



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA Y OBTENCIÓN  
DE LA RESPUESTA SÍSMICA UTILIZANDO CORRELACIONES ENTRE EL NÚMERO DE  
GOLPES (N) DEL ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR PARA DETERMINAR LA  
VELOCIDAD DE ONDAS SÍSMICAS PARA EL SUBSUELO DE LA FINCA No. 17,396 FOLIO  
118 LIBRO 109 DEL MUNICIPIO DE QUETZALTENANGO**

**Néstor Emmanuel Gómez Alonzo**

Asesorado por B.Sc. y M. Sc. Luis Felipe López Aguilar

Guatemala, septiembre de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA Y OBTENCIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA UTILIZANDO CORRELACIONES ENTRE EL NÚMERO DE GOLPES (N) DEL ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DE ONDAS SÍSMICAS PARA EL SUBSUELO DE LA FINCA No. 17,396 FOLIO 118 LIBRO 109 DEL MUNICIPIO DE QUETZALTENANGO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**NÉSTOR EMMANUEL GÓMEZ ALONZO**

ASESORADO POR B.SC. Y M. SC. LUIS FELIPE LÓPEZ AGUILAR

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

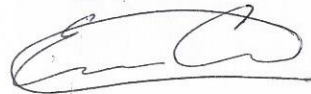
DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel López Juárez
EXAMINADOR	Ing. Andy Williams Alonzo Vásquez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA Y OBTENCIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA UTILIZANDO CORRELACIONES ENTRE EL NÚMERO DE GOLPES (N) DEL ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DE ONDAS SÍSMICAS PARA EL SUBSUELO DE LA FINCA No. 17,396 FOLIO 118 LIBRO 109 DEL MUNICIPIO DE QUETZALTENANGO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 13 de junio de 2019.



**Néstor Emmanuel Gómez Alonzo**

Ref. EEPFI-454-2019  
Guatemala, 04 de julio de 2019

Director  
Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Escuela de Ingeniería Civil  
Presente.

Estimado Ing. Aguilar:

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del estudiante **Nestor Emmanuel Gómez Alonzo** carné número **201020660**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la **Maestría en Ciencias en Ingeniería Geotécnica**.

Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Sin otro particular,

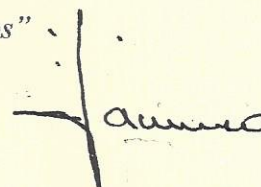
Atentamente,

Luis Felipe López Aguilar  
Ingeniero Civil  
Geofísico (B.Sc. y M.Sc.)  
Colegiado No. 2177



Mtro. Ing. Luis Felipe López Aguilar  
Asesor

"Id y Enseñad a Todos"



Mtro. Ing. Armando Fuentes Roca  
Coordinador de Área  
Infraestructura



Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cortés  
Director  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería





**USAC**

TRICENTENARIA

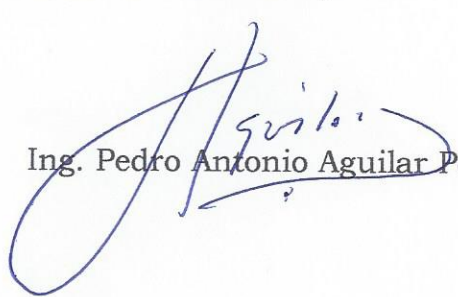
Universidad de San Carlos de Guatemala  
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



El Director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen de la Asesor MSc. Ing. Luis Felipe López Aguilar y del Coordinador del Área de Infraestructura MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes M., al trabajo de graduación del estudiante Nestor Emmanuel Gómez Alonzo, titulado **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA Y OBTENCIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA UTILIZANDO CORRELACIONES ENTRE EL NÚMERO DE GOLPES (N) DEL ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DE ONDAS SÍSMICAS PARA EL SUBSUELO DE LA FINCA No. 17,396 FOLIO 118 LIBRO 109 DEL MUNICIPIO DE QUETZALTENANGO**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco



Guatemala, julio 2019

/mrrm.





DTG. 390.2019

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA Y OBTENCIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA UTILIZANDO CORRELACIONES ENTRE EL NÚMERO DE GOLPES (N) DEL ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DE ONDAS SÍSMICAS PARA EL SUBSUELO DE LA FINCA No. 17,396 FOLIO 118 LIBRO 109 DEL MUNICIPIO DE QUETZALTENANGO**, presentado por el estudiante universitario: **Néstor Emmanuel Gómez Alonzo**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Inga. Anabela Cordova Estrada  
Decana

  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
DECANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
★

Guatemala, septiembre de 2019

/gdech

## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Dios**

Por haberme permitido realizar una más de mis metas.

### **Mis padres**

Por haberme traído al mundo y guiado a través de este, mi eterno agradecimiento por su apoyo para hacer realidad este sueño.

### **Mis hermanos**

Fernando y Estuardo Gómez Alonzo, por su apoyo y compañía durante mi vida.

### **Familia y amigos**



## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Universidad de San  
Carlos de Guatemala**

Por ser la *alma mater* que me permitió nutrirme de conocimientos.

**Facultad de Ingeniería**

Por proporcionarme los conocimientos que me han permitido realizar este trabajo de graduación.

**Mis amigos**

Por haberme acompañado durante la carrera.

**Familia y amigos en  
general**

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN .....	XIII
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. ANTECEDENTES .....	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	11
4. JUSTIFICACIÓN .....	13
5. OBJETIVOS .....	15
5.1. General.....	15
5.2. Específicos .....	15
5.3. Hipótesis.....	15
6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	17
7. MARCO TEÓRICO.....	19
7.1. Ondas sísmicas y ensayos de medición.....	19
7.1.1. Ondas sísmicas .....	19
7.1.2. Tipos de ondas sísmicas .....	21

7.1.2.1.	Ondas “s” u ondas transversales u ondas de cizalla.....	21
7.1.2.2.	Ondas “p” u ondas longitudinales u ondas de compresión .....	21
7.1.2.3.	Ondas de Rayleigh.....	22
7.1.2.4.	Ondas de Love .....	23
7.1.3.	Ondas sísmicas a través del suelo.....	23
7.1.4.	Comportamiento de las ondas sísmicas.....	24
7.1.5.	Velocidad de ondas sísmicas .....	25
7.2.	Ensayos tradicionales de medición de ondas sísmicas.....	27
7.2.1.	Método gravimétrico .....	27
7.2.2.	Refracción y reflexión sísmicas .....	27
7.2.3.	Método Down Hole.....	29
7.3.	Ensayo de penetración estándar.....	31
7.3.1.	Descripción del ensayo .....	32
7.3.2.	Generación de ondas por ensayo SPT .....	33
7.4.	Caracterización del movimiento del suelo .....	35
7.4.1.	Coeficiente de Poisson.....	36
7.4.2.	Módulo de Young E.....	36
7.5.	Respuesta sísmica de los suelos .....	38
7.5.1.	Licuefacción del suelo .....	39
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	41
9.	METODOLOGÍA .....	45
9.2	. Descripción del ensayo SPT .....	47
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN .....	49
10.1.	Ensayo de penetración estándar.....	49

10.2.	Correlaciones entre SPT y velocidad de ondas sísmicas.....	50
11.	CRONOGRAMA.....	53
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO .....	55
13.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Registro de arribo de onda de corte.....	5
2.	Tipos de ondas sísmicas.....	20
3.	Ejemplo de vibroseis .....	20
4.	Reflexión / Refracción de ondas sísmicas.....	25
5.	Comparación entre ondas tipo Vp y ondas tipo Vs .....	26
6.	Método sísmico por refracción / reflexión.....	29
7.	Esquema de un ensayo Down-Hole.....	30
8.	Perfiles en profundidad y velocidad de onda.....	31
9.	Muestreador normalizado para (SPT) .....	33
10.	Ejemplo de registro de ondas tipo P y S .....	34
11.	Maquinaria utilizada .....	46
12.	Operación del ensayo .....	48
13.	Esquema ilustrado del ensayo SPT .....	50
14.	Ejemplo de comparación de correlaciones entre Vs y N.....	52

## TABLAS

I.	Clasificación de los perfiles de suelo .....	4
II.	Ecuaciones de correlación velocidades de onda de corte (Vs) con el número de golpes (N) de la prueba de SPT.....	7
III.	Comparación entre ondas tipo P y tipo S.....	22
IV.	Velocidades de ondas sísmicas sobre medio general .....	24
V.	Tipos de roca con Poisson .....	36
VI.	Clasificación de materiales con “E” .....	38

VII.	Cronograma de trabajo .....	53
VIII.	Recursos necesarios para la investigación .....	55

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>H</b>	Altura
<b>SASW</b>	Análisis espectral de ondas de superficie
<b>cm<sup>2</sup></b>	Centímetro cuadrado
<b>u<math>\Phi</math></b>	Componente tangencial
<b><math>\Pi</math></b>	Constante numérica pi
<b>e</b>	Deformación
<b>el</b>	Deformación longitudinal
<b>ea</b>	Deformación tangencial
<b>P</b>	Densidad
<b>D</b>	Diámetro
<b>SPT</b>	Ensayo de penetración estándar
<b>G</b>	Fuerza
<b>IP</b>	Índice de plasticidad
<b>kgf</b>	Kilogramo fuerza
<b>Km/s</b>	Kilómetros sobre segundo
<b>kPa</b>	Kilopascales
<b>m/s</b>	Metro sobre segundo
<b>E</b>	Módulo de Young
<b>N</b>	Número de golpes
<b>N60</b>	Número de golpes normalizado
<b>Vs</b>	Ondas de corte / ondas secundarias
<b>L</b>	Ondas de Love
<b>VR</b>	Ondas de Rayleigh
<b>Tipo P</b>	Ondas primarias



<b>Vp</b>	Ondas primarias
<b>Tipo S</b>	Ondas secundarias
<b>W</b>	Porcentaje de humedad
<b>r</b>	Radio
<b>S</b>	Tensión
<b><math>\beta</math></b>	Velocidad de la onda corte
<b><math>\alpha</math></b>	Velocidad para la onda de compresión
<b>V1</b>	Velocidad primaria
<b>V2</b>	Velocidad secundaria

## GLOSARIO

<b>Ángulo de fricción interna</b>	Ángulo entre el eje de esfuerzos normales y la tangente a la envolvente de Mohr en un punto que representa una condición dada de esfuerzo de ruptura de un material sólido. El ángulo de fricción interna de un suelo corresponde al ángulo cuya tangente es el coeficiente promedio de fricción entre las partículas de un suelo.
<b>Apuntalamiento</b>	Elemento que, trabajando a compresión, permite aplicar una carga sobre una estructura de contención. También puede denominarse codal.
<b>Caracterización</b>	Determinar los atributos peculiares de alguien o de algo, de modo que claramente se distinga de los demás.
<b>Correlación</b>	Correspondencia o relación recíproca entre dos o más acciones o fenómenos.
<b>Geotecnia</b>	Parte de la geología aplicada que estudia la composición y propiedades de la zona más superficial de la corteza terrestre, para el asiento de todo tipo de construcciones y obras públicas.
<b>Interfase</b>	Intervalo entre dos fases sucesivas.

**Onda**

Alteración que se propaga en un medio o en su superficie sin que haya un movimiento neto de materia. Las ondas generalmente se caracterizan por su longitud, período o frecuencia y velocidad.

**Onda P**

Llamada también onda de compresión, onda longitudinal, onda rotacional u onda primaria; tipo de onda sísmica de cuerpo caracterizada por el movimiento de partículas del terreno en la misma dirección de propagación de la onda por efecto de la compresión y expansión alternadas del terreno. Su velocidad se encuentra en el intervalo 5.5 -7.2 km/s en la corteza y 7.8 - 8.5 km/s en el manto superior.

**Onda S**

Onda sísmica de cuerpo que se propaga por deformación por cortante perpendicular a la dirección de propagación. Las ondas S no se propagan en los líquidos ni en la parte externa del núcleo terrestre. Su velocidad es de 3-4 km/s en la corteza y entre 4.4-4.6 km/s en el manto. Es llamada también onda de cortante u onda secundaria debido a que se registra en los sismógrafos después de la onda P u onda primaria.

<b>Oscilar</b>	Moverse alternativamente primero hacia un lado y luego hacia el contrario desde una posición de equilibrio determinada por un punto fijo o un eje.
<b>Perturbación</b>	Alteración o trastorno que se produce en el orden o en las características permanentes que conforman una cosa o en el desarrollo normal de un proceso.
<b>Propagación</b>	Conjunto de fenómenos físicos que conducen a las ondas del transmisor al receptor.
<b>Reflexión</b>	Es el cambio de dirección de una onda, que, al entrar en contacto con la superficie de separación entre dos medios cambiantes, regresa al punto donde se originó.
<b>Refracción</b>	Es el cambio de dirección y velocidad que experimenta una onda al pasar de un medio a otro con distinto índice refractivo.
<b>SASW</b>	(Spectral Analysis of Surface Waves). El método se aplica a los sitios del suelo para medir el perfil de velocidad de la onda de corte del suelo y la roca sin necesidad de un orificio. En general, el método utiliza las características dispersivas de las ondas superficiales para determinar la variación de la velocidad de la onda de corte

(rigidez) de los sistemas en capas con la profundidad.

**Sismo**

Serie de vibraciones de la superficie terrestre generadas por un movimiento brusco y repentino de las capas internas.

**Sismología**

Parte de la geología que estudia los terremotos.

**Subsuelo**

Parte de terreno que está por debajo de la superficie terrestre.

**Telúrico**

Del planeta Tierra o relacionado con él.

**Vibroseis**

Método sísmico en el que un vibrador se utiliza como fuente de energía para generar un tren de ondas controlado.

## RESUMEN

La velocidad de ondas sísmicas que atraviesan un suelo depende fundamentalmente del tipo de suelo o material geológico que el área en estudio posea, adicional a lo anterior también influye la separación entre partículas del mismo. Esto se da porque las ondas sísmicas son pequeñas perturbaciones mecánicas y se dividen generalmente en dos grupos: las ondas que viajan a través del suelo y las que viajan a través de la superficie del mismo.

Por medio de los valores de velocidad que las ondas sísmicas obtienen al pasar entre el suelo, es posible realizar una caracterización geotécnica y obtener la respuesta sísmica que se presentará ante un sismo.

En el presente diseño de investigación se busca obtