulos de elasticidad hasta una profundidad máxima de 30 m, el espesor y estratigrafía de capas para cada sitio de estudio, esto a través del comportamiento y viaje de ondas en el subsuelo, la cual muchas veces es difícil determinar por falta de afloramientos o por la cubierta vegetal del área.

La siguiente investigación permite a través, de métodos indirectos que es posible estimar los módulos elásticos (Bulk, Poisson, corte y Young) en el subsuelo, sin la necesidad de implementar ensayos geotécnicos destructivos, costosos y que en algunos casos por ubicación del sitio de investigación no es posible aplicarlos.



## OBJETIVOS

### Objetivo General

- Estimar los módulos elásticos de los materiales en el subsuelo, a través de refracción sísmica y análisis multicanal de ondas superficiales (*MASW*), aplicables al cálculo de diseño de cimentación en la finca Viento Blanco, Escuintla.

### Objetivos Específicos

- Estimar las velocidades de ondas compresionales, de corte y de los espesores de las capas del subsuelo.
- Estimar los módulos de Young, Poisson, Bulk y De Corte del subsuelo por medio de la inducción de ondas sísmicas para el cálculo de parámetros de cimentación.
- Asociar la estimación de velocidades sísmicas y módulos elásticos con la naturaleza y condición de los estratos *in situ* para la edificación de las estructuras de torres de aereoturbinas.



## CAPÍTULO I

### MARCO TEÓRICO

#### 1.1 Antecedentes

Mayormente los antecedentes de la investigación están basados en documentos relacionados con la aplicación de los ensayos y la metodología a seguir, de los cuales podemos mencionar los siguientes:

1. Microzonificación sísmica de la zona urbana de Motozintla de Mendoza, Chiapas, México, tesis de grado de Gloria Azucena Moreno. De este trabajo se obtuvo parte de la metodología de adquisición de datos para la evaluación de parámetros físicos del suelo a través del análisis de ondas compresionales y de corte, UNAM, Facultad de Ingeniería, 2011
2. Estudios geotécnicos de cimentación por Miguel Quispe P. 2012, del cual se obtuvo parte de la teoría para el análisis de ondas compresionales y de corte para la obtención de módulos de elasticidad para edificaciones ingenieriles, Carrión Huancayo, Perú, Jorge Alva Hurtado Ings, 2012.
3. En Guatemala se han hecho estudios sísmicos para la determinación de estratigrafía de capas y obtención de módulos elásticos, que han sido el objeto de consultorías privadas realizadas por Ligorria, J.P. (Comunicación personal, 2014), de las cuales se obtuvo todo el procedimiento y la mayor parte de conceptos básicos de los métodos de refracción sísmica y *MASW*.

## 1.2 Planteamiento Del Problema

Se definió el problema derivado de la implementación de métodos indirectos utilizando ondas sísmicas para la obtención de parámetros geotécnicos útiles en cimentaciones. Con base en lo anterior se formuló la siguiente interrogante:

¿Cuáles son los módulos elásticos de los materiales en el subsuelo estimados a partir de refracción sísmica y *MASW* para el diseño de cimentaciones en el proyecto Viento Blanco, San Vicente Pacaya, Escuintla?

## 1.3 Justificación

El uso de los métodos geofísicos de refracción sísmica y *MASW* son útiles para aplicaciones en Geotecnia. Esto es, dado que a partir de dicha aplicación se pueden estimar los módulos elásticos (ejemplo Young, Poisson, Bulk, Rigidez/De Corte); que a su vez pueden ser aplicados en el diseño de cimentaciones de estructuras.

En este caso, se presenta la estimación de dichos módulos; que son necesarios para el diseño de cimentaciones de cada sitio donde serán construidas las estructuras de torres de aeroturbinas que generan energía eléctrica utilizando el viento como fuente de energía, en el área del proyecto Viento Blanco, San Vicente Pacaya, Escuintla.

A partir de esto se pueden optimizar costos y obtener datos confiables producto de la interpretación del comportamiento de las ondas compresionales y de corte en el suelo y subsuelo.

## 1.4 Hipótesis

Aplicando los métodos de refracción sísmica y *MASW* de manera complementaria, para la estimación de velocidades de propagación de ondas sísmicas P (compresionales) y ondas S (de superficie), es posible estimar los módulos elásticos de Young, Poisson, Bulk y Corte (o Rigidez); los cuales son de utilidad para el diseño de las cimentaciones de estructuras de torres.

## 1.5 Variables

Las variables determinadas a través de la formulación de hipótesis son:

### 1.5.1 Variables Independientes

- Medio geológico
- Velocidad de propagación de ondas sísmicas compresionales ( $V_p$ )
- Velocidad de propagación de ondas sísmicas de corte ( $V_s$ )

### 1.5.2 Variables Dependientes

- Módulo de Young
- Módulo de Corte
- Módulo de Poisson
- Módulo de Bulk

## 1.6 Alcances y Límites

### 1.6.1 Alcances

El alcance de esta investigación fue de tipo descriptivo, debido a que se describe el proceso metodológico a partir del cual se aplican métodos indirectos (Geofísicos); para la posterior estimación de módulos

elásticos de Young, Poisson, Bulk y Corte, que son parámetros geotécnicos aplicables al diseño de cimentaciones.

### 1.6.2 Límites Espacial y Temporal

Se analizaron los datos levantados en siete sitios específicos. Es decir, para cada sitio se levantaron: Un perfil de Refracción sísmica de 55 metros de longitud y un ensayo *MASW* de 33 metros. Cada uno sobre sedimentos volcánicos. La investigación se realizó en un periodo de un año y 6 meses.

### 1.7 Localización y Extensión

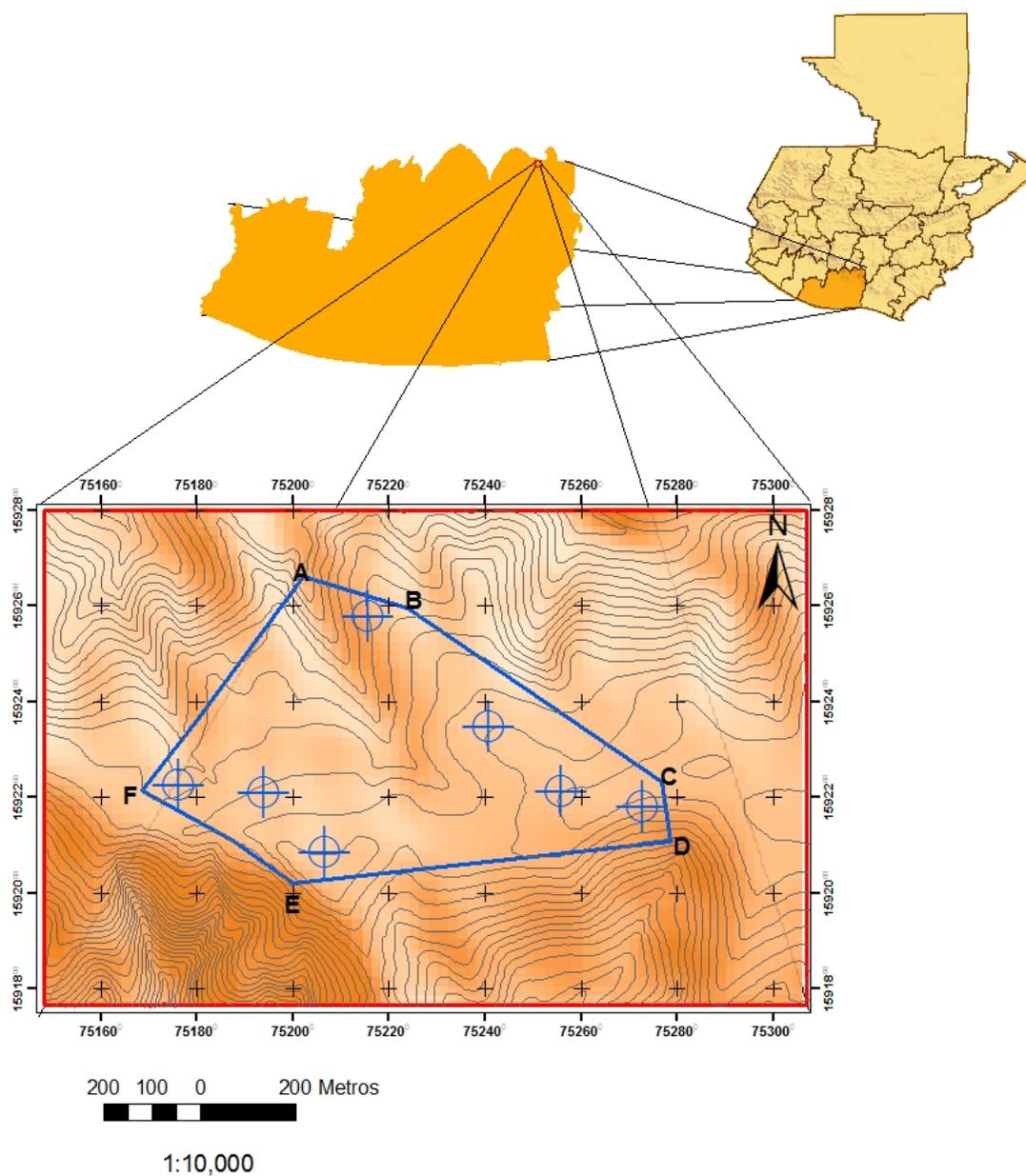
El área de investigación se ubica en la aldea Los Ríos jurisdicción del municipio de San Vicente Pacaya, Escuintla. La extensión del área de investigación es de 414 000 m<sup>2</sup> y se delimita por las coordenadas UTM descritas en la tabla 1 y graficadas en el mapa 1.

TABLA 1  
COORDENADAS UTM QUE DELIMITAN EL ÁREA DE INVESTIGACIÓN

Punto	Coordenada X	Coordenada Y
A	752023	1592657
B	752240	1592657
C	752768	1592227
D	752785	1592106
E	752000	1592017
F	751687	1592211

Fuente: Investigación de campo. 2 014.

## MAPA 1 UBICACIÓN DEL ÁREA DE INVESTIGACIÓN



**Fuente:** Investigación de campo. 2 014.

### 1.7.1 Accesos

El acceso al área de estudio es por medio de la siguiente ruta:

- Tomando la Autopista CA-9 que conduce de Palín hasta Puerto Quetzal en Escuintla, se pasará por la entrada a Amatitlán.
- Justo antes de llegar a Palín en el km 37.5 se encuentra el entronque hacia el oeste que conduce a San Vicente Pacaya
- Esta entrada está asfaltada hasta el cruce de la aldea Los Ríos - justo después del cruce a la cabecera municipal de San Vicente Pacaya. Luego se transita por un camino de terracería hasta llegar a la aldea Los Ríos y al sitio del área de estudio.

## 1.8 Revisión de Literatura

### 1.8.1 Teoría de la elasticidad

Según R. Sheriff (1991), “un cuerpo rígido puede ser modificado en su forma y tamaño al aplicar sobre él una fuerza externa. Sin embargo a estas fuerzas externas se resisten otras fuerzas internas, las cuales ofrecen resistencia al cambio de forma y tamaño de un cuerpo. Este es el principio básico que sustenta la explicación de la propagación de ondas elásticas en medios continuos.”<sup>1</sup>

La elasticidad es una propiedad que tienen algunos materiales que les permite regresar a su estado original después de haber sido sometidos a esfuerzos. Además, la deformación de estos materiales es proporcional a la fuerza aplicada sobre ellos.

---

<sup>1</sup> Sheriff, RE. *Exploración sísmológica*: México, D.F.: Editorial Limusa, 1 991

La teoría de la elasticidad relaciona los esfuerzos aplicados a un cuerpo con las deformaciones (cambio del tamaño y la forma) que este sufre. Por lo tanto, la elasticidad o propiedades elásticas de los materiales pueden ser descritas por medio de sus módulos elásticos.

### 1.8.2 Teoría de ondas

Se define como onda al movimiento que resulta de una perturbación en un medio elástico que se propaga en espacio y tiempo, en el cual existe una transferencia de energía. Una onda es mecánica si la perturbación deforma a un medio material o es elástica, si la perturbación se transmite en todas las direcciones por las que se extiende el medio con una velocidad constante.

La siguiente expresión caracteriza el movimiento ondulatorio, cuya naturaleza es la propagación de una onda senoidal.<sup>2</sup>

$$Y(x, t) = A \text{ sen } k(X - Vt)$$

La anterior ecuación define una onda progresiva que viaja a una velocidad  $V$  en dirección de  $X$

En donde:

- $k$  es conocida como número de onda y es una constante positiva.
- $A$  es la amplitud de onda y corresponde al máximo valor de la perturbación (su rango va de 1 a -1).
- $X$  es la distancia.
- $t$  es el tiempo.
- $V$  corresponde a la velocidad.

---

<sup>2</sup>

Hecht, E., Zajac A. *Óptica*, United State of America , Fondo Educativo Internacional 1 997

Si se mantiene fija  $X$  o bien  $t$  el resultado será una onda senoidal, la cual es periódica tanto en el espacio como en el tiempo.

El periodo espacial ( $\lambda$ ) se conoce como la longitud de onda. El periodo temporal ( $\tau$ ) es la cantidad de tiempo que le toma a una onda completar un ciclo<sup>3</sup>, y  $V$  corresponde a la velocidad de propagación de onda.

$$\tau = \lambda/V$$

En donde:  
 $\tau$  = Periodo temoral  
 $\lambda$  = Periodo espacial  
 $V$  = Velocidad de propagación

Frecuencia ( $f$ ) corresponde al inverso del periodo y representa el número de onda por unidad de tiempo<sup>4</sup>.

$$f = 1/\tau$$

En donde:  
 $\tau$  = Periodo temoral  
 $f$  = Frecuencia

### 1.8.3 Leyes que rigen la propagación de ondas sísmicas

Para el estudio de propagación de cuerpos de onda en un medio geológico es necesario aplicar los conceptos de propagación de rayos de luz que se enmarcan en el principio de Fermat, el principio de Huygens y Ley de Snell.

El principio de Fermat dice, que todo rayo en un medio, tiende a seguir la trayectoria que le implique el menor tiempo.

La propagación de ondas de refracción sísmica se rige a través de la Ley de Snell, que formula la relación entre la inclinación del rayo que incide y del que se refracta a través de la interfase de dos medios (figura

---

<sup>3</sup> Giancoli, C. Douglas, *Física: Principios con Aplicaciones, Sexta Edición*, México, Editorial Pearson Educación, 2006

<sup>4</sup> Ibídem

1a). Por tanto, nos permite calcular la inclinación para la cual la onda incidente se propagara por la interfase de los medios. Esta inclinación se denomina ángulo crítico y se calcula así:

$$\frac{\text{Sen } i}{\text{Sen } R} = \frac{V1}{V2}$$

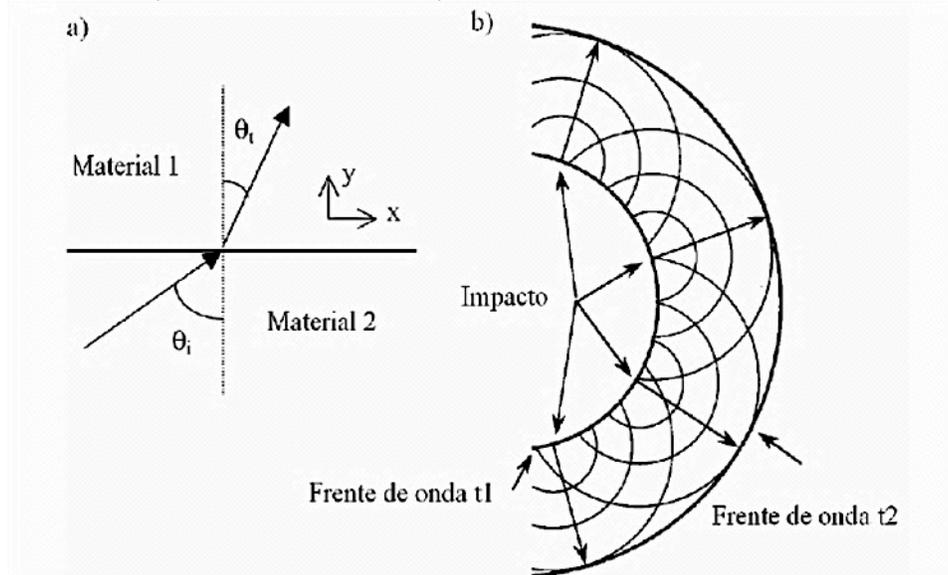
En donde:

- i = Ángulo de incidencia
- R = Ángulo de refracción , cuando R es 90 grados,  
Sen i = V1 / V2
- V1 = Velocidad del medio superior (desde donde  
proviene la onda sísmica).
- V2 = Velocidad del medio emergente (hacia donde se  
propaga la onda sísmica).

Frente de onda, es el lugar geométrico de todos los puntos que tienen el mismo estado de vibración.

El principio de Huygens explica cómo se da el comportamiento de propagación de ondas en un medio. Cuando una onda alcanza un punto de un medio material, éste se comporta como un foco emisor que crea un frente de ondas secundarias (figura 1b).

FIGURA 1  
A) LEY DE SNELL; B) PRINCIPIO DE HUYGENS



**Fuente:** Czelada Jorge Alberto. *Medición del módulo de Young y módulo de corte mediante técnicas geofísicas*: Tesis de Ingeniería Civil. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería. Buenos Aires, Argentina: 2 009

#### 1.8.4 Propagación de ondas

En un medio geológico las ondas elásticas se denominan sísmicas, las cuales se dividen en ondas de cuerpo (ondas de compresión y de corte) y superficiales (ondas de Rayleigh y de Love).

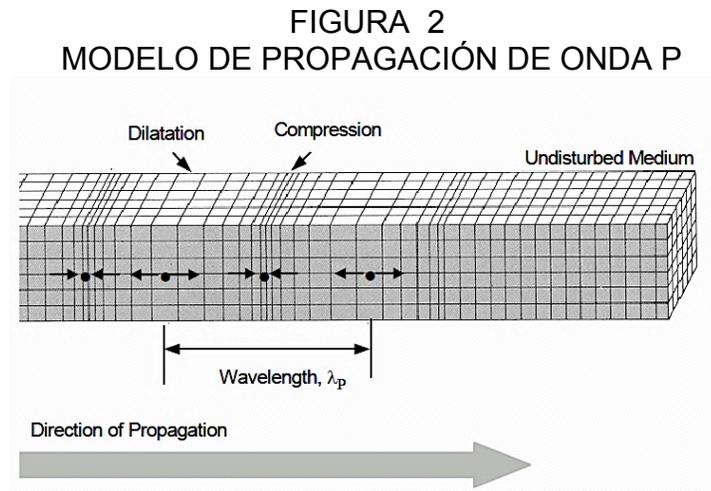
Cuando un medio elástico es sometido a un esfuerzo, y posteriormente este desaparece se origina un movimiento ondulatorio, el cual se desplazará en todas direcciones a una velocidad  $V$ , la cual está definida por los módulos elásticos del medio de propagación<sup>5</sup>.

#### 1.8.5 Ondas de compresión

Las ondas de compresión o también llamadas ondas P son ondas mecánicas cuyo sentido de movimiento es paralelo a la dirección de propagación de onda. Las partículas alcanzadas por la onda se

<sup>5</sup> Del Valle, E. *Apuntes de introducción a los métodos geofísicos de exploración*. Universidad Nacional Autónoma de México. México: Facultad de Ciencias de la Tierra, Departamento de Geofísica, 1 985

desplazan en la dirección de propagación tal y como se observa en la figura 2.



**Fuente:** Santamarina JC. Et.Al. *Soils and waves : Particulate materials behavior, characterization and process monitoring*: New York, United State of America: John Wiley & Sons, 2 001

Si se considera que la onda es plana y que la propagación coincide con la dirección  $x$ , el equilibrio del elemento se define por:

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \frac{M}{\rho} \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2}$$

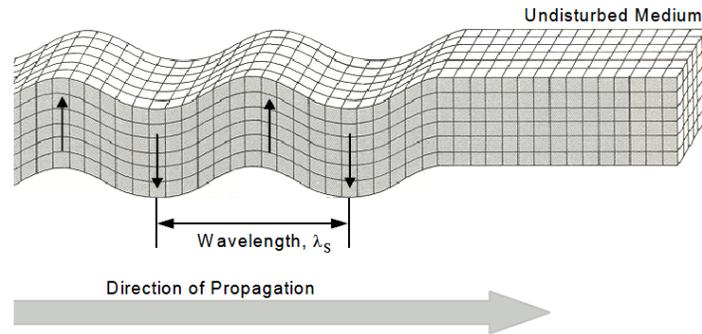
En donde:

- M = módulo confinado
- t = tiempo
- $u_x$  = amplitud de onda
- x = distancia de propagación
- $\rho$  = densidad del material

### 1.8.6 Ondas de corte

Las ondas de corte, también llamadas ondas secundarias o “S”, son ondas mecánicas cuyas partículas se desplazan perpendicularmente a la dirección de propagación de onda (figura 3).

FIGURA 3  
MODELO DE PROPAGACIÓN DE ONDA S



**Fuente:** Santamarina JC. Et.Al. *Soils and waves : Particulate materials behavior, characterization and process monitoring*: New York, United State of America: John Wiley & Sons, 2 001

### 1.8.7 Ondas superficiales

Cuando se analiza la propagación de ondas en superficie se observa que se produce un movimiento de partículas más complejo.

Rayleigh “resolvió el problema de las ondas elásticas que generan tensiones paralelas a la superficie en un medio semi-infinito, lo que trae aparejado una disminución de la rigidez del cuerpo en la superficie, induciendo un movimiento de las partículas vertical y horizontal.<sup>6</sup>

Analizando los desplazamientos provocados por el impacto a una cierta distancia, al frente de onda se lo considera como plano. En un material homogéneo se demuestra que las velocidades del medio no varían con la frecuencia, adquiriendo el carácter de no dispersivo, y se lo describe con la siguiente ecuación<sup>7</sup>.

En donde:

$$V_r = \frac{0.874 + 1.117 v}{1 + v} V_s$$

$V_r$  = Velocidad de onda R

$v$  = Módulo de Poisson

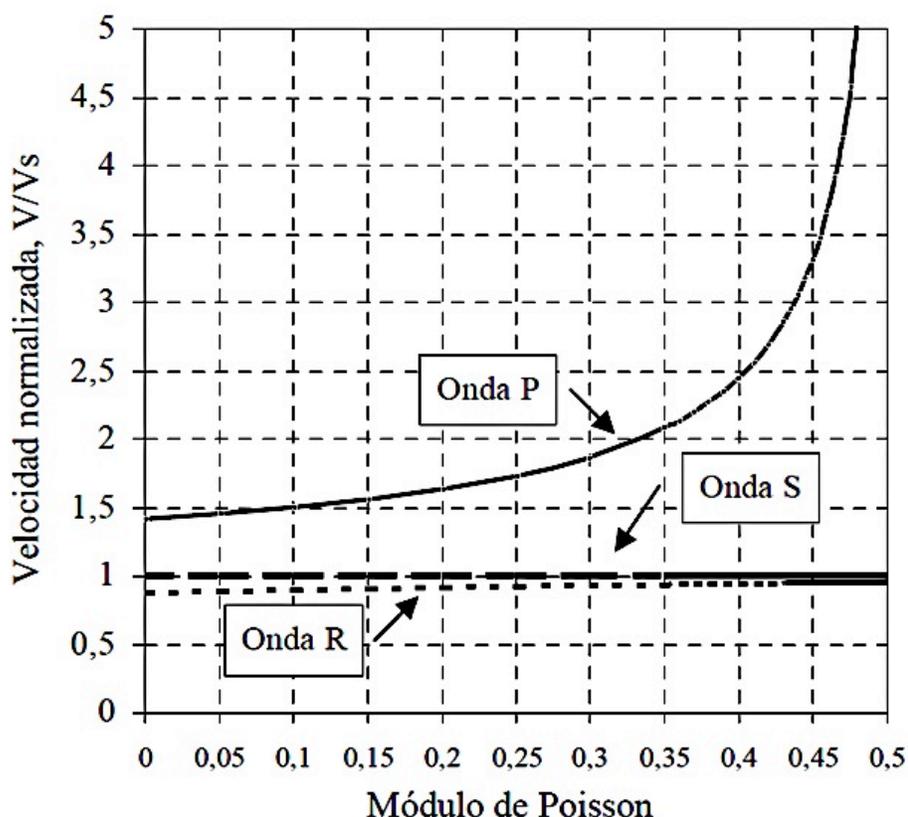
$V_s$  = Velocidad de onda S

<sup>6</sup> Santamarina JC. Et.Al. *Soils and waves : Particulate materials behavior, characterization and process monitoring*: New York, United State of America: John Wiley & Sons, 2 001  
<sup>7</sup> Ibídem

Según estudios realizados en campo acerca del comportamiento y registro de ondas superficiales la variación entre  $V_s$  y  $V_r$  es pequeña. A través de la medición de la velocidad de ondas Rayleigh y por la baja incidencia del módulo de Poisson es posible conocer el módulo de corte del terreno.

En la figura 4 se comparan las velocidades de propagación de distintos tipos de onda respecto a la velocidad de propagación de ondas de corte. Se observa que para cualquiera valor de  $\nu$  se cumple que  $V_p > V_s > V_r$ .

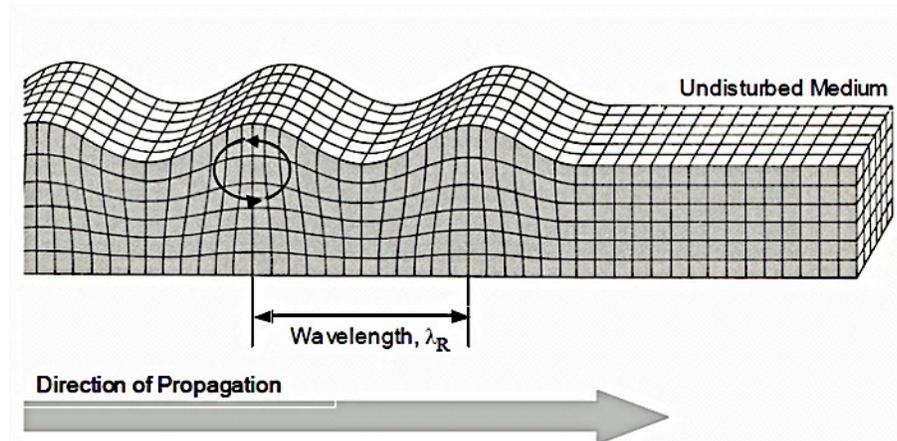
FIGURA 4  
VELOCIDADES DE PROPAGACIÓN NORMALIZADAS SEGÚN LA VELOCIDAD DE ONDAS DE CORTE



**Fuente:** Czelada Jorge Alberto. *Medición del módulo de Young y módulo de corte mediante técnicas geofísicas*: Tesis de Ingeniería Civil. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería. Buenos Aires, Argentina: 2 009

En un semi-espacio infinito el desplazamiento de las partículas provocado por las ondas de Rayleigh, es una combinación de movimientos horizontales y verticales. El resultado es la generación de un movimiento de partículas retrogrado elíptico, éste movimiento de partículas se observa en la figura 5.

FIGURA 5  
MODELO DE PROPAGACIÓN ONDA DE RAYLEIGH



**Fuente:** Czelada Jorge Alberto. *Medición del módulo de Young y módulo de corte mediante técnicas geofísicas*: Tesis de Ingeniería Civil. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería. Buenos Aires, Argentina: 2 009

Según Fonti “el desplazamiento de las partículas decrece exponencialmente con la profundidad. Por esta razón, la propagación de este tipo de ondas afecta únicamente a la capa de suelo de profundidad igual a la longitud de onda ( $z = \lambda$ )”<sup>8</sup>.

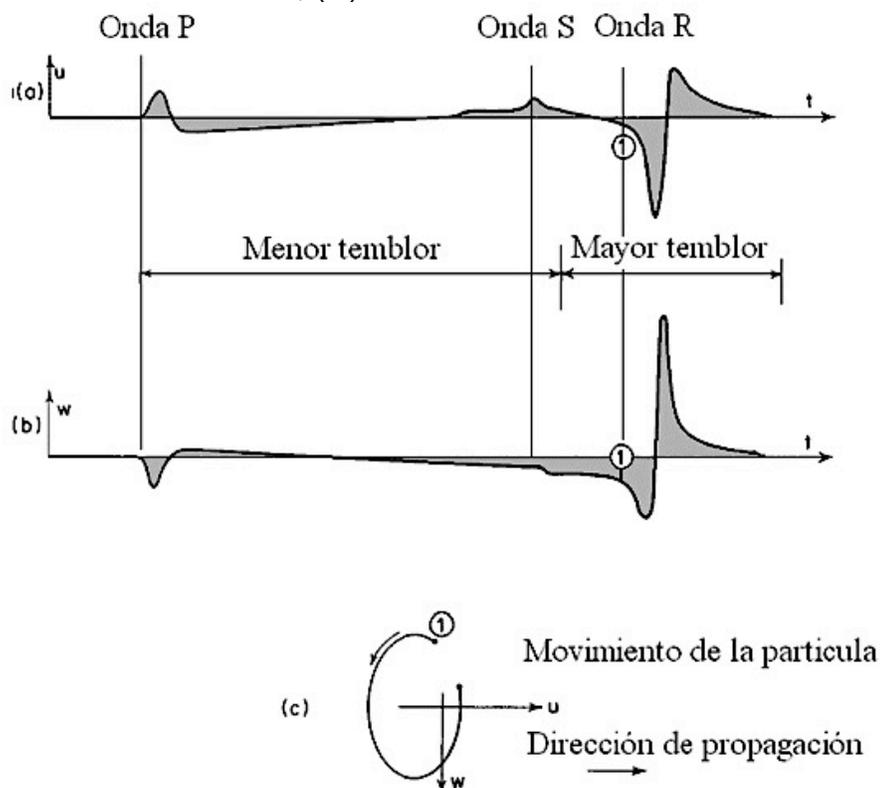
Horace Lamb, demostró que la superficie del terreno responde inicialmente con una onda de pequeña energía y luego con una onda de mayor energía (Figura 6).

Según Horace Lamb “la primera se la asocia a las ondas P y la segunda a las onda de corte y de Rayleigh”<sup>9</sup>.

<sup>8</sup> Fonti, S. *Multistation methods for geotechnical characterization using Surface Waves*: Tesis doctoral en filosofía. Torino, Italia: Politécnico di Torino, 2 000

<sup>9</sup> Lamb Horece, *Hidrodinamics*, United State of America University Press, Cambrige, 1 916.

FIGURA 6  
 DESPLAZAMIENTO EN LA SUPERFICIE DE UN SEMI-ESPACIO  
 HOMOGÉNEO; (A) MOVIMIENTO HORIZONTAL RADIAL; (B)  
 MOVIMIENTO VERTICAL; (C) SENTIDO DE ONDAS DE RAYLEIGH



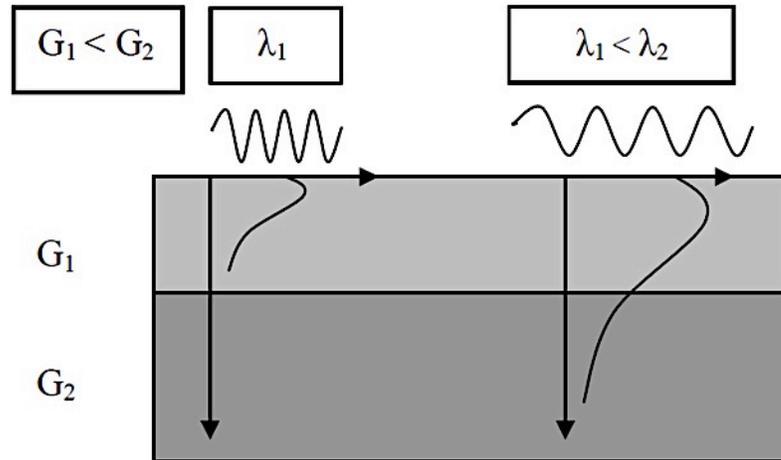
**Fuente:** Ortigao, JAR. *Wave propagation and microstrain behaviour of soils*: Rio de Janeiro, Brasil: Terratek, 2 007.

Según Claudio Strobbia: La propagación de ondas en un medio estratificado es más complejo. Las ondas de Rayleigh guardan una correlación entre la longitud de onda  $\lambda$  y la profundidad del medio por el cual se propagan. Un impacto en la superficie genera ondas que se propagan con diferentes longitudes de onda.<sup>10</sup>

Según la figura 7, las de menor longitud de onda se propagarán a través del suelo superficial – el estrato superior en este caso – mientras que las de mayor longitud se propagarán a través de ambos estratos.

<sup>10</sup> Strobbia, Claudio. *Surface wave methods: Acquisition, processing and inversion* Tesis doctoral en filosofía. Torino, Italia: Politécnico di Torino, 2 002

FIGURA 7  
 MODELO DE DOS CAPAS, ONDAS DE MENOR LONGITUD DE ONDA VIAJARAN POR EL ESTRATO SUPERIOR DE MENOR RIGIDEZ MIENTRAS QUE LAS DE MAYOR LONGITUD DE ONDA VIAJARAN A TRAVÉS DE AMBOS ESTRATOS



**Fuente:** Czelada Jorge Alberto. *Medición del módulo de Young y módulo de corte mediante técnicas geofísicas*: Tesis de Ingeniería Civil. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería. Buenos Aires, Argentina: 2 009

### 1.8.8 Módulos elásticos

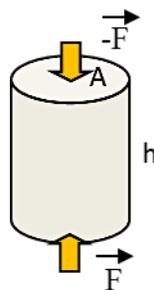
Para ésta investigación se utilizarán las constantes elásticas de cuerpos que conservan su volumen, estos son originados por esfuerzos tensionales y compresivos que originan deformaciones transversales, las cuales, compensan la deformación producida en sentido longitudinal.

#### 1.8.8.1 Módulo de Young (E)

Es la constante de proporcionalidad. Cuando mayor sea el valor de E para un cuerpo sólido menor será la deformación causada por algún esfuerzo. La deformación del cuerpo es longitudinal y paralela a los esfuerzos<sup>11</sup>, (figura 8).

<sup>11</sup> Giancoli, C. Douglas, *Física: Principios con Aplicaciones, Sexta Edición*, México, Editorial Pearson Educación, 2006

FIGURA 8  
PRINCIPIO MATEMÁTICO DEL MÓDULO DE YOUNG



En donde:

F = Fuerza

A = Área

h = Altura

$\Delta h$  = Cambio de altura

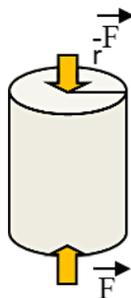
$$Young = \frac{(F/A)}{(\Delta h/h)}$$

**Fuente:** Investigación de campo. 2 014.

### 1.8.8.2 Módulo de Poisson ( $\gamma$ )

Es la relación existente entre la deformación perpendicular a la fuerza deformante y la dirección de tensión. Este es una relación que se produce entre un cambio de su radio y un cambio longitudinal<sup>12</sup>, (figura 9).

FIGURA 9  
PRINCIPIO MATEMÁTICO MÓDULO DE POISSON



En donde:

$\Delta r$  = Cambio de radio del cilindro

r = Radio del cilindro

h = Altura

$\Delta h$  = Cambio de altura

$$Poisson = \frac{(\Delta r/r)}{(\Delta h/h)}$$

**Fuente:** Investigación de campo. 2 014.

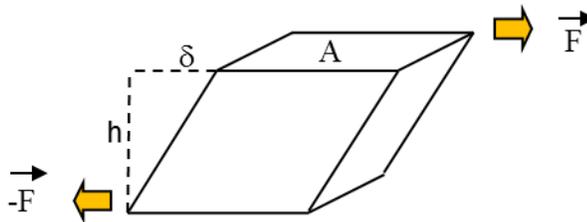
<sup>12</sup>

Ibídem

### 1.8.8.3 Módulo de rigidez (n)

Considerando un esfuerzo cortante o transversal, donde la tensión es proporcional al esfuerzo si la magnitud es mínima<sup>13</sup>, (figura 10).

FIGURA 10  
PRINCIPIO MATEMÁTICO DEL MÓDULO DE RIGIDEZ



$$\text{Rigidez} = \frac{(F/A)}{(\delta/h)}$$

En donde:

F = Fuerza

A = Área

δ = Deformación

h = Altura

Fuente: Investigación de campo. 2 014.

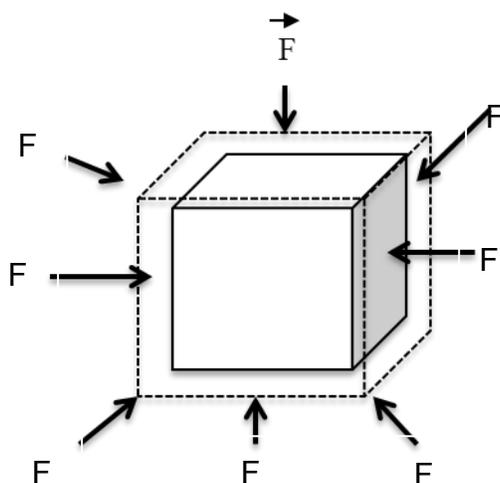
### 1.8.8.4 Módulo de Bulk (k)

Es la resistencia del material al cambio en volumen cuando le es aplicada una carga. También interpretado como la relación entre una presión hidrostática y la fracción de cambio volumétrico inducido<sup>14</sup>, (figura 11).

<sup>13</sup> Ibídem

<sup>14</sup> Ibídem

FIGURA 11  
PRINCIPIO MATEMÁTICO DEL MÓDULO DE BULK



En donde:

$\Delta F$  = Cambio de fuerza  
 $A$  = Área sobre primsa  
 $V$  = Volumen  
 $\Delta V$  = Cambio de volumen

$$Bulk = \frac{\Delta F/A}{\Delta V/V}$$

Fuente: Investigación de campo. 2 014.

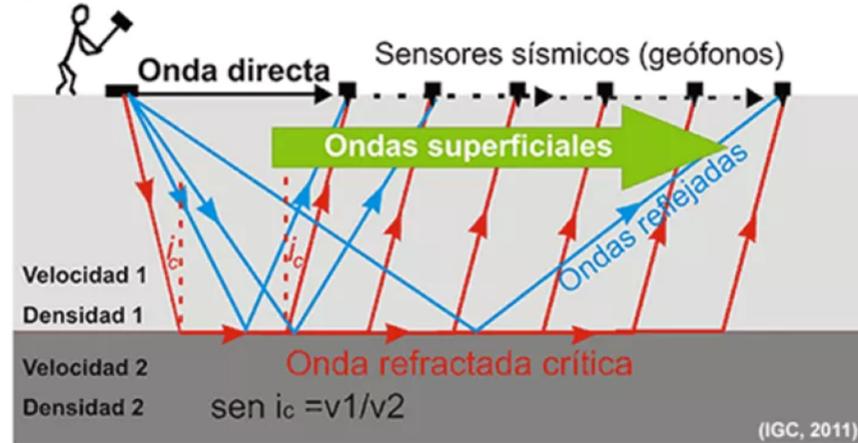
### 1.8.9 Métodos sísmicos

Las herramientas geofísicas de prospección sísmica se basan en la generación de ondas mecánicas que atraviesan los cuerpos o material geológico a investigar. Debido a que la amplitud de las ondas generadas es muy pequeña, no se general alteración alguna en las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales del material ensayado, lo que implica que la alteración del terreno es imperceptible o nula.

En ésta investigación se aplicaron dos metodologías: Sísmica de refracción, y Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (*MASW* por sus siglas en Inglés).

En ambas metodologías, se produce una señal sísmica a partir de una liberación de energía, la cual induce una deformación en el terreno. Dicha deformación es registrada por medio de sensores de movimiento del terreno o Geófonos, (figura 12).

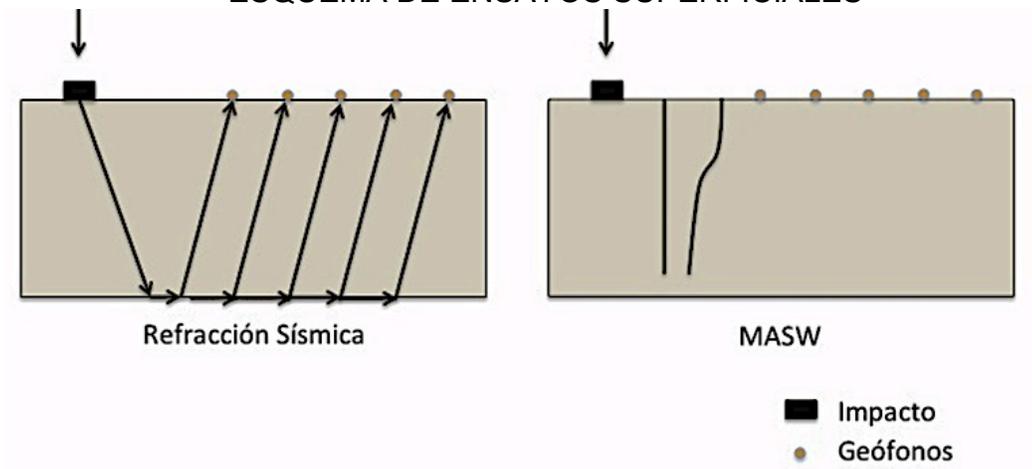
FIGURA 12  
 MODELO DE GENERACIÓN Y REGISTRO DE ONDAS



Fuente: *International Geophysical Conference*, 2011

Existen diversos tipos de ensayos sísmicos de exploración (similares entre sí) pero cuya aplicación, procesamiento e interpretación presenta características diferenciadas. En la figura 13 se muestran los diferentes tipos de ensayos sísmicos de ondas superficiales.

FIGURA 13  
 ESQUEMA DE ENSAYOS SUPERFICIALES



Fuente: Czelada Jorge Alberto. *Medición del módulo de Young y módulo de corte mediante técnicas geofísicas*: Tesis de Ingeniería Civil. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería. Buenos Aires, Argentina: 2 009

### 1.8.9.1 Sísmica de refracción

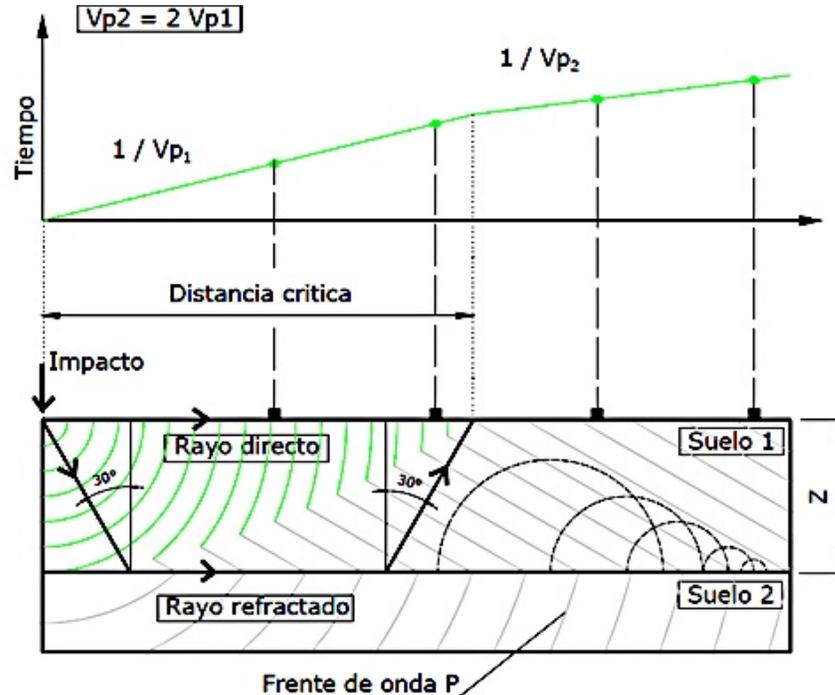
El método geofísico de sísmica de refracción es de utilidad práctica para la estimación de velocidades sísmicas, esta técnica, a través de la elaboración y análisis de las relaciones tiempo-distancia en los estratos por los que se propagan las ondas sísmicas, determina la velocidad de propagación de las mismas (función de las propiedades elásticas del medio de propagación). A partir de lo cual, se estiman los espesores de los estratos y la ubicación a profundidad de los contrastes entre ellos. Dicha información puede a su vez ser asociada a la litología de los estratos que constituyen el subsuelo.

La exploración del subsuelo por medio de este método sísmico se realiza a través de la inducción ondas sísmicas compresionales, particularmente aquellas ondas refractadas con un ángulo crítico.

Estas ondas son las primeras en ser percibidas por los geófonos (las ondas directas hasta una cierta distancia llamada distancia crítica, constituyen la excepción debido a que su arribo es primero); por lo que, su identificación es más fácil en los registros sísmicos.

La respuesta del ensayo (o perfil) de refracción sísmica se representa mediante la curva de arribos que corresponde a un modelo de capas. La estimación de dicho modelo de curva de arribos o *dromocrona*, se describe gráficamente en la figura 14

FIGURA 14  
 MODELO DE PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS P PARA DOS  
 CAPAS HORIZONTALES DE PARÁMETROS  $Z$  Y  $V_{p2} = 2 V_{p1}$ .



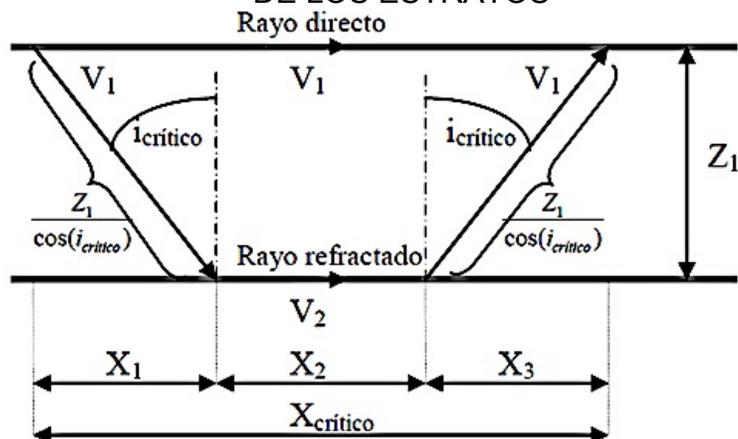
Fuente: Czelada Jorge Alberto. *Medición del módulo de Young y módulo de corte mediante técnicas geofísicas*: Tesis de Ingeniería Civil. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería. Buenos Aires, Argentina: 2 009

En la Figura 14, la capa superficial transmite el frente de ondas proveniente del impacto de manera directa, cuando este frente alcanza la interface entre capas genera un frente secundario que se transmite por la interface y que genera, a su vez, infinitos frentes que se reflejan en la capa superior. A una determinada distancia del punto de impacto, los frentes de onda que viajan por la interface y que se reflejan en la capa superior alcanzan la superficie del terreno antes que las ondas superficiales (figura 15).

Dobrin describe “si la interface es horizontal, su profundidad puede ser calculada mediante la velocidad de propagación de cada estrato y de la distancia crítica”<sup>15</sup>

<sup>15</sup> Dobrin, MB. *Introducción a la prospección geofísica*: Barcelona, España: Editorial Omega, 1 975

FIGURA 15  
ESQUEMA DE ANÁLISIS PARA HALLAR LA PROFUNDIDAD  
DE LOS ESTRATOS



**Fuente:** Czelada Jorge Alberto. *Medición del módulo de Young y módulo de corte mediante técnicas geofísicas*: Tesis de Ingeniería Civil. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería. Buenos Aires, Argentina: 2 009

En un gráfico del tiempo de viaje en función de la distancia fuente-receptor la pendiente de éste es el inverso de la velocidad. Por tanto las velocidades de cada capa corresponden al inverso de las pendientes de cada una de las rectas:

En donde:

$$m = \frac{D_2 - D_1}{T_2 - T_1} \quad v = \frac{1}{m}$$

m = pendiente  
D = cambio de distancia  
T = cambio de tiempo  
v = velocidad

La profundidad de la primera y segunda capa se calcula según las ecuaciones:

En donde:

$$Z_1 = \frac{t_{i2} * v_2}{2} * \cos[\text{sen}^{-1}(v_1/v_2)]$$

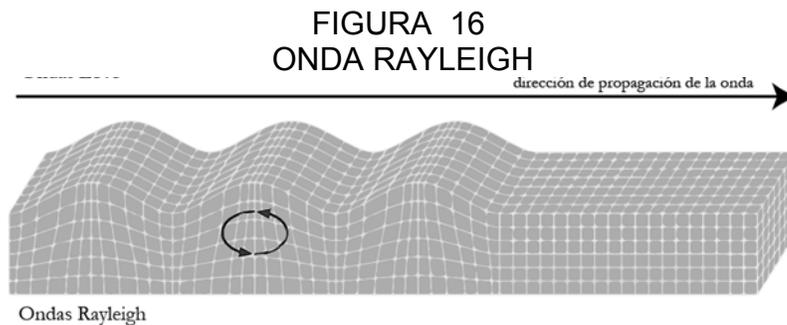
Z<sub>x</sub> = Profundidad de capa  
v<sub>x</sub> = Velocidad de onda P  
t<sub>x</sub> = Tiempo de intercepto

$$Z_2 = \frac{v_2}{A} * (t_{i3} - t_{i2}) * \cos[\text{sen}^{-1}(v_1/v_3)] * \frac{1}{\text{sen}^{-1}(v_1/v_2)}$$

### 1.8.9.2 Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW)

Este método está basado en el movimiento de las partículas cuando una onda Rayleigh atraviesa un medio estratificado. La onda Rayleigh se propaga en superficie y su amplitud decrece con la profundidad. C.A. Disponible en

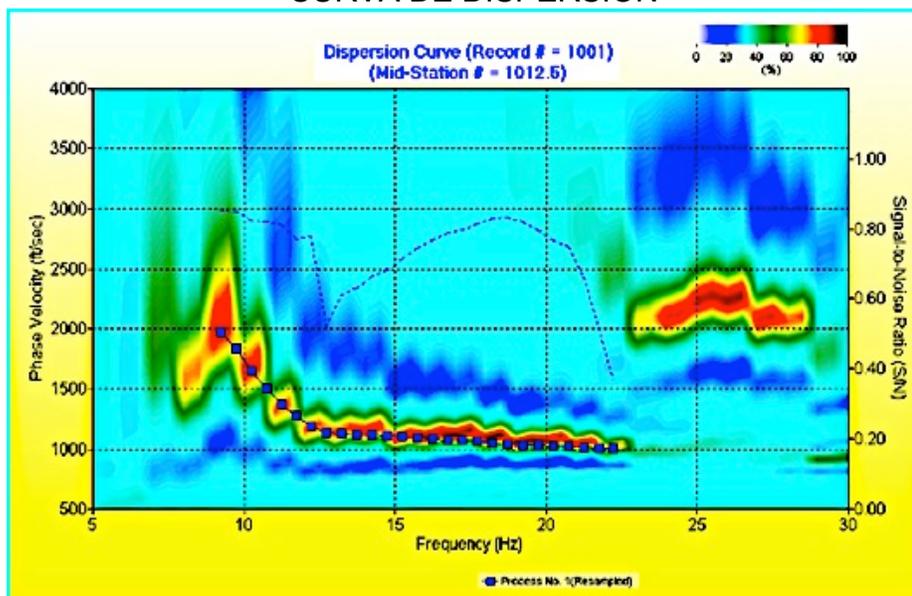
En medios homogéneos, isotrópicos, elásticos la velocidad de la onda R no varía con la frecuencia, sin embargo, en un medio compuesto por capas o estratificado, en donde la rigidez varía con la profundidad la onda si varía su velocidad con la frecuencia. Este fenómeno es conocido como dispersión, en donde la frecuencia es dependiente de la velocidad de la onda R, (figura 16).



**Fuente:** Czelada Jorge Alberto. *Medición del módulo de Young y módulo de corte mediante técnicas geofísicas*: Tesis de Ingeniería Civil. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería. Buenos Aires, Argentina: 2 009

Por lo tanto el procedimiento para estimar la distribución de velocidades en el medio estratificado, por el que se propagan las ondas R, está relacionada a la longitud de onda y a la frecuencia. Un gráfico de velocidad de onda en función de frecuencia de propagación es conocido como curva de dispersión, (figura 17).

FIGURA 17  
CURVA DE DISPERSIÓN



**Fuente:** P. Martinez-Pagan *MASW seismic surveys for determining IBC site classification, Geophysical Survey Investigations*. España 2 003

Éste método nos permite estudiar las propiedades de dispersión de los tipos de ondas sísmicas superficiales (modos fundamentales de ondas Rayleigh), las cuales se propagan horizontalmente a lo largo de la superficie desde el punto de impacto a los geófonos.

Los registros simultáneos de 12 o más geófonos en distancias cortas (1 a 2 m) y largas (50 a 100 m), desde una fuente impulsiva o vibratoria, proporcionan un adecuado registro de datos útiles para estimar la velocidad de fase de las ondas de corte.



## **CAPÍTULO II**

### **METODOLOGÍA**

#### **2.1 Metodología**

##### **2.1.1 Etapa de diagnóstico y bibliográfica**

Ésta consistió en el análisis de imágenes satelitales para la ubicación geográfica del área de investigación donde se levantaron los perfiles sísmicos, así también para conocer las condiciones del terreno tales como vegetación, zona urbana, área de cultivo y la ubicación de las vías de acceso al lugar. Parte de esta etapa contempló la búsqueda y recopilación de toda información aplicable al procesamiento de los datos a obtener mediante la exploración geofísica.

##### **2.1.2 Etapa Campo**

Consistió en el levantamiento de los perfiles sísmicos en el área de investigación. Para esto se contó con una fuente sísmica, medio de propagación (rocas), geófonos y un receptor. El equipo utilizado para generar, detectar y almacenar las ondas sísmicas producidas fueron los siguientes (fotografía 1):

- a) Fuente sísmica: Fuente de impacto, consiste en un mazo de 8 kg.
- b) Placa de acero.
- c) Detectores: 12 geófonos para onda P y 12 para onda S

- d) Cables de transmisión de datos con una longitud de 120 m.
- e) Sismógrafo digital ES-3000 de 16 canales, marca Geometrics.
- f) Computadora.

FOTOGRAFÍA 1  
EQUIPO DE REGISTRO PARA ENSAYOS SÍSMICOS



**Tomada por:** Julio Nery Mendoza Santa María. 2014

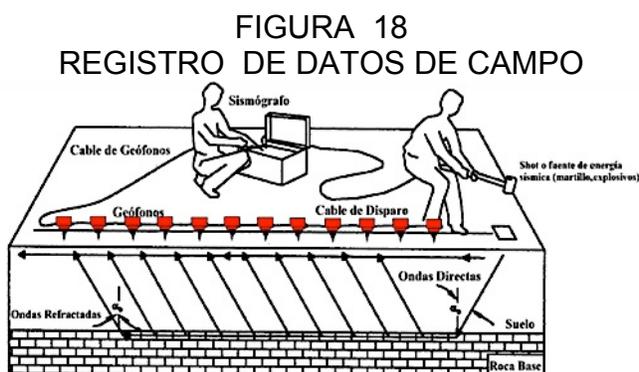
Para la adquisición de datos, se instaló el equipo para levantamiento de perfiles sísmicos en los puntos donde se edificaran las estructuras ingenieriles, simultáneamente se ubicaron con equipo de topografía los sitios donde se instaló el sistema de levantamiento de datos en el campo.

Primero se levantaron los perfiles de Onda P, colocando los geófonos en la superficie del terreno de forma vertical, sobre una línea recta. Esto se hace con el objetivo de no perder sensibilidad y para que el movimiento detectado sea uniforme con el medio elástico. Luego se realizó la conexión de cada uno de los sensores al cable, finalmente se conectó éste cable al sismógrafo y este a su vez a la computadora (fotografía 2).

Se procedió a obtener los registros sísmicos al golpear la placa de acero con el mazo, para lograr una cobertura adecuada a lo largo del perfil sísmico se realizan tres registros sísmicos, uno en cada extremo y uno en el centro del perfil sísmico (figura 18).

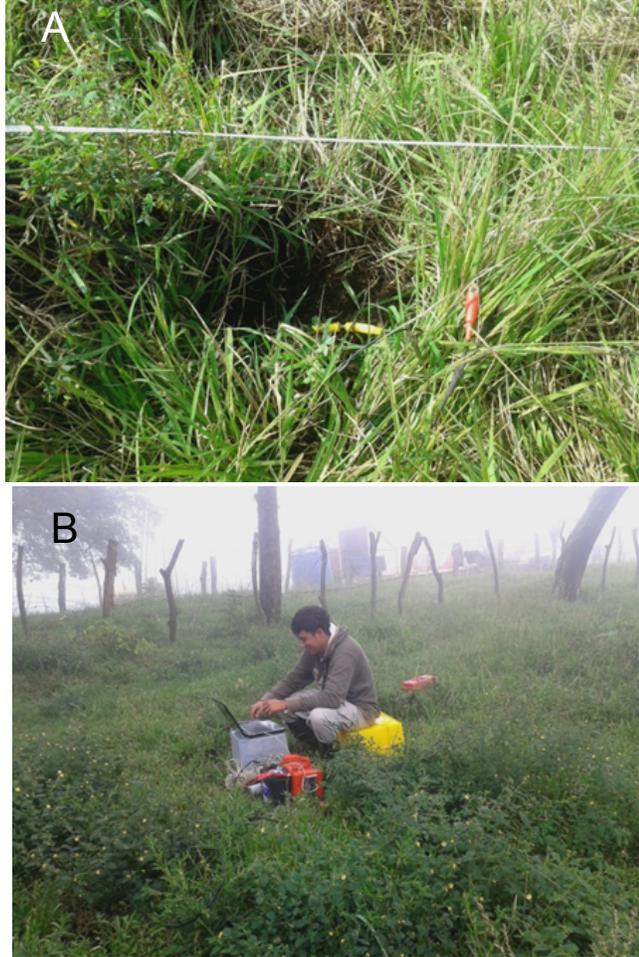
Adicionalmente se realizó un reconocimiento geológico superficial del área a escala 1:1 000 en puntos donde fue posible observar afloramientos. El objetivo principal de este levantamiento es comprender el contraste que pueda existir entre la geología regional y los datos obtenidos de los perfiles sísmicos. El mismo procedimiento fue realizado para el levantamiento de las Ondas S, por medio del método MASW.

Se levantaron 7 perfiles sísmicos de cada tipo de onda, los de onda P fueron de una longitud de 55 m y un espaciado entre geófonos de 5 m, los perfiles de onda S tuvieron una longitud de 33 m y un espaciamiento entre geófonos de 3 m. Todos los perfiles en un rango de dirección entre N330 y N20



**Fuente:** Alva Jorge E. *Aplicaciones de la geofísica en la ingeniería Geotécnica*, Universidad Nacional de Ingeniería de Venezuela, Facultad de Ingeniería, 2013

FOTOGRAFÍA 2  
A) COLOCACIÓN DE GEÓFONOS B) LEVANTAMIENTO SÍSMICO DE  
REFRACCIÓN Y MASW



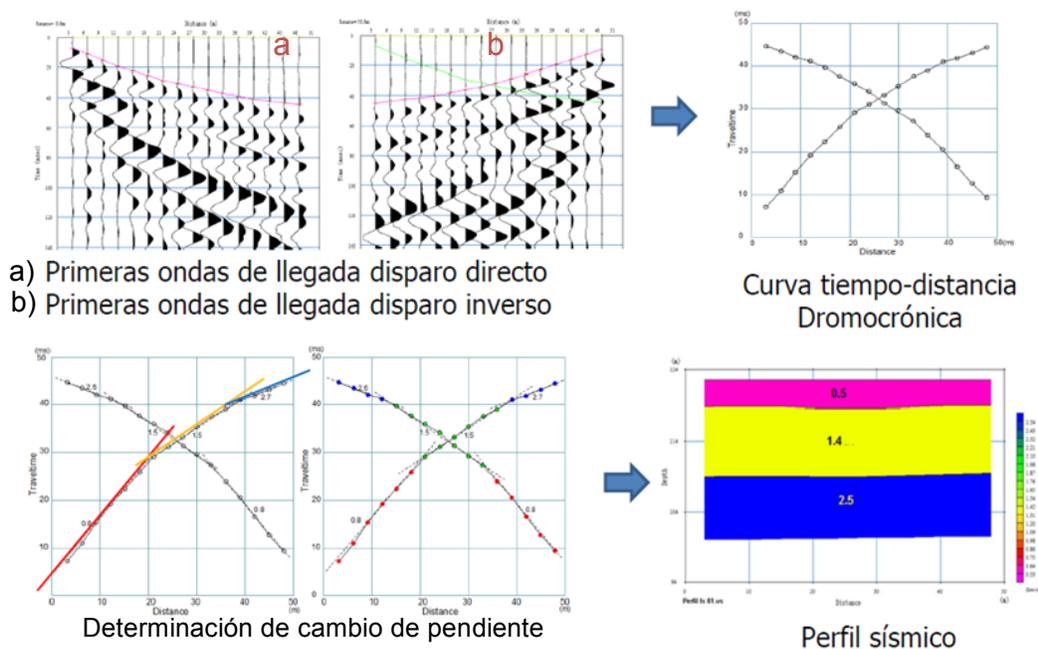
Tomada por: Carlos Alberto Gálvez Fuentes, 2014

### 2.1.3. Etapa gabinete o procesamiento de datos

Ésta consistió en la lectura de los tiempos de los primeros arribos de las trazas sísmicas para los perfiles de onda P. Para cada perfil sísmico se obtendrán en campo varios registros de las distintas posiciones en que fue colocada la fuente (en los extremos y en el centro del perfil). Para marcar la llegada de la onda sísmica se procede de la siguiente manera:

1. Se analizan los tiempos de arribo para los tiros de ida, de vuelta y del centro.
2. Se modifica la amplitud, para identificar con mejor precisión dichos tiempos de arribo; los cuales son atribuidos a tiempo-distancia
3. Se compila la información de tiempos y distancia y a través del *software SeisImager* se analizan, invierten e interpretan las lecturas de tiempos de arribos para la posterior construcción de dromocronas y de cada uno de los perfiles de velocidades de onda P ( $V_p$ ), (figura 19).

FIGURA 19  
PROCESAMIENTO DE REFRACCIÓN SÍSMICA



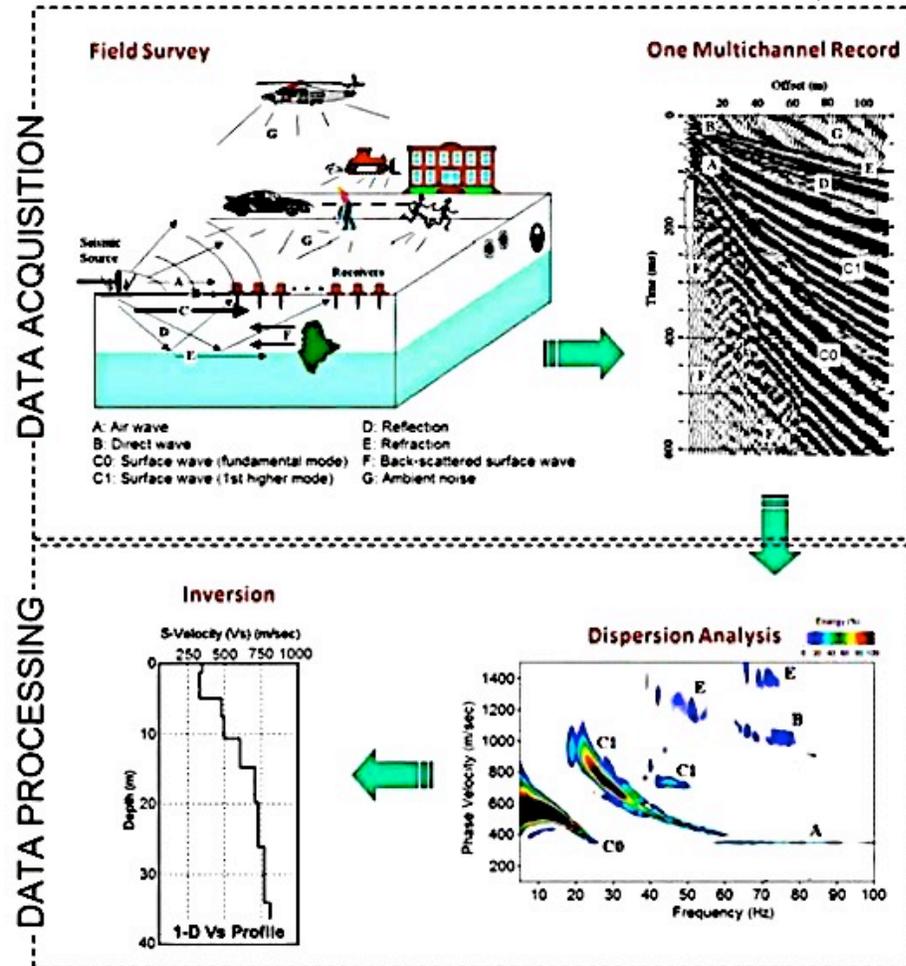
**Fuente:** Alva Jorge E. *Aplicaciones de la geofísica en la ingeniería Geotécnica*, Universidad Nacional de Ingeniería de Venezuela, Facultad de Ingeniería, 2013

Para el análisis de onda S se utilizó el paquete de cómputo *WaveEq*, en donde primero se realizó el análisis de fuente activa que fue la generación de ondas a través de un impacto con un martillo sobre una placa de metal y luego el de fuentes pasivas, que son aquellas que no

guardan relación directa con el estudio, como el tráfico, viento o cualquier otro medio natural que genere un tipo de perturbación en el subsuelo.

En el caso de los perfiles de onda S se seleccionó las amplitudes máximas y el rango de análisis para posteriormente construir una curva de dispersión que asocia la velocidad de fase  $V_s$  y la frecuencia de propagación, a partir de lo cual se invierten los valores de velocidad en función de profundidad y se obtiene un perfil de profundidad -  $V_s$ , (figura 20).

FIGURA 20  
ANÁLISIS MULTICANAL DE ONDAS SUPERFICIALES (MASW)



Fuente: Alva Jorge E. *Aplicaciones de la geofísica en la ingeniería Geotécnica*, Universidad Nacional de Ingeniería de Venezuela, Facultad de Ingeniería, 2013

Utilizando las tablas 2 y 3 que a continuación se presentan y el reconocimiento geológico realizado se hizo la interpretación de ondas Vs y Vp.

TABLA 2  
VELOCIDADES PARA MATERIALES VOLCÁNICOS PIROCLÁSTICOS

Tipo de Material	Vs(m/s)	Vp(m/s)
Aluvión 1	150	280
Aluvión 2	175	330
Cenizas Volcánicas 1	180	340
Cenizas Volcánicas 2	202	378
Depósitos Piroclásticos 1	590	1080
Depósitos Piroclásticos 2	800	1500

Fuente: C.A. Disponible en: <http://www.scielo.cl/fbpe/img/ric/v25n2/art06-12.jpg>  
(Visitada 25-12-2014)

TABLA 3  
TABLA DE VELOCIDADES PARA DIVERSOS TIPOS DE ROCA

Tipo de Formación	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
Suelo vegetal	300-700	100-300	1.7-2.4
Arenas secas	400-1200	100-500	1.5-1.7
Arenas mojadas	1500-2000	400-600	1.9-2.1
Lutitas y arcillas	1100-2500	200-800	2.0-2.4
Margas	2000-3000	750-1500	2.1-2.6
Esquistos saturados	1500-2200	500-750	2.1-2.4
Areniscas saturadas y porosas	2000-3500	800-1800	2.1-2.4
Caliza	3500-6000	2000-3300	2.4-2.7
Pizarras	2300-2600	1100-1300	1.8-3.1
Sal	4500-5500	2500-3100	2.1-2.3
Anhidrita	4000-5500	2200-3100	2.9-3.0
Dolomita	3500-6500	1900-3600	2.5-2.9
Granito	4500-6000	2500-3300	2.5-2.7
Basalto	5000-6000	2800-3400	2.7-3.1
Gneiss	4400-5200	2700-3200	2.5-2.7
Coal	2200-2700	1000-1400	1.3-1.8
Agua	1450-1500		1.0
Hielo	3400-3800	1700-1900	0.9
Petróleo	1200-1250		0.6-0.9

Fuente: C.A. Disponible en: <http://prod-http-80-800498448.useast1.elb.amazonaws.com-/w/images /6/6f/SeismicWaveVelocity.jpg> (Visitada 25-12-2014)

Habiendo determinado las diferentes velocidades, a profundidad, de onda P y S y conociendo que la propagación de este tipo de ondas está en función de la densidad de los materiales por los que atraviesa y las propiedades elásticas de los mismos, fue posible estimar los módulos elásticos (Poisson, Bulk, Rigidez y Elástico) en cada perfil levantado.

En base a la teoría, en un medio elástico isótropo la velocidad de onda P está dada por la siguiente ecuación<sup>16</sup>

$$V_p = \sqrt{\frac{k + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}$$

En donde:

Vp = Velocidad de onda P  
 ρ = Densidad del material  
 μ = Módulo de corte  
 k = Módulo de Bulk

Y la velocidad de onda S o de corte se define por la raíz cuadrada de la relación entre el módulo de corte (μ) y la densidad del material (ρ), lo cual describe la siguiente ecuación:<sup>17</sup>

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

En donde:

Vs = Velocidad de onda S  
 ρ = Densidad del material  
 μ = Módulo de corte

El módulo de Poisson se determina a través de la relación entre Vs y Vp, dicha relación está dada por la siguiente ecuación:<sup>18</sup>

$$\nu = \frac{1}{2} \frac{\left(\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2\right)}{\left(\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1\right)}$$

En donde:

ν = Módulo de Poisson  
 Vp = Velocidad onda P  
 Vs = Velocidad onda S

A partir de la determinación del módulo de Poisson (ν), y las velocidades de onda se lograron estimar los módulos de elasticidad (E) y de Bulk (k) a través de las siguientes ecuaciones<sup>19</sup>:

---

<sup>16</sup> Sheriff, RE. *Exploración sísmológica*: México, D.F.: Editorial Limusa, 1 991  
<sup>17</sup> Ibídem  
<sup>18</sup> Ibídem

$$k = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

En donde :

E = Módulo de elástico

$\nu$  = Módulo de Poisson

$\mu$  = Módulo de corte

k = Módulo de Bulk

Habiendo definido las ecuaciones a través de las cuales se estimaron los módulos de elasticidad se muestra un gráfico que relaciona la profundidad alcanzada con el perfil y los módulos elásticos. Además la tabla 4 se utilizó para la determinación de la calidad de los materiales para la cimentación de las estructuras de torre.

TABLA 4  
COMPARATIVA DE VALORES ADMISIBLES DE MÓDULO DE YOUNG  
PARA CIMENTACIONES

Estratigrafía de suelos	N <sub>spt</sub>	E(MPa/m <sup>2</sup> )
Suelos muy flojos o muy blandos	<10	< 8
Suelos flojos o blandos	10-25	8 – 40
Suelos medios	25-50	40 -100
Suelos compactos o duros	50 –Rechazo	100-500
Rocas blandas	Rechazo	500-8000
Rocas duras	Rechazo	8000-15000
Rocas muy duras	Rechazo	> 15000

**Fuente:** Manual de mecánica del suelo y cimentaciones, modelos de referencia para el cálculo de cimentaciones y elementos de contención, Facultad de ingeniería, UNAM, México, 2012



## CAPÍTULO III

### ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 3.1 Geología Local

La geología del área de investigación está caracterizada por materiales de origen volcánico; esto es, por sedimentos de caída o piroclastos. Por el tamaño de los granos; estos se clasifican como sedimentos tipo Lapilli; los cuales se presentan con tonalidades oscuras que van de gris a negro (fotografía 3).

FOTOGRAFÍA 3  
AFLORAMIENTO DE PIROCLÁSTOS VOLCÁNICOS



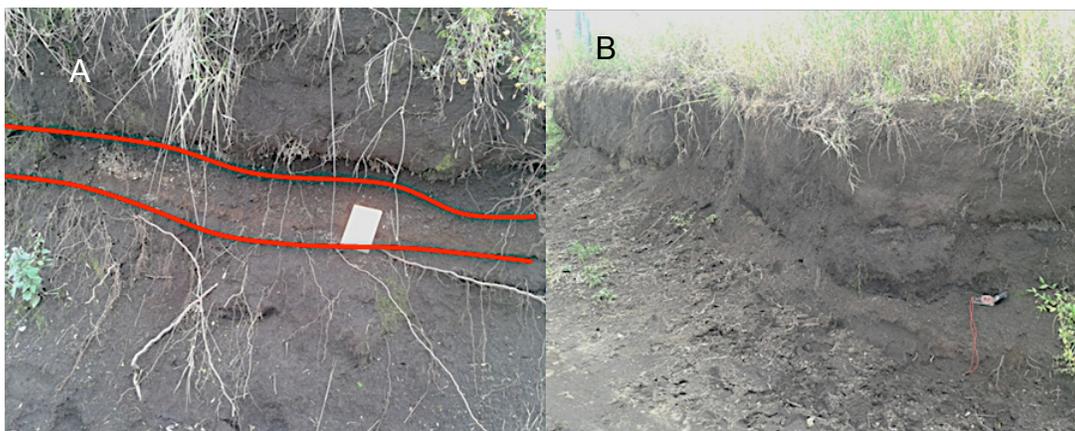
Tomada por: Julio Nery Mendoza Santa María. 2014

Los fragmentos piroclásticos se encuentran bien clasificados debido a que gradan de gruesos a finos, el tamaño de estos va desde 0,02 m hasta 0,3 m, poseen una textura escoriácea y en algunos fragmentos se logró observar la presencia de vidrio volcánico. Estos piroclastos a nivel de afloramiento se observaron poco consolidados con un grado de meteorización de 3 a 4.

En los afloramientos se observó una leve cubierta de suelos de tonalidad negra y naranja. El espesor de estos varía de un lugar a otro, en algunos sitios estos muestran un espesor que va de 0,5 m a 1 m y en otros difícilmente pasan los 0,5 m de espesor. Estos suelos son poco cohesivos y granulares.

Se observó, además en algunos sitios, horizontes de paleosuelos de tonalidad naranja, los cuales se encuentran intercalados con piroclastos tipo Lapilli (fotografía 4), indicando con ello eventos eruptivos diferentes y por ende piroclastos correspondientes a diferentes edades.

FOTOGRAFÍA 4  
A) AFLORAMIENTO DE PIROCLÁSTOS CON INTERCALACIONES DE PALEOSUELOS (LÍNEAS ROJAS) B) AFLORAMIENTO DE PIROCLÁSTOS TIPO LAPILLI

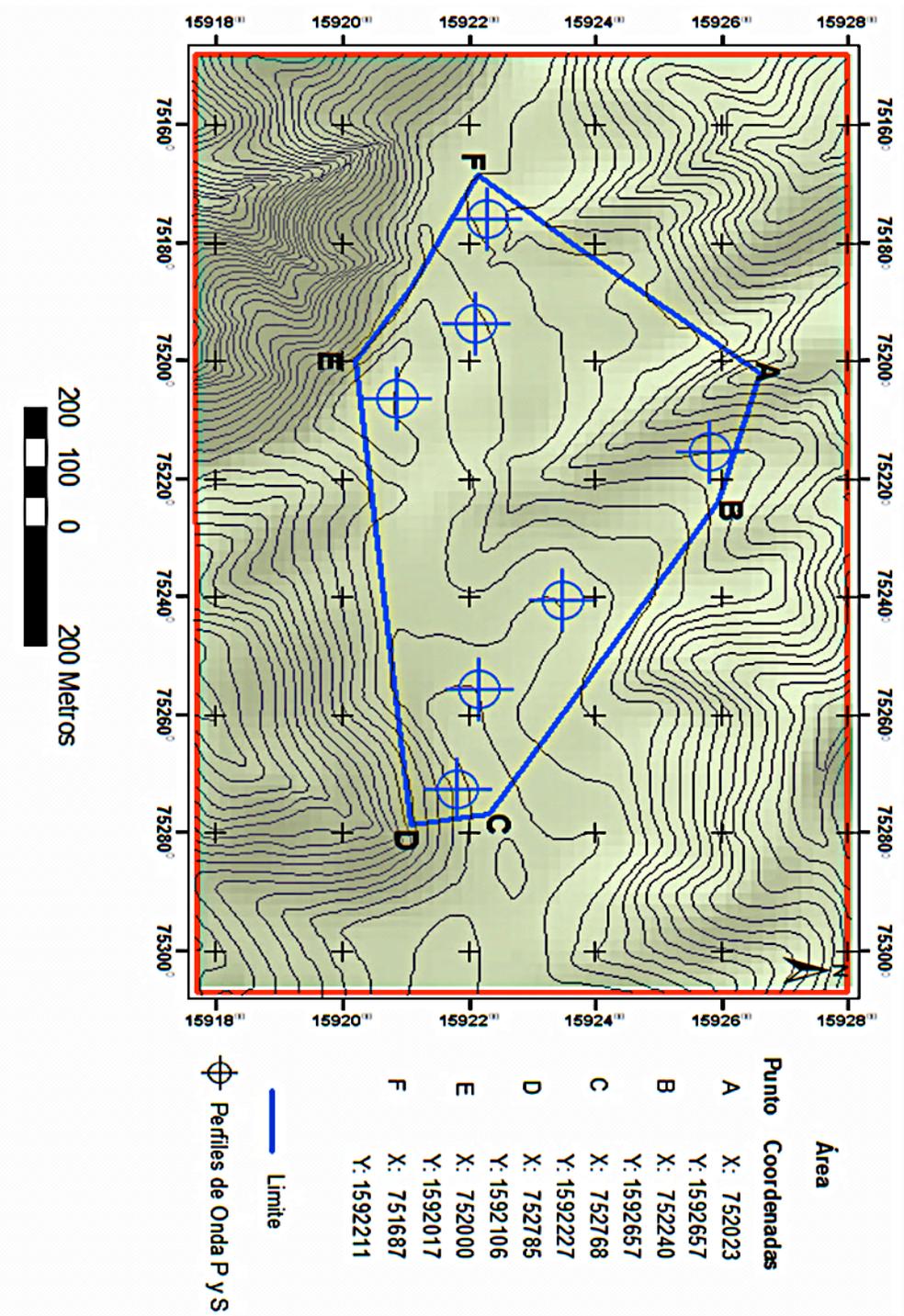


Tomada por: Julio Nery Mendoza Santa María. 2014

### **3.2 Refracción Sísmica y *MASW***

El estudio de refracción sísmica y *MASW* fue realizado en 7 sitios designados por la empresa encargada de la realización del proyecto, esto en base a estudios previos de factibilidad. El mapa No. 2 muestra la ubicación espacial de los perfiles sísmicos, cada uno de ellos están ubicados en sitios con topografía suave.

## MAPA 2 SITIOS DE ENSAYOS SUPERFICIALES



Las tablas 5 y 6, que se presentan a continuación son los resultados obtenidos de estimaciones de perfiles de Vp y Vs – aplicando las metodologías de refracción sísmica y *MASW* respectivamente.

**TABLA 5**  
**ESTIMACIONES DE VP PARA CADA SITIO DE ESTUDIO**

	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 4	Sitio 5	Sitio 6	Sitio 7
<b>Prof (m)</b>	<b>Vp(m/s)</b>						
<b>0.00</b>	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00
<b>1.07</b>	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00	300.00
<b>2.31</b>	300.00	300.00	300.00	300.00	412.32	300.00	300.00
<b>3.71</b>	404.33	447.26	300.00	435.80	412.32	300.00	300.00
<b>5.27</b>	404.33	447.26	441.41	435.80	412.32	473.29	525.01
<b>7.01</b>	404.33	447.26	441.41	435.80	520.16	473.29	525.01
<b>8.90</b>	404.33	611.45	441.41	435.80	520.16	628.13	525.01
<b>10.96</b>	594.86	611.45	607.16	435.80	520.16	628.13	700.06
<b>13.19</b>	594.86	611.45	607.16	622.88	520.16	628.13	700.06
<b>15.58</b>	594.86	611.45	607.16	622.88	520.16	628.13	700.06
<b>18.13</b>	594.86	611.45	607.16	622.88	520.16	628.13	700.06
<b>20.85</b>	594.86	611.45	607.16	622.88	520.16	628.13	700.06
<b>23.74</b>	594.86	611.45	607.16	622.88	520.16	628.13	700.06
<b>26.79</b>	594.86	611.45	607.16	622.88	520.16	628.13	700.06
<b>36.43</b>	594.86	611.45	607.16	622.88	520.16	628.13	700.06

**Fuente:** Investigación de campo, 2 014.

TABLA 6  
ESTIMACIONES DE VS PARA CADA SITIO DE ESTUDIO

	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 4	Sitio 5	Sitio 6	Sitio 7
<b>Prof (m)</b>	<b>Vs(m/s)</b>						
<b>0.00</b>	196.80	149.70	178.51	170.61	170.52	171.18	173.05
<b>1.07</b>	194.70	149.54	177.90	173.66	175.50	170.65	174.73
<b>2.31</b>	199.28	169.73	185.37	193.42	200.23	180.18	184.73
<b>3.71</b>	239.16	203.59	189.82	199.87	200.92	192.56	173.71
<b>5.27</b>	270.88	216.37	258.08	188.50	173.50	219.87	162.53
<b>7.01</b>	264.95	236.70	247.01	195.82	166.87	215.88	169.52
<b>8.90</b>	258.72	263.11	234.88	225.21	178.63	213.13	194.95
<b>10.96</b>	233.80	262.42	300.16	235.55	191.99	215.55	210.37
<b>13.19</b>	246.78	253.92	263.94	241.39	216.04	234.59	229.72
<b>15.58</b>	282.39	271.49	257.66	262.28	245.83	274.00	252.16
<b>18.13</b>	320.19	286.47	267.35	273.75	267.90	311.84	259.10
<b>20.85</b>	345.34	293.53	284.97	274.90	275.62	331.96	262.46
<b>23.74</b>	338.59	295.40	287.94	276.17	278.78	339.11	263.66
<b>26.79</b>	309.27	262.85	279.42	276.17	276.95	310.81	262.65
<b>36.43</b>	354.82	306.50	358.30	290.42	284.58	351.13	265.50

Fuente: Investigación de campo, 2 014.

La tabla 7 muestra las estimaciones numéricas de módulos elásticos para cada uno de los sitios, donde se demuestra que a partir de los 5 m de profundidad los parámetros elásticos de los materiales son estables y de buena calidad.

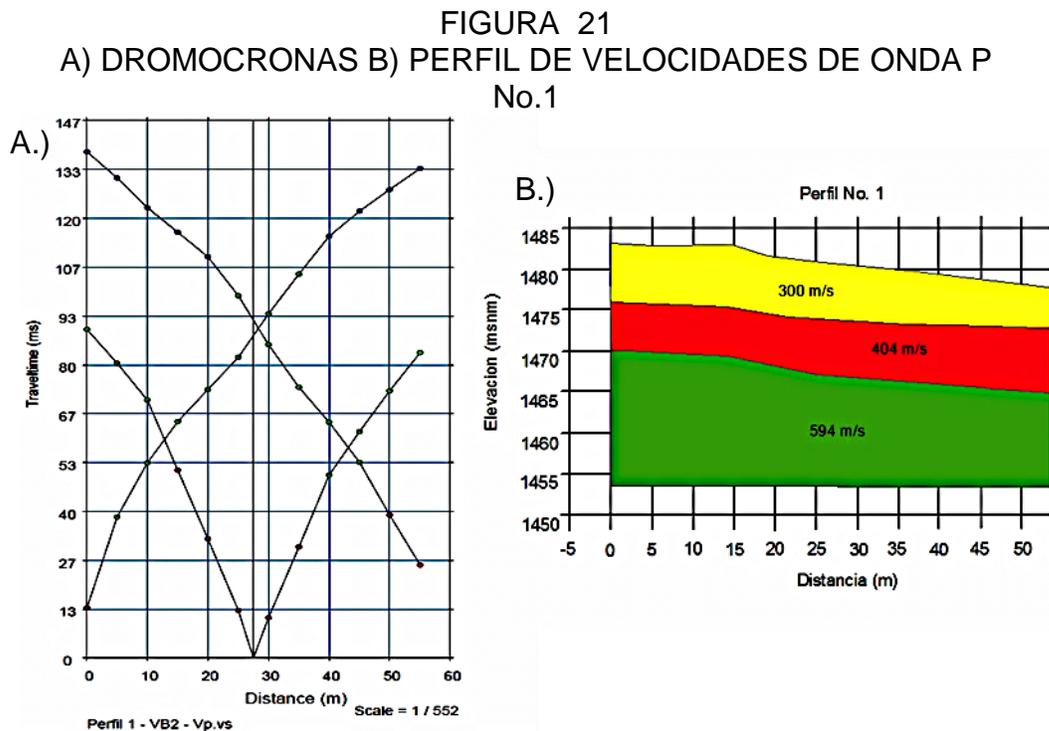
**TABLA 7**  
**ESTIMACIÓN DE MODÚLOS ELÁSTICOS PARA CADA SITIO**

Sitio	Módulo	Resultados														
	Profundidad (m)	0.00	1.07	2.31	3.71	5.27	7.01	8.90	10.36	13.19	15.58	18.13	20.85	23.74	26.79	36.43
1	Poisson - $\nu$	0.12	0.14	0.11	0.23	0.09	0.12	0.15	0.41	0.40	0.35	0.30	0.25	0.26	0.31	0.22
	Rigidez - $G$ (MPa)	71.09	69.58	72.89	104.99	135.43	129.57	122.86	100.89	111.78	145.96	188.18	221.33	211.60	175.56	231.08
	Elástico - E (Mpa)	159.57	158.10	161.11	258.46	296.00	291.20	283.40	284.24	312.11	395.43	487.78	551.47	533.39	461.64	565.63
	Bulk - $K$ (MPa)	70.40	72.42	68.00	160.09	121.17	128.98	136.25	518.60	500.46	453.08	398.60	361.62	370.98	415.43	341.40
2	Poisson - $\nu$	0.33	0.33	0.26	0.37	0.35	0.31	0.39	0.39	0.40	0.38	0.36	0.35	0.35	0.39	0.33
	Rigidez - $G$ (MPa)	41.13	41.05	52.88	76.08	86.41	103.41	126.36	119.38	111.77	136.41	152.30	158.15	161.06	126.81	172.43
	Elástico - E (Mpa)	109.76	109.57	133.74	208.35	232.82	270.00	350.37	331.18	312.02	375.74	414.07	427.09	434.14	351.69	459.42
	Bulk - $K$ (MPa)	110.35	110.46	94.69	265.74	254.00	231.33	513.93	488.93	499.08	510.07	490.79	475.36	475.30	517.15	456.33
3	Poisson - $\nu$	0.23	0.23	0.19	0.17	0.24	0.27	0.30	0.34	0.38	0.39	0.38	0.36	0.35	0.37	0.23
	Rigidez - $G$ (MPa)	58.49	58.09	61.32	62.46	118.85	111.99	101.26	165.37	128.58	121.52	131.19	149.05	152.18	143.31	234.33
	Elástico - E (Mpa)	143.41	142.76	146.09	145.69	294.83	284.91	263.78	442.62	355.77	337.86	362.01	405.05	412.39	391.41	577.78
	Bulk - $K$ (MPa)	87.21	87.74	78.84	72.73	189.23	208.31	222.62	456.14	508.96	512.73	501.71	477.89	473.72	485.55	360.43
4	Poisson - $\nu$	0.26	0.25	0.14	0.37	0.38	0.37	0.32	0.29	0.41	0.39	0.38	0.38	0.38	0.38	0.36
	Rigidez - $G$ (MPa)	53.43	55.35	68.67	71.29	61.60	66.47	93.61	101.84	106.36	126.26	137.55	138.71	139.99	140.00	154.81
	Elástico - E (Mpa)	134.74	138.16	157.16	194.88	170.61	182.60	246.72	263.49	300.27	351.58	379.71	382.58	385.71	385.73	421.44
	Bulk - $K$ (MPa)	93.96	91.39	73.63	243.87	247.11	240.61	225.73	212.82	566.37	543.78	528.74	527.18	525.48	525.47	505.71
5	Poisson - $\nu$	0.26	0.24	0.35	0.34	0.39	0.44	0.43	0.42	0.40	0.36	0.32	0.30	0.30	0.30	0.29
	Rigidez - $G$ (MPa)	53.37	56.54	73.79	74.51	55.56	51.11	55.32	67.66	85.19	110.31	131.73	139.44	142.65	140.78	149.47
	Elástico - E (Mpa)	134.64	140.19	198.61	200.33	154.73	147.48	158.55	192.30	237.81	299.21	347.64	363.87	370.46	366.65	384.57
	Bulk - $K$ (MPa)	94.04	89.81	214.52	214.43	239.70	428.47	395.28	406.42	380.28	346.79	320.98	310.71	306.43	308.91	300.09
6	Poisson - $\nu$	0.26	0.26	0.22	0.15	0.36	0.37	0.43	0.43	0.42	0.38	0.34	0.31	0.29	0.34	0.27
	Rigidez - $G$ (MPa)	53.79	53.45	59.59	68.06	88.24	85.06	78.74	80.55	101.57	139.34	179.48	204.51	213.42	167.47	228.82
	Elástico - E (Mpa)	135.39	134.79	145.14	156.49	240.43	232.84	225.98	230.88	288.25	385.27	479.74	534.29	552.47	448.10	582.45
	Bulk - $K$ (MPa)	93.48	93.92	85.74	74.45	291.23	295.46	578.97	576.57	592.79	546.46	488.91	459.56	447.68	460.68	427.16
7	Poisson - $\nu$	0.25	0.24	0.19	0.25	0.45	0.44	0.42	0.45	0.44	0.43	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42
	Rigidez - $G$ (MPa)	54.97	56.04	62.64	55.38	47.14	49.82	69.76	81.68	97.93	117.35	123.91	127.14	129.02	126.63	130.82
	Elástico - E (Mpa)	137.49	139.34	149.66	138.22	136.42	143.65	198.12	236.93	281.99	334.57	352.06	360.64	365.72	359.13	370.48
	Bulk - $K$ (MPa)	91.90	90.48	81.68	91.35	429.02	411.40	412.92	795.65	778.97	748.08	739.34	735.03	737.53	730.72	735.13

Fuente: Investigación de campo, 2014.

### 3.2.1 Sitio No. 1

Con base a la determinación del arribo de onda P en el primer perfil realizado y habiendo sido procesados los arribos a través del software Plotrefa, se estableció en el análisis de las dromocronas un modelo de 3 capas horizontales (figura 21), en el cual la primera capa tiene una velocidad de 300 m/s y corresponde a una unidad somera de suelos volcánicos poco consolidados con un espesor de capa de 4 m.



**Fuente:** Investigación de Campo. 2 014.

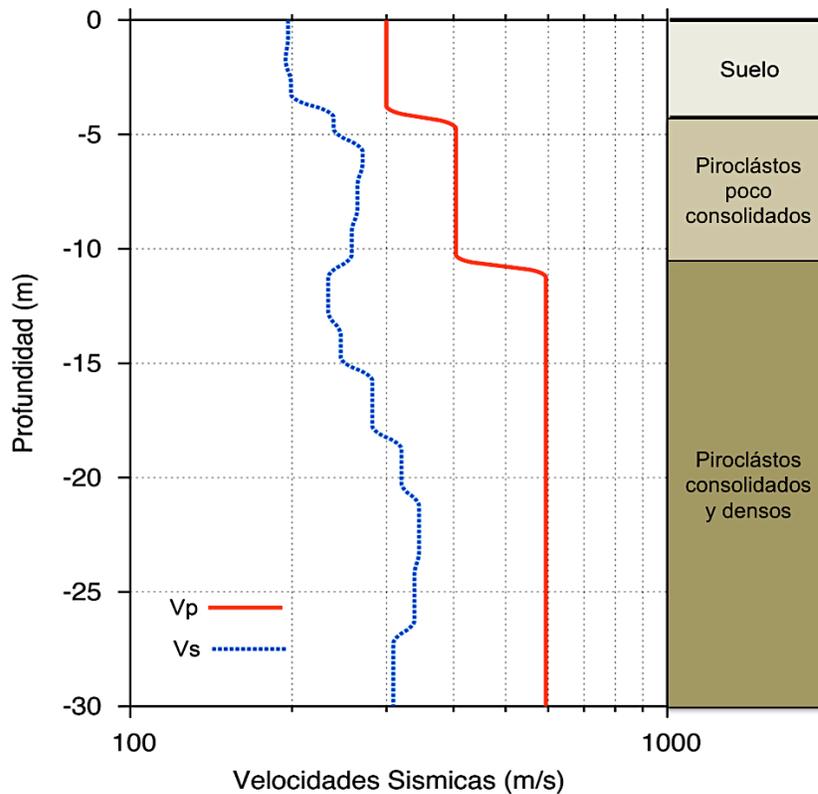
La segunda velocidad que se determinó fue de 405,30 m/s y se asoció a una unidad de piroclástos poco consolidados con un espesor de capa de 6,50 m. La tercera capa presentó una velocidad de 594,90 m/s, asociándose a una unidad de piroclástos consolidados y densos, su espesor es mayor a 19,50 m.

De la interpretación de la velocidad de fase y frecuencia, se estableció un gráfico de profundidad vs velocidad, en donde se logró determinar cierta relación con respecto a la estratigrafía de capas obtenidas del perfil de onda P (figura 22).

En el perfil de Vs los primeros 4 m mantienen una velocidad media de 196,8 m/s, la cual se correlaciona con la primera capa de onda P, a partir de los 4 m se observa un aumento en la velocidad correspondiente a una segunda velocidad media de 260,45 m/s, está asociada con la capa 2 de onda P. Existen variaciones a profundidad que pueden estar asociados a los intervalos de paleo suelos observados en algunos afloramientos.

A partir de los 11 m se observó un nuevo cambio de velocidad, con una media de 300,51 m/s, y que se correlaciona con la tercera capa obtenida de onda P y se asocia con una unidad de piroclastos, la variación de velocidad puede estar asociada a los espacios vacíos producto de la textura escoriácea.

FIGURA 22  
ESTRATIGRAFÍA DE CAPAS Y DE PROFUNDIDAD VS  
VELOCIDAD DE ONDA P Y ONDA S DEL PERFIL SÍSMICO 1



Fuente: Investigación de Campo. 2 014.

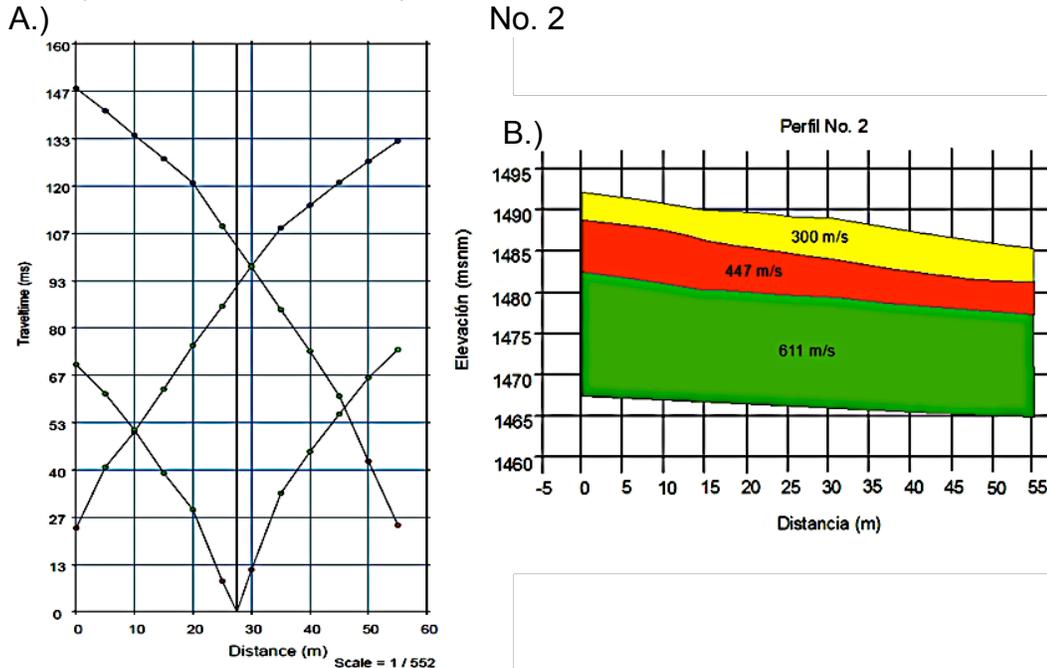
### 3.2.2. Sitio No. 2

Se logró determinar en el análisis de las dromocronas un modelo de 3 capas (figura 23), en donde se estableció que la velocidad de la primera capa fue de 300 m/s y corresponde a una unidad somera de suelos volcánicos poco consolidados, el espesor de la capa es de 3 m.

La segunda velocidad que se determinó fue de 447,30 m/s y ésta se asoció a una capa de piroclastos poco consolidados con un espesor de 5 m. La tercera capa presentó una velocidad de 611 m/s, a la que se le asocia una unidad de piroclastos más consolidados y densos, el espesor es mayor a los 22 m.

FIGURA 23

A.) DROMOCRONAS B.) PERFIL DE VELOCIDADES DE ONDA P



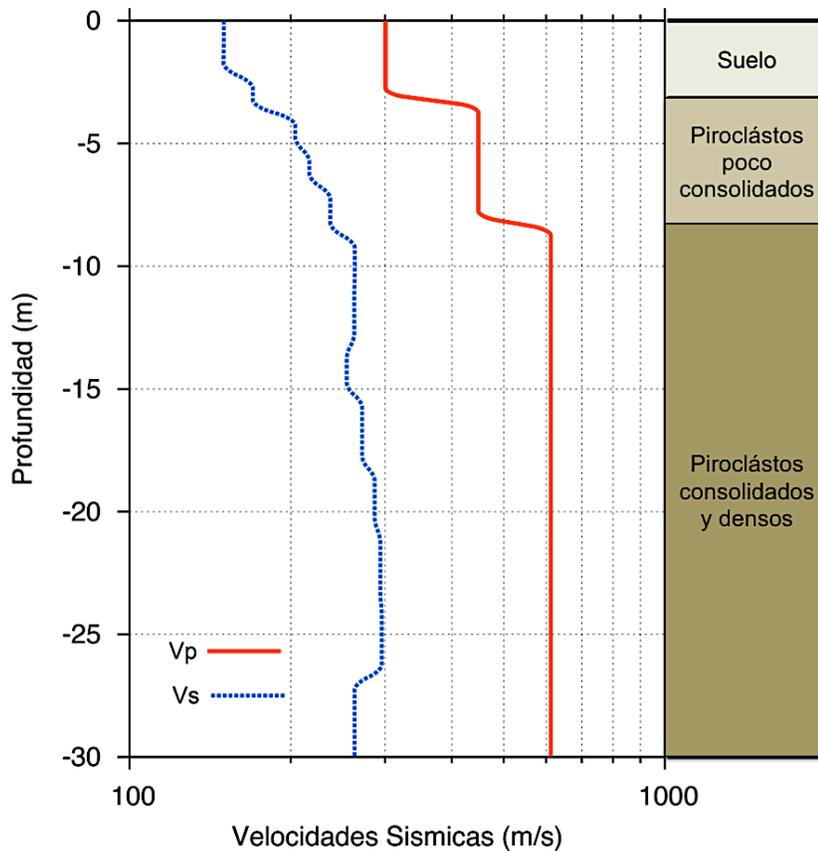
Fuente: Investigación de Campo. 2 014.

De la interpretación de la velocidad de fase y frecuencia, se obtuvo un perfil de profundidad vs velocidad (figura 24).

En el perfil de Vs los primeros 2,5 m corresponden a una velocidad media de 155,38 m/s, está asociada a una cubierta de suelos, a partir de los 2,5 m se observa un aumento en la velocidad correspondiente a una segunda velocidad media de 213,97 m/s y que va en aumento debido a la densidad de los materiales piroclásticos y se puede asociar con la capa 2 de onda P.

A partir de los 8 m se observó un nuevo cambio de velocidad, ahora con una media de 273,90 m/s, la cual se correlaciona con la tercera capa obtenida de onda P y se asocia con piroclástos densos, las variaciones de velocidad en profundidad puede estar asociada a espacios vacíos propios del tipo de roca.

FIGURA 24  
ESTRATIGRAFÍA DE CAPAS Y DE PROFUNDIDAD VS  
VELOCIDAD DE ONDA P Y ONDA S DEL PERFIL SÍSMICO 2



Fuente: Investigación de Campo. 2 014.

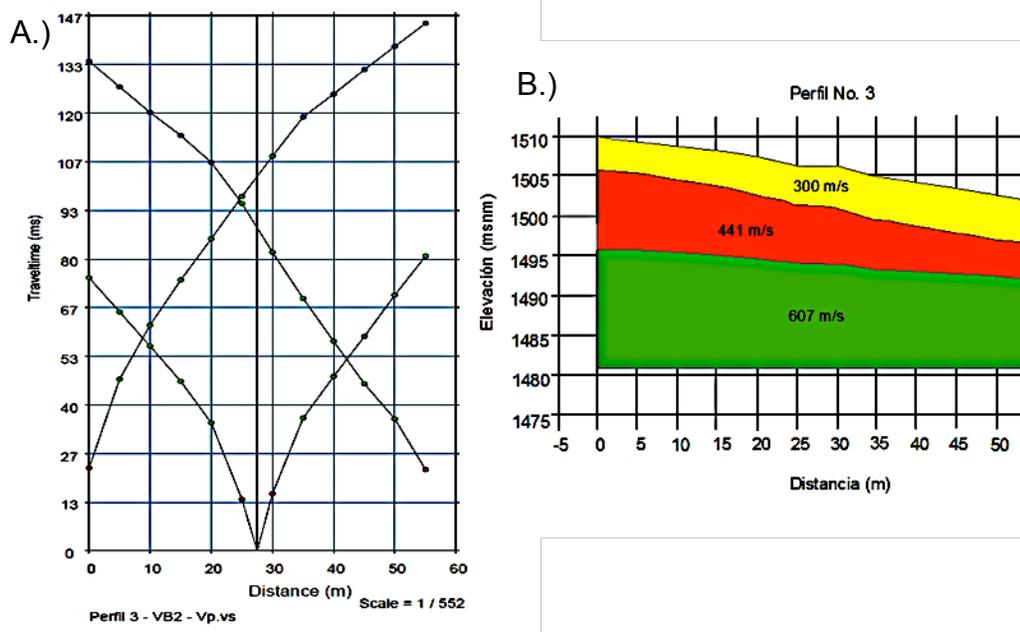
### 3.2.3. Sitio No. 3

Se determinó en el análisis de dromocronas de los diferentes puntos de disparo un modelo de 3 capas (figura 25), en el que estableció que la primera velocidad es de 300 m/s y corresponde a una capa somera de suelos volcánicos poco consolidados con un espesor de 4 m.

La segunda velocidad que se determinó fue de 441 m/s y ésta se asoció a una capa de piroclastos poco consolidados con espesor de 5 m, la tercera capa presentó una velocidad de 607,16 m/s asociándose a una unidad de piroclastos consolidados y densos.

FIGURA 25

A.) DROMOCRONAS B.) PERFIL DE VELOCIDADES DE ONDA P No. 3



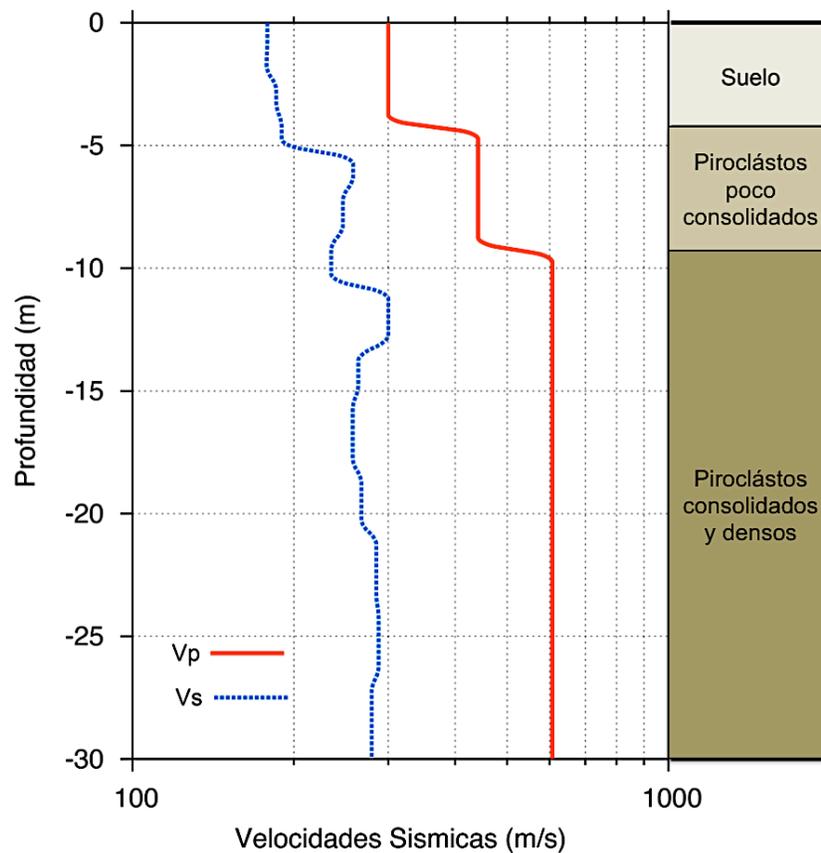
Fuente: Investigación de Campo. 2 014.

De la interpretación de la velocidad de fase y frecuencia, se obtuvo un perfil de profundidad vs velocidad (figura 26).

En el perfil de Vs los primeros 5 m mostraron una velocidad media de 181,92 m/s la cual se asocia con la primera capa de onda P, a partir de los 5 m se presenta un cambio de velocidad correspondiente a una segunda velocidad media de 237,68 m/s relacionándose con la capa 2 de onda p, existen variaciones a profundidad que pueden estar asociadas a los intervalos de paleo suelos.

Después de los 11 m se determinó otra variación de velocidad con una media de 274,70 m/s la cual coincide con el inicio de la tercera capa obtenida de onda P y se asocia con la unidad de piroclastos, estos pueden estar más consolidados pues no existe una variación tan marcada de velocidad.

FIGURA 26  
ESTRATIGRAFÍA DE CAPAS Y DE PROFUNDIDAD VS  
VELOCIDAD DE ONDA P Y ONDA S DEL PERFIL SÍSMICO 3



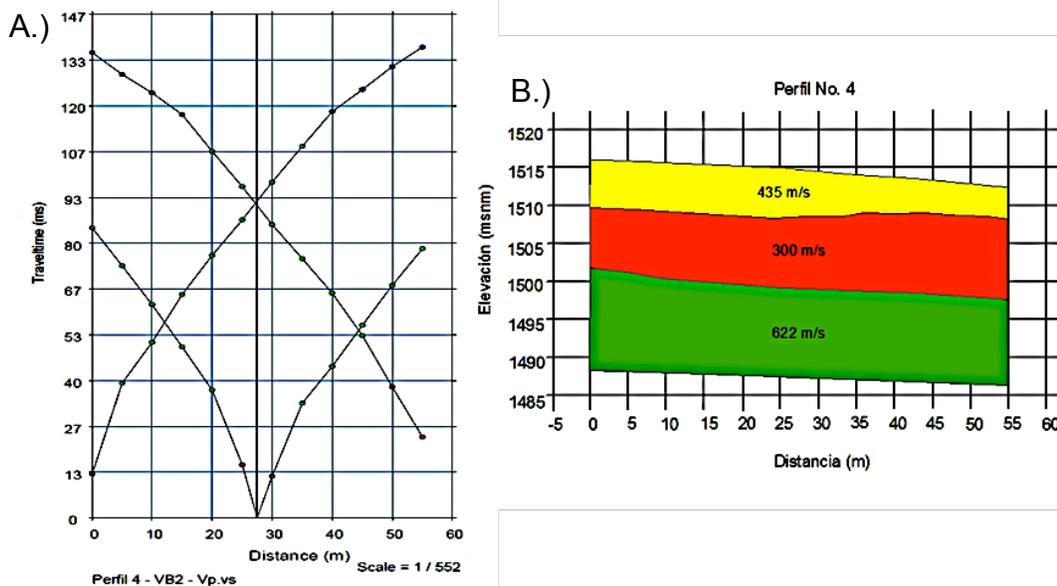
Fuente: Investigación de Campo. 2 014.

#### 3.2.4. Sitio No. 4

Se logró determinar mediante el análisis de las dromocronas un modelo de 3 capas casi horizontales (figura 27). Se estableció que la primera velocidad es de 300 m/s y corresponde a una capa somera de suelos volcánicos poco consolidados con un espesor de capa de 4 m.

La segunda velocidad que se determinó fue de 435,80 m/s y esta se asoció a una capa de piroclastos poco consolidados con espesor de 8 m. A la tercera capa se le determinó una velocidad de 622,88 m/s, asociándose a una unidad de piroclastos consolidados y densos con un espesor mayor a 18 m.

FIGURA 27  
A.) DROMOCRONAS B.) PERFIL DE VELOCIDADES DE ONDA P No. 4



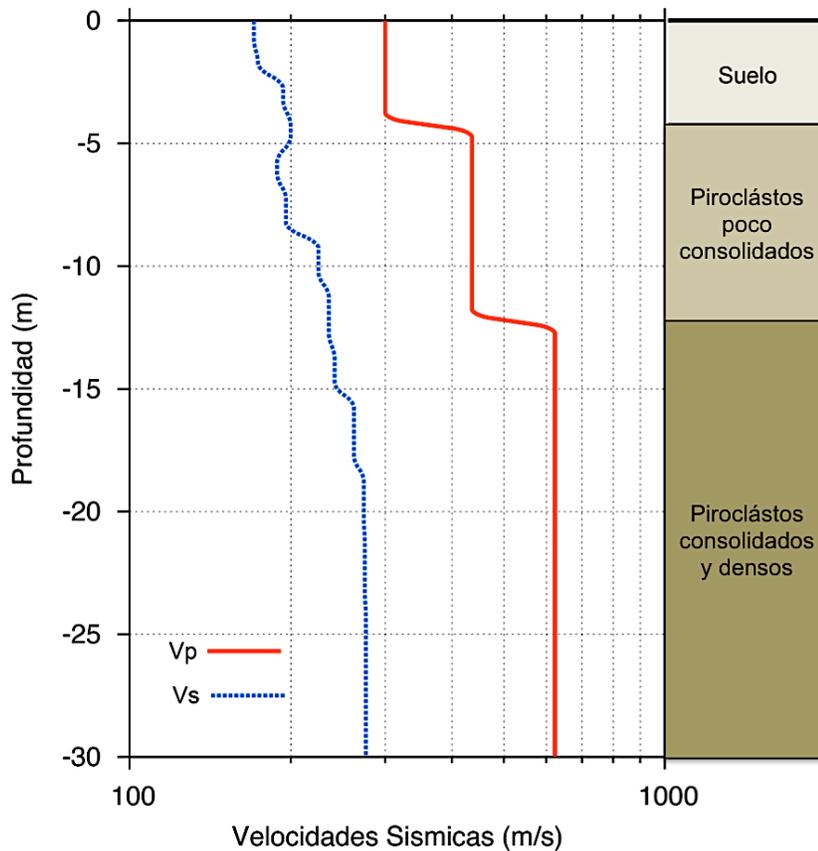
Fuente: Investigación de Campo. 2 014.

De la interpretación de la velocidad de fase y frecuencia, se obtuvo un perfil de profundidad vs velocidad (figura 28).

En el perfil de Vs los primeros 5 m corresponden a una velocidad media de 182,14 m/s, ésta velocidad indica la presencia de una capa somera que está relacionada con la primera capa determinada en el perfil de onda P, a partir de los 5 m se observó un intervalo, de 7 m, con una velocidad media de 209,75 m/s, la cual se correlaciona a la capa 2 de onda P, las variaciones de velocidad están asociadas al tipo de roca.

A partir de los 12 m, un tercer cambio de velocidad que se mantuvo con una media de 267,19 m/s hasta la profundidad alcanzada en el perfil sísmico, este último cambio de velocidad se correlaciona con el cambio de capa obtenido en el perfil de onda P.

FIGURA 28  
ESTRATIGRAFÍA DE CAPAS Y DE PROFUNDIDAD VS  
VELOCIDAD DE ONDA P Y ONDA S DEL PERFIL SÍSMICO 4



Fuente: Investigación de Campo. 2 014.

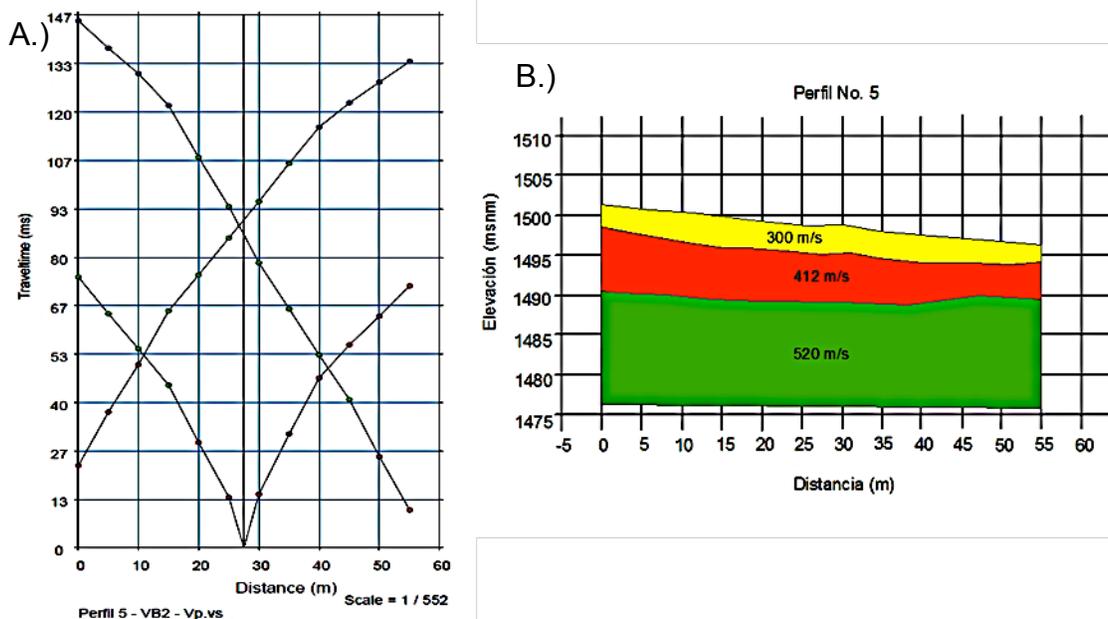
### 3.2.5. Sitio No. 5

Se determinó en el análisis de las dromocronas un modelo de 3 capas casi horizontales (figura 29), en el cual se estableció que la primera velocidad fue de 300 m/s y correspondió a una capa somera de suelos volcánicos poco consolidados con un espesor de capa de 1,5 m.

La segunda velocidad que se determinó en éste perfil es de 412,36 m/s y esta se asoció a una capa de piroclastos poco consolidados con un espesor de 5,50m. La tercera capa mostró una velocidad de 520,16 m/s y se asoció a la unidad de piroclastos volcánicos con una densidad menor a los perfiles anteriores esto debido a un descenso en la velocidad de onda P.

FIGURA 29

A.) DROMOCRONAS B.) PERFIL DE VELOCIDADES DE ONDA P No. 5



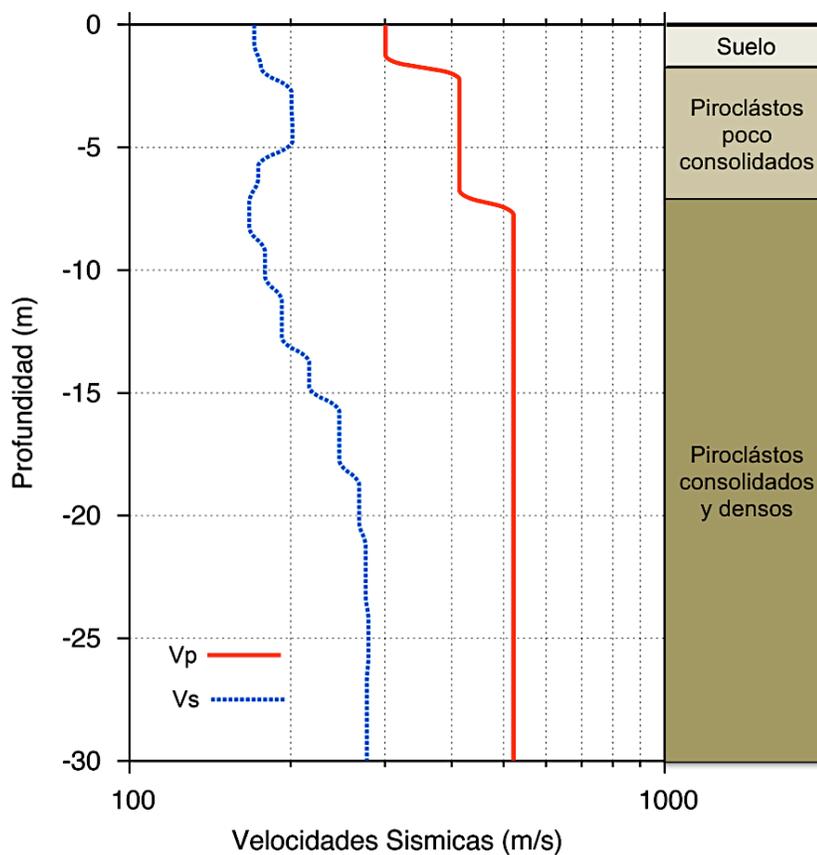
Fuente: Investigación de Campo. 2 014.

De la interpretación de la velocidad de fase y frecuencia, fue posible contrastar la coincidencia con respecto al de onda P en la estratigrafía de capas (figura 30).

En el perfil de Vs se observó una velocidad media de 171,76 m/s en los primeros 2 m, ésta se correlaciona con la primera capa de onda P. A partir de los 2 m se observa un aumento en la velocidad que presentó una media de 187,85 m/s, éste aumento coincide con el cambio de capa de onda P, aunque existe una disminución de velocidad esta puede deberse a la presencia de espacios vacíos propios de los piroclastos y a una baja densidad.

Existe un tercer cambio de velocidad, el cual presentó una media de 241,67 m/s, esta puede correlacionarse con la tercera capa obtenida de onda P y se asoció con una unidad de piroclastos, el aumento de velocidad está en función del aumento de su densidad.

FIGURA 30  
ESTRATIGRAFÍA DE CAPAS Y DE PROFUNDIDAD VS  
VELOCIDAD DE ONDA P Y ONDA S DEL PERFIL SÍSMICO 5



Fuente: Investigación de Campo. 2 014.

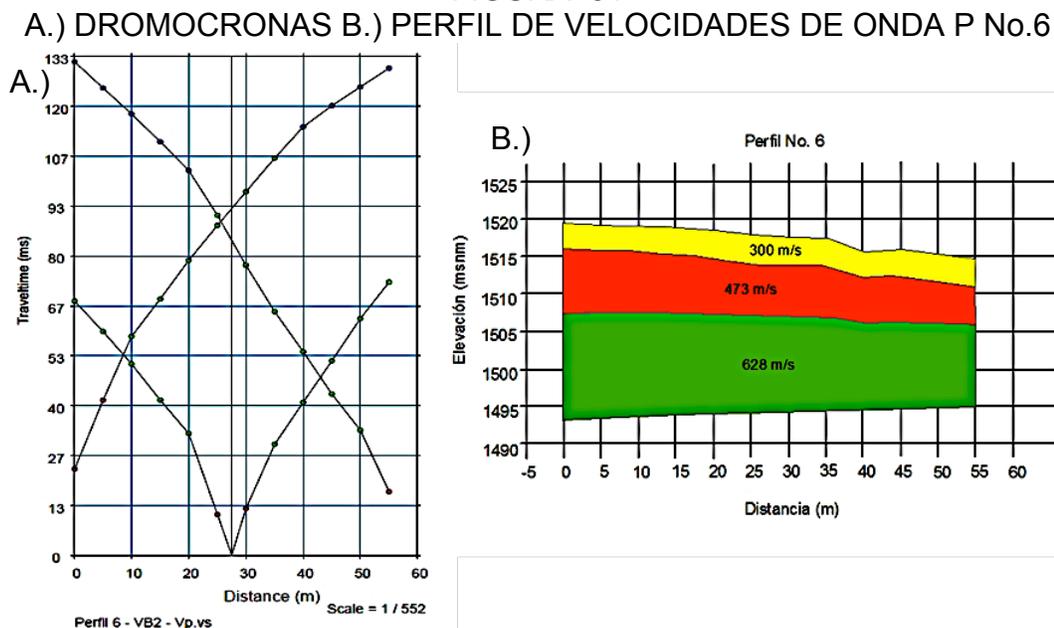
### 3.2.6. Sitio No. 6

Se determinó este sitio un modelo de 3 capas (figura 31), en el cual se estableció que la primera velocidad es de 300 m/s y corresponde a una capa somera de suelos volcánicos poco consolidados con un espesor de capa de 3 m.

La segunda velocidad que se determinó fue de 473,29 m/s y esta corresponde a una capa de piroclastos poco consolidados con un espesor de capa de 4,5 m. La tercera capa muestra una velocidad de 628,13 m/s,

asociándose con piroclástos consolidados y densos, el espesor estimado es mayor a 22,50 m.

FIGURA 31



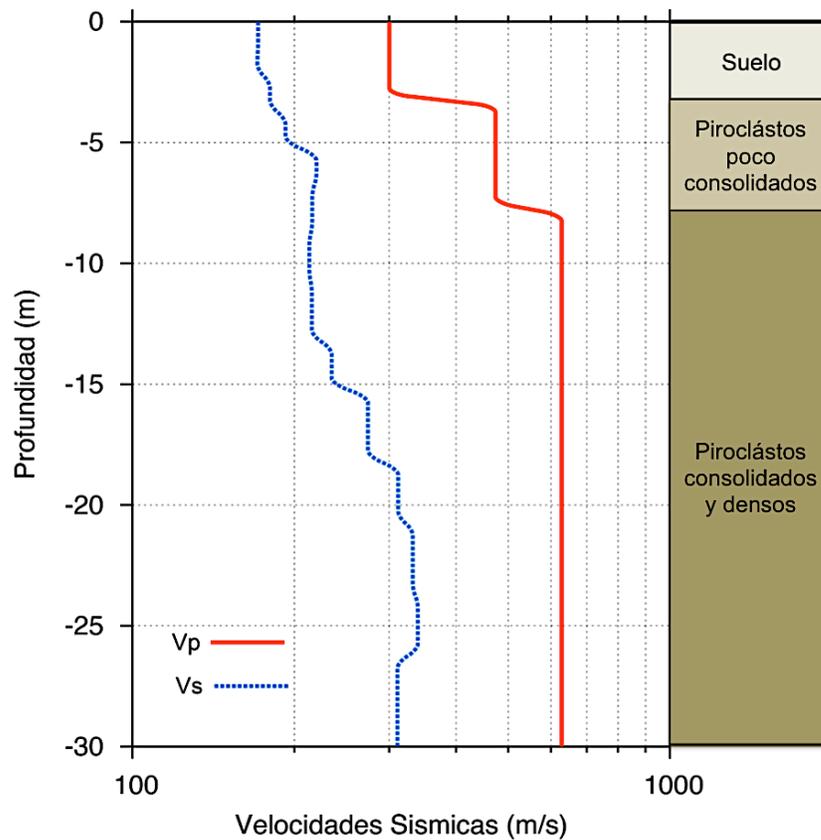
Fuente: Investigación de Campo. 2 014.

De la interpretación de la velocidad de fase y frecuencia, el perfil 1-D mantiene relación con el perfil de capas obtenido del análisis de onda P, (figura 32).

En el perfil de Vs en los primeros 3 m se observó una velocidad media de 173,60 m/s, que se correlaciona con la primera capa determinada de onda P. Posteriormente se observó un aumento en la velocidad media de 205,47 m/s, la cual se correlaciona con el inicio de la segunda capa determinada en el perfil de onda P.

En la gráfica de Vs se asoció un tercer cambio de velocidad a partir de los 10 m con una media de 281,72 m/s, la cual se asoció con la tercera capa obtenida de onda P, que se asocia a la unidad de piroclástos volcánicos. La variación de velocidad puede estar asociada a los espacios vacíos producto de la textura escoriácea del tipo de roca.

FIGURA 32  
ESTRATIGRAFÍA DE CAPAS Y DE PROFUNDIDAD VS  
VELOCIDAD DE ONDA P Y ONDA S DEL PERFIL SÍSMICO 6



Fuente: Investigación de Campo. 2 014.

### 3.2.7. Sitio No. 7

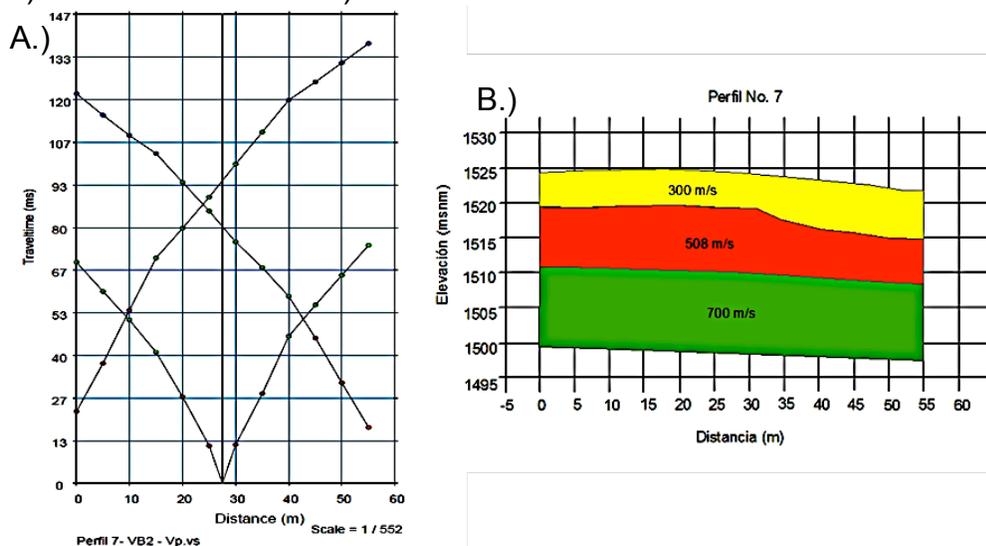
En el análisis de las dromocronas se determinó un modelo de 3 capas casi horizontales (figura 33), en el cual se estableció que la primera velocidad de 300 m/s corresponde a una capa somera de suelos volcánicos poco consolidados con un espesor de 5 m.

La segunda velocidad que se determinó fue de 508,94 m/s y ésta se asoció a una capa de piroclastos poco consolidados con espesor de 7 m. La tercera capa mostró una velocidad de 700,06 m/s asociándose a piroclastos consolidados que poseen una buena densidad debido a que se registra una

mayor velocidad en comparación con los demás perfiles, el espesor de esta capa es mayor a 19 m.

FIGURA 33

A.) DROMOCRONAS B.) PERFIL DE VELOCIDADES DE ONDA P No. 7



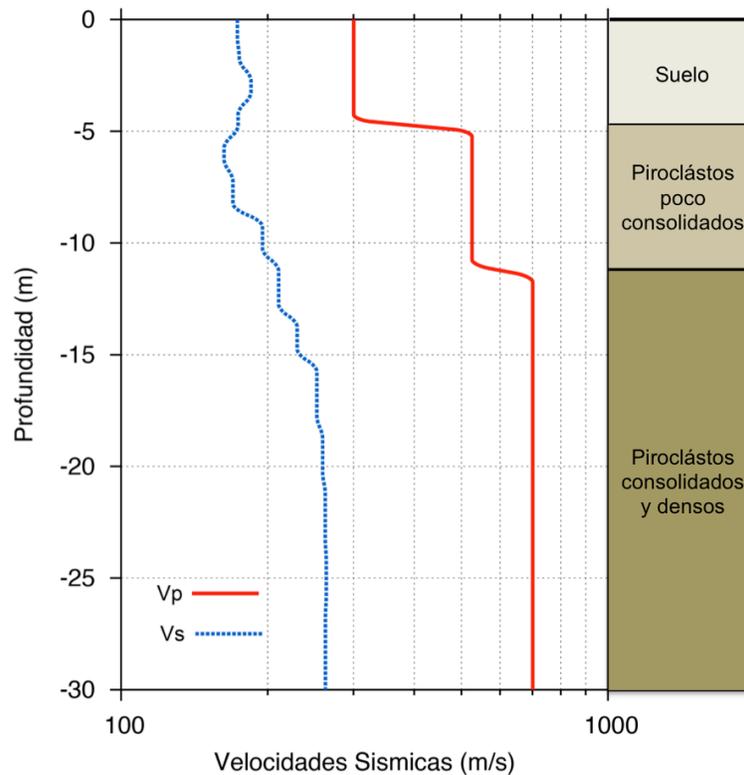
**Fuente:** Investigación de Campo. 2 014.

De la interpretación de la velocidad de fase y frecuencia, se obtuvo el perfil de profundidad vs velocidad, este se muestra en la figura 34.

En el perfil de Vs en los primeros 5m, una velocidad media de 177,39 m/s puede correlacionarse con las primera capa de onda P, a partir de los 4,5 m existe una disminución de velocidad que posteriormente aumenta teniendo una velocidad media de 178,80 m/s que puede estar asociada con la capa 2 de onda P. La baja velocidad se asoció a los espacios vacíos presentes en los piroclástos.

A partir de los 12 m de profundidad empieza a existir un aumento de velocidad y se alcanza una media de 251,66 m/s, la cual se correlaciona con la tercera capa obtenida de onda P y se asocia piroclástos densos. Después de los 15 m se observa que no existe una variación en la velocidad (constante) y por tanto un tipo de roca que no presenta muchas variaciones en su textura.

FIGURA 34  
ESTRATIGRAFÍA DE CAPAS Y DE PROFUNDIDAD VS  
VELOCIDAD DE ONDA P Y ONDA S DEL PERFIL SÍSMICO 7



Fuente: Investigación de Campo. 2 014.

### 3.3 Módulos Elásticos

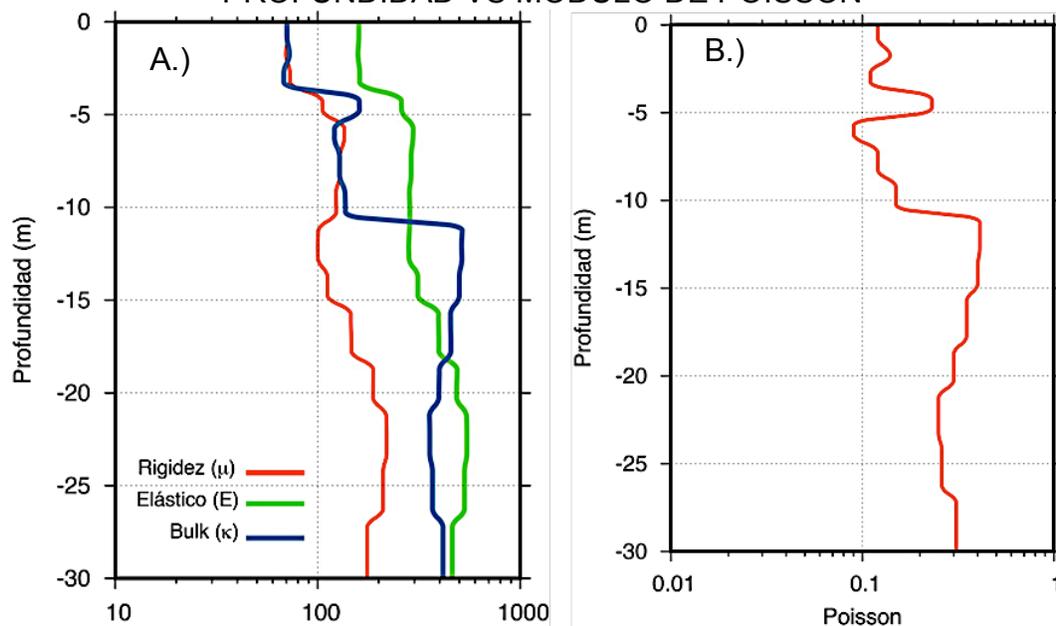
#### 3.3.1 Módulos Elásticos del sitio No. 1

En el primer perfil la primera capa se caracterizó por poseer un módulo de Bulk de 60MPa por unidad de área, mientras que su módulo de corte es de 60 MPa y el módulo de Young estimado es de 160 MPa indicando así que al aplicarle esta presión sufrirá una deformación longitudinal por unidad de área.

Para la segunda capa determinada de Vp, se observó que el módulo de Bulk o de compresibilidad obtenido oscilaba entre 120 MPa – 160 MPa, el módulo de corte se encuentra entre 105 MPa – 135 MPa. Indicando que a presiones mayores a éstas el material tendería a sufrir una deformación

cortante. La deformación longitudinal tiene un soporte de presiones que se encuentra entre 258 MPa - 295 MPa.

FIGURA 35  
A) PROFUNDIDAD VS MÓDULO DE RIGIDEZ, ELÁSTICO Y BULK, B) PROFUNDIDAD VS MÓDULO DE POISSON



Fuente: Investigación de Campo. 2 014.

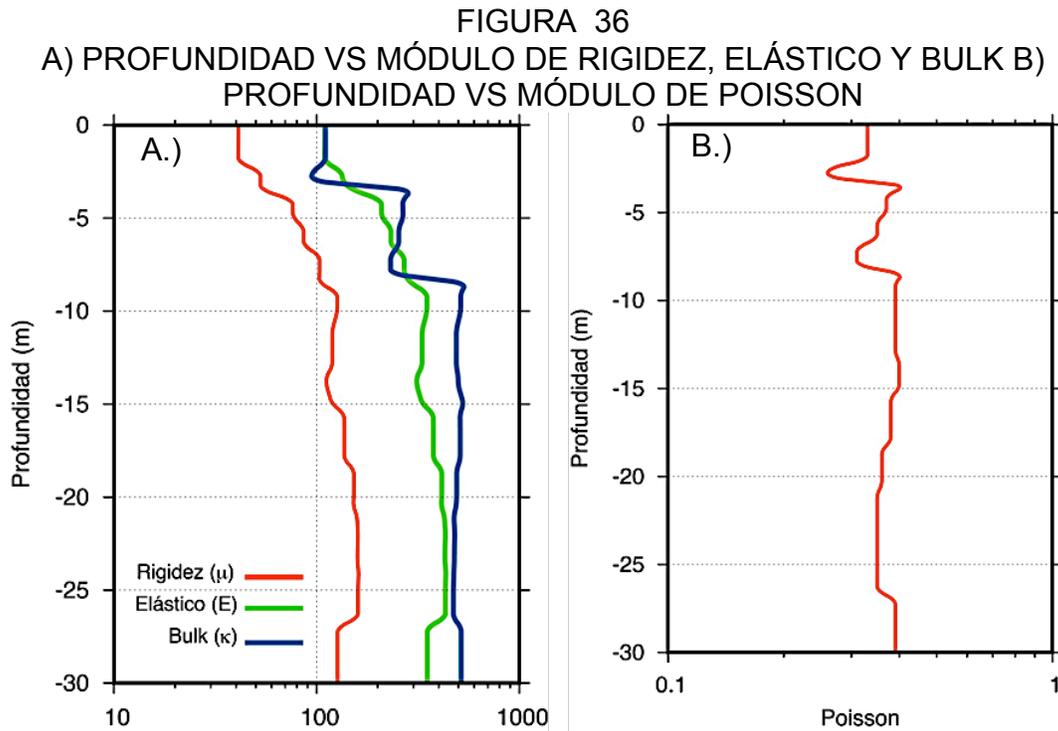
En la tercera capa de  $V_p$ , se observó que el módulo de Bulk obtenido oscilaba entre 357 MPa – 518 MPa con una variación de aumento a profundidad. Además, se estimó que el módulo de corte para esta capa se encuentra entre 100 MPa – 111 MPa a 4 m de esta primera capa y posteriormente aumenta a un rango de 145 MPa -219 MPa indicando que a presiones mayores se observa una deformación cortante. La deformación longitudinal soporta presiones que se encuentran en el rango de 284 MPa - 461 MPa (figura 36).

El módulo de Poisson de este sitio mantiene valores bajos en los primeros 10 metros del subsuelo, indicando que son materiales compresibles. A partir de los 10 metros los valores aumentan considerablemente lo que indica que el material es más resistente a la compresibilidad (figura 35).

### 3.3.2 Módulos Elásticos del sitio No. 2

En el segundo perfil se logró estimar que la primera capa a la cual se le asignó la unidad de suelos mostró una relación de compresibilidad de 102 MPa, mientras que la resistencia al corte fue de 47 MPa, a ésta unidad se le estimó una relación de deformación longitudinal variable que va desde 109 MPa hasta 134 MPa.

Para la segunda capa determinada de  $V_p$ , se observó que el módulo de Bulk obtenido oscilaba entre 231 MPa – 296 MPa teniendo una variación a profundidad, el módulo de corte determinado para ésta capa oscila entre los 52 MPa – 103 MPa Indicando que a presiones mayores el material sufriría una deformación dúctil. La deformación longitudinal tiene un soporte que va de los 149 MPa a 270 MPa.



En la tercera capa determinada de  $V_p$ , se observó que el módulo de Bulk o de compresibilidad obtenido oscilaba entre un rango de 472 MPa – 550

MPa, con variación ascendente a profundidad. Además se estimó que el módulo de corte para ésta capa se encuentra entre 102 MPa – 160 MPa, con una baja en su módulo a profundidades mayores a los 27 m. El módulo de elasticidad se estimó entre un rango de 290 MPa – 434 MPa, esto con base a las velocidades de onda p y s (figura 36).

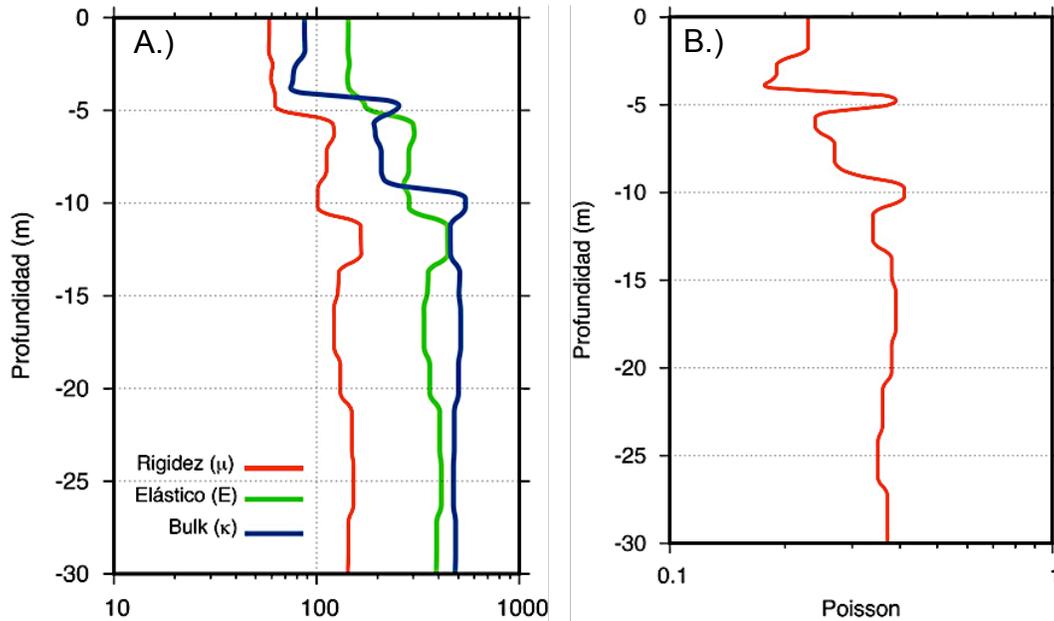
De este sitio se observa que el módulo de Poisson es casi constante en todo el perfil, con valores admisibles y buenos. Debido a que los materiales presentes en el subsuelo presentan capacidad de incompresibilidad media, éstos son buenos para cimentaciones (figura 36).

### **3.3.3 Módulos Elásticos del sitio No. 3**

Del tercer perfil se estimó que la primera capa mostró una relación de compresibilidad oscilante entre 80 MPa, mientras que su resistencia al corte va en aumento a profundidad alcanzando los 60 MPa. Esta unidad mostró un módulo de elasticidad constante en toda la capa de 145 MPa.

En la segunda capa que se determinó de  $V_p$ , se observó que el módulo de Bulk obtenido oscilaba entre 194 MPa – 254 MPa mostrando un descenso a profundidad. El módulo de corte determinado para ésta capa se encontró entre 62 MPa – 122 MPa, manteniendo un aumento a profundidad de capa. Esto indica que a mayor profundidad mayor resistencia al corte. La deformación longitudinal es variable y va desde los 173 MPa - 303 MPa.

FIGURA 37  
 A) PROFUNDIDAD VS MÓDULO DE RIGIDEZ, ELÁSTICO Y BULK, B) PROFUNDIDAD VS MÓDULO DE POISSON.



Fuente: Investigación de Campo. 2 014.

En la tercera capa determinada de  $V_p$ , se observó que el módulo de Bulk oscilaba entre 457 MPa – 541 MPa, con un leve descenso al inicio de la capa y manteniéndose constante en el resto de ella. Se estimó que el módulo de corte se ubica en el rango de 101 MPa – 152 MPa y en los primeros 2 m de la capa se mantiene constante, luego disminuye y posteriormente se estabiliza a profundidad (figura 37).

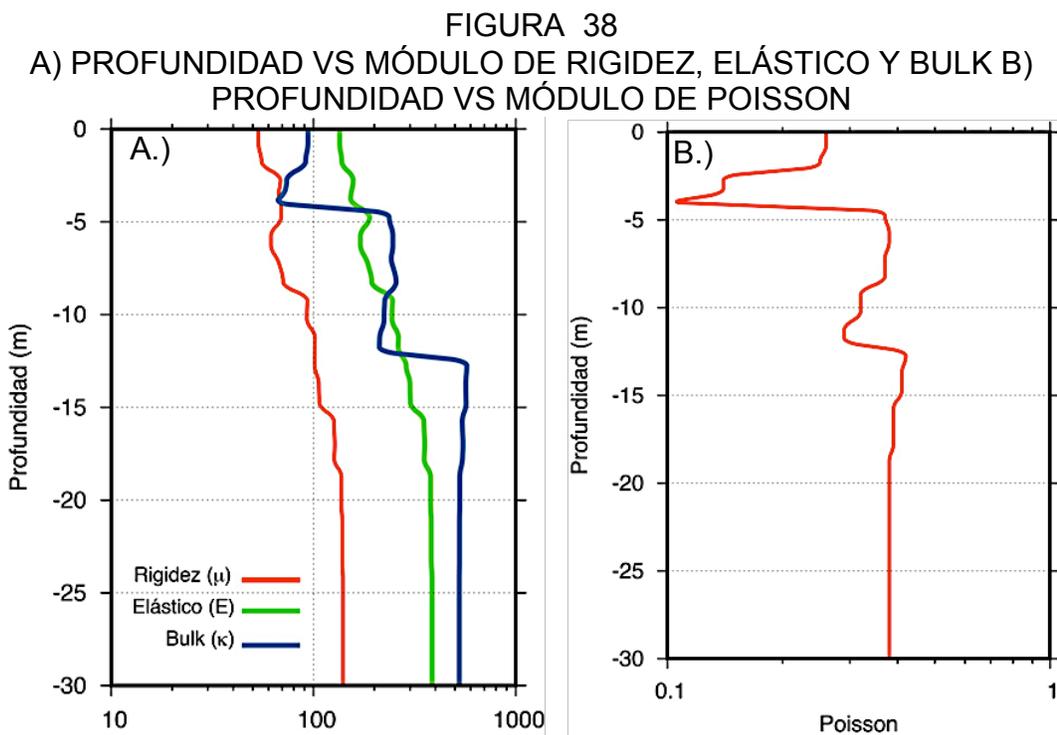
El módulo de Young estimado se encuentra en un rango de 285 MPa-445 MPa, presentando un comportamiento casi homogéneo después de los 2m primeros de esta capa.

Para los primeros 5 metros de profundidad de este punto los valores del módulo de Poisson demuestran un material con elasticidad media, a partir de los 5 metros los valores aumentan describiendo un comportamiento elástico bajo de los materiales subsecuentes (figura 37).

### 3.3.4 Módulos Elásticos del sitio No. 4

En el cuarto perfil se determinó que la primera capa, asignada a la unidad de suelos, mostró una relación de compresibilidad que va de 63 MPa – 93 MPa, mientras que la resistencia al corte se encontraba a 60 MPa. El módulo de Young determinado es variado y mantuvo un aumento casi constante entre 134 MPa - 157 MPa.

Para la segunda capa de  $V_p$ , se observó que el módulo de Bulk obtenido era variable dentro de la capa (212 MPa - 256 MPa) disminuyendo al final de la misma. El módulo de corte determinado se encuentra entre 61 MPa – 101 MPa aumentando a profundidad, lo cual refleja que a mayor profundidad de capa mayor resistencia al corte. La deformación longitudinal se produjo en un rango de 170 MPa - 263 MPa según el módulo de Young.



Fuente: Investigación de Campo. 2 014.

En la tercera capa de  $V_p$ , se observó que el módulo de Bulk se encuentra entre los 525 MPa – 573 MPa, con un aumento con respecto a la profundidad. Además, se estimó que el módulo de corte se encontraba entre 101 MPa – 140 MPa, alcanzando a profundidad un módulo más resistente al corte. El módulo de Young presentó un comportamiento ascendente a mayor profundidad, encontrándose entre 286 MPa - 385 MPa (figura 38).

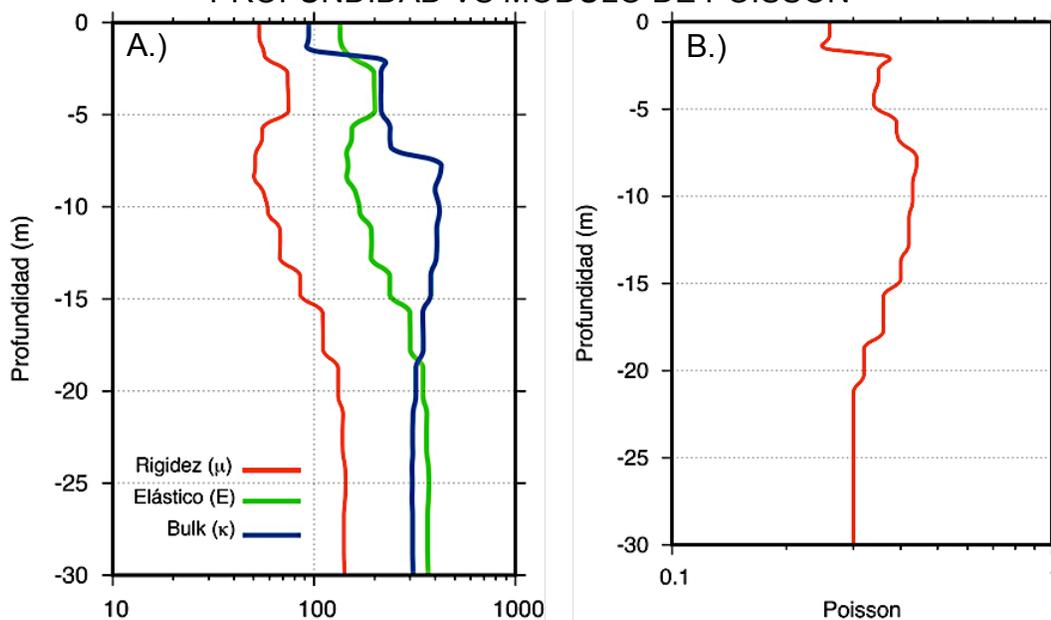
En éste punto el módulo de Poisson refleja en los primeros 3 metros valores aceptables, aunque existe un intervalo de 1 metro donde hay un descenso en su valor, lo que indica una zona con comportamiento elástico alto, seguidamente de 4 metros con valores de Poisson aceptables (figura 38).

### **3.3.5 Módulos Elásticos del sitio No. 5**

En el quinto perfil se estimó que la primera capa asignada como unidad de suelos, mostró una relación de compresibilidad 94 MPa, la resistencia al corte fue de 56 MPa y su relación de deformación longitudinal de 137 MPa según el módulo de Young estimado.

Para la segunda capa de  $V_p$ , se observó que el módulo de Bulk obtenido se encontraba entre 214 MPa – 244 MPa, siendo éste semi-constante en toda la capa. El módulo de corte estimado varía entre los 55 MPa – 75 MPa, disminuyendo en el último metro de ésta capa. El módulo de Young se encuentra entre 153 MPa – 200 MPa, presentando al final de la capa un descenso en su módulo, debido principalmente a las características propias del sitio.

FIGURA 39  
 A) PROFUNDIDAD VS MÓDULO DE RIGIDEZ, ELÁSTICO Y BULK B)  
 PROFUNDIDAD VS MÓDULO DE POISSON



Fuente: Investigación de Campo. 2 014.

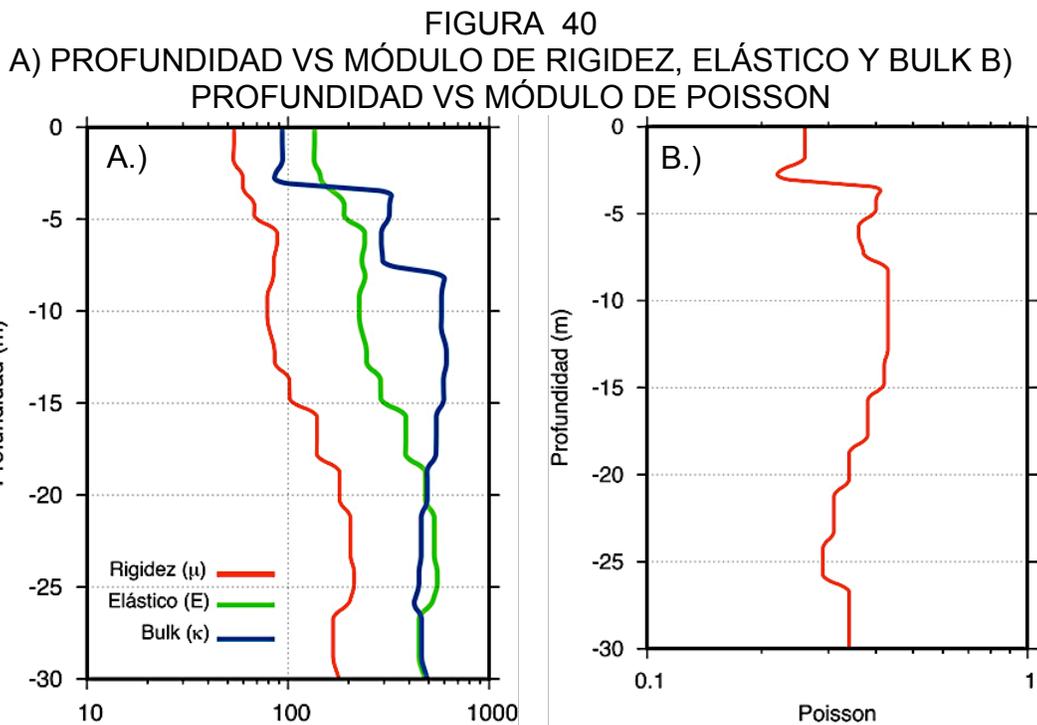
En la tercera capa de  $V_p$ , se estableció que el módulo de Bulk obtenido oscilaba entre 309 MPa – 428 MPa, con un pequeño descenso a profundidad. Además se estimó que el módulo de corte para esta capa estaba en un rango entre 55 MPa – 144 MPa, con un descenso en su valor al inicio y posteriormente un comportamiento ascendente a mayor profundidad. La deformación longitudinal por unidad de área de ésta capa se da a presiones entre 150 MPa - 372 MPa, con base al módulo Young (figura 39).

En el sitio 5, el primer metro de profundidad muestra valores de un comportamiento elástico medio, el cual se considera aceptable. A partir de los 2 metros de profundidad los valores del módulo de Poisson son buenos manteniéndose semiconstantes hasta los 20 metros. Los valores aceptables pueden ser comparados con una textura arenosa que es buena para cimentaciones (figura 39).

### 3.3.6 Módulos Elásticos del sitio No. 6

En el sexto perfil, se determinó que la primera capa muestra una relación de compresibilidad de 90 MPa siendo esta poco variante en toda la capa. El módulo de corte estimado fue de 57 MPa siendo bastante constante en todo el espesor de la misma. El módulo de Young para la capa es de 140 MPa manteniéndose constante a profundidad.

Para la segunda capa de  $V_p$ , se observó que el módulo de Bulk obtenido oscilaba entre 290 MPa – 320 MPa, así mismo se determinó el módulo de corte entre los 60 MPa – 88 MPa con una tendencia ascendente, esto indica que a mayor profundidad la capa posee mayor resistencia al corte. El módulo de Young aumento con respecto a la profundidad de capa.



**Fuente:** Investigación de Campo. 2 014.

La tercera capa de  $V_p$ , presenta un módulo de Bulk en un rango entre 418MPa – 616 MPa, esto debido a la variación descendente a profundidad.

Además, el módulo de corte para esta capa mostró una tendencia ascendente que va desde los 78 MPa – 204 MPa. El módulo de Young mostró la misma tendencia del módulo de corte variando desde los 230 MPa hasta los 552 MPa (figura 40).

En este punto 6 el módulo de Poisson en los primeros 3 metros muestra valores medios de 0,25, considerados como buenos y aceptables, a medida que la profundidad es mayor, el subsuelo se comporta de manera menos elástica basado en el aumento del mismo (figura 40).

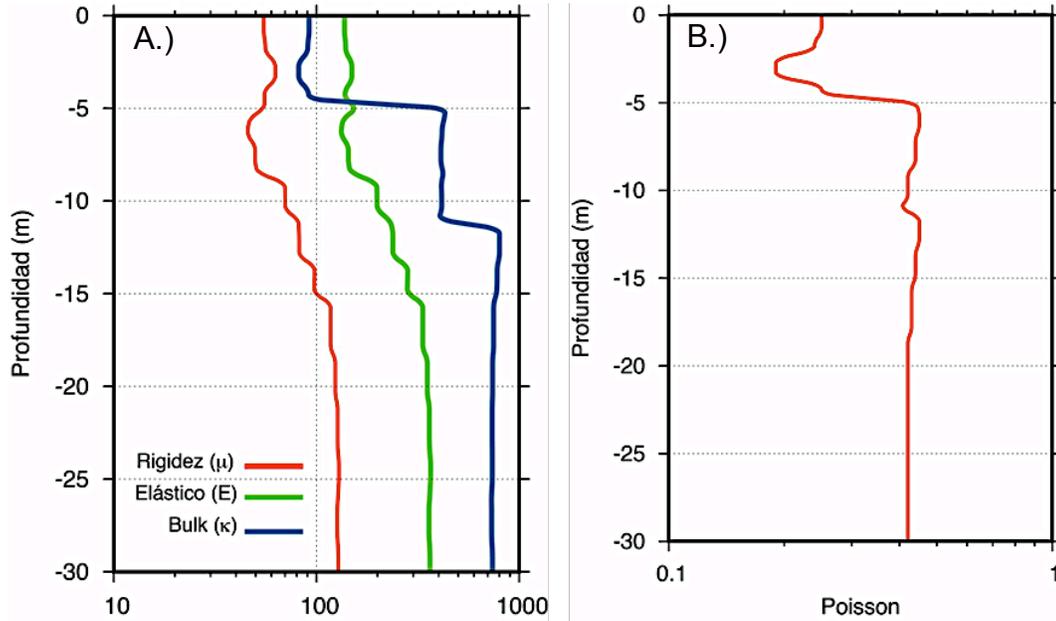
### **3.3.7 Módulos Elásticos del sitio No. 7**

Del séptimo perfil, se determinó que la primera capa muestra una relación de compresibilidad de 86 MPa. Su resistencia al corte es de 58 MPa siendo estos constantes en todo el espesor. El módulo de elasticidad para esta capa es de 144 MPa con un pequeño descenso a 137 MPa en 0,50 m al final de la capa.

En la segunda capa de Vp, se estableció que el módulo de Bulk varia a profundidad, entre un rango de 399 MPa y 432 MPa. El módulo de corte para esta se determinó entre 45 MPa y 81,6 MPa aumentando a profundidad e indicando mayor resistencia al corte. El módulo de Young se encuentra entre 132 MPa y 229 MPa con una tendencia ascendente a profundidad.

En la tercera capa de Vp, el módulo de Bulk oscila entre un rango de 738 MPa – 800 MPa con un pequeño descenso a profundidad. El módulo de corte se encuentra entre los 81 MPa y 128 MPa, con tendencia ascendente a profundidad. El módulo de Young varia entre 237 MPa – 365 MPa aumentando en los primeros 4 m y manteniéndose constante en el resto de capa (figura 41).

FIGURA 41  
 A) PROFUNDIDAD VS MÓDULO DE RIGIDEZ, ELÁSTICO Y BULK, B)  
 PROFUNDIDAD VS MÓDULO DE POISSON



**Fuente:** Investigación de Campo. 2 014.

En el intervalo correspondiente a los primeros 5 metros de profundidad, el módulo de Poisson se mantiene en un rango entre 0,20 y 0,30, indicando una compresibilidad de deformación lineal media del material. A partir de los 5 metros de profundidad el módulo de Poisson aumenta en su valor considerablemente y se mantiene homogéneo hasta los 30 metros alcanzados durante el ensayo. El valor medio 0,40 lo cual indica baja compresibilidad del material (figura 41).

## CONCLUSIONES

### 3.4. Conclusión General

Se estimó por medio de ensayos sísmicos las propiedades elásticas dinámicas del suelo (Módulo de Young, Poisson, Bulk y Corte) las cuales presentaron valores variables a diferentes profundidades en cada sitio de cimentación, indicando variaciones leves en las propiedades físicas del material geológico en el subsuelo.

### 3.5. Conclusiones Específicas

- En la refracción sísmica se logró estimar 3 velocidades que diferencian 3 distintas capas hasta una profundidad de 30 m. La primera capa corresponde a suelos, la segunda con piroclastos poco consolidados y la tercera con piroclastos consolidados y densos, con diferentes espesores en cada sitio estudiado. El comportamiento de velocidad de onda S, estimado a través del análisis multicanal de ondas fue variado debido a anomalías físicas (densidad y porosidad) de los materiales geológicos del subsuelo.
- Se estimó que el espesor de la primera capa para el primer, tercer, cuarto y séptimo sitio es de 4,5 m. Para el segundo y sexto sitio es de 3,5 m y el quinto sitio es de 2 m, ésta velocidad está asociada con la cubierta de suelo.

Se determinó que la segunda capa, de velocidad de onda p tiene los siguientes espesores: Para el primer y séptimo sitio de 6,5 m; segundo, tercero, quinto y sexto sitio de 5 m y para el cuarto sitio de 8 m, correlacionando dicha capa como la unidad de piroclastos poco consolidados.

La tercera capa de velocidad de onda p, posee los siguientes espesores: Para el primer y séptimo sitio de 19,5 m, segundo y sexto sitio de 22 m, el tercer sitio de 21 m, el cuarto sitio de 18 m y quinto sitio de 23 m asignando a ésta capa a la unidad de piroclastos consolidados y densos.

- Se concluye que los módulos elásticos (Bulk, Poisson, Corte y Young) estimados caracterizan suelos compactos y arenosos, adecuados para la edificación y cimentación de torres, esto en base al comportamiento de onda S y P obtenida de aplicar los ensayos de sísmica de refracción y análisis multicanal de ondas superficiales.
- Se diferenciaron en cada una de las capas 4 propiedades elásticas que fueron el módulo de Bulk, Rigidez, Young y Poisson, estas propiedades se diferencian debido a que describen comportamientos elásticos distintos y varían en magnitud en cada capa debido a factores propios de la unidad de roca (grado de consolidación y porosidad de los materiales piroclásticos) y factores externos tales como el intemperismo, meteorización y erosión. Cada una de las propiedades presentaron una tendencia ascendente en las capas de mayor profundidad.

## RECOMENDACIONES

- Para estimar módulos elásticos en sitios con topografía abrupta no es recomendable el uso de refracción sísmica y *MASW*, esto debido a que las condiciones ideales son en sitios con topografía suave, en caso de aplicar este método a zonas abruptas se recomienda hacer el levantamiento siguiendo las curvas de nivel y combinar con otro tipo de ensayos geotécnicos tales como sondeo de penetración estándar (*SPT* por sus siglas en inglés) o perforaciones.
- Se recomienda analizar los módulos elásticos obtenidos en el sitio 5 para establecer si este cumple con los parámetros mínimos requeridos por la estructura de torre, esto debido al descenso de los módulos en los primeros metros los cuales pueden no ser los adecuados para la misma.
- Implementar ensayos de sísmica de refracción y *MASW* en sitios de difícil acceso para los ensayos de *SPT* para obtener los módulos de elasticidad.
- Realizar una investigación comparativa entre los métodos de generación de ondas de superficie de forma horizontal y el método de análisis multicanal de ondas superficiales, con la finalidad de realizar un contraste entre los resultados de ambos métodos para la obtención de módulos elásticos.



## BIBLIOGRAFÍA

- Achenbach, JD. *Wave Propagation in Elastic Solids*: United State of America: Butterworth-Heinemann, 1 975.
- Andrus, RD.; Et Al . *Liquefaction evaluation of densified sand at approach to Pier 1 on Treasure Island, California, using SASW method*: United State of America: American Society of Civil, 1 998.
- Cantos, J. *Tratado de geofísica aplicada*: Madrid, España: Editorial Litoprint, 1 974.
- Cavada, JM. *Guía de prospección sísmica por refracción*. Universidad Central de Venezuela. Venezuela: Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, 2 000.
- Czelada Jorge Alberto. *Medición del módulo de Young y módulo de corte mediante técnicas geofísicas*: Tesis de Ingeniería Civil. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería. Buenos Aires, Argentina: 2 009.
- Del Valle, E. *Apuntes de introducción a los métodos geofísicos de exploración*. Universidad Nacional Autónoma de México. México: Facultad de Ciencias de la Tierra, Departamento de Geofísica, 1 985
- Dobrin, MB. *Introducción a la prospección geofísica*: Barcelona, España: Editorial Omega, 1 975.
- Fonti, S. *Multistation methods for geotechnical characterization using Surface Waves*: Tesis doctoral en filosofía. Torino, Italia: Politécnico di Torino, 2 000.
- Moreno, G. *Microzonificación sísmica de la zona urbana de Motozintla de Mendoza, Chiapas*. Tesis Ingeniero Geologo, Universidad Nacional Autonoma de Mexico. Mexico: Facultad de Ciencias de la Tierra, 2 011.
- Ortigao, JAR. *Wave propagation and microstrain behaviour of soils*: Rio de Janeiro, Brasil: Terratek, 2 007.

Santamarina, J.C. y D. Fratta *Introduction to discrete signals and inverse problems in civil engineering*: Atlanta, United State of America: Georgia Institute of Technology, Dept. of Civil Engineering. American Society of Civil Engineering, 1 998

----- Et.Al. *Soils and waves : Particulate materials behavior, characterization and process monitoring*: New York, United State of America: John Wiley & Sons, 2 001.

Sheriff, RE. *Exploración sísmológica*: México, D.F.: Editorial Limusa, 1 991

Stokoe, KH. Et Al. *Characterization of geotechnical sites by SASW method*. Netherlands: Editorial Rotterdam & Brookfield, 1 994



V.ºB.º

Adán García Véliz

Licenciado en Pedagogía e Investigación Educativa  
Bibliotecario





# CUNOR

CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE

Universidad de San Carlos de Guatemala



15213

El Director del Centro Universitario del Norte de la Universidad de San Carlos, luego de conocer el dictamen de la Comisión de Trabajos de Graduación de la carrera de:

## Geología

Al trabajo titulado:

**"Uso de Refracción Sísmica y Análisis Multicanal de Ondas Superficiales para la determinación de módulos elásticos, en la finca Viento Blanco, San Vicente Pacaya, Escuintla"**

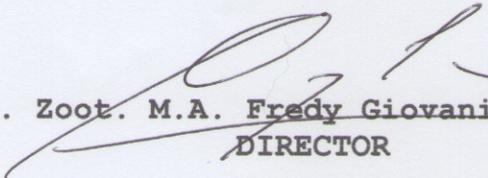
Presentado por el (la) estudiante:

**Julio Nery Mendoza Santa María**

Autoriza el

# IMPRIMASE

*"Id y enseñad a todos"*

Lic. Zoot. M.A.  **Fredy Giovanni Macz Choc**  
DIRECTOR



Cobán, Alta Verapaz octubre del 2015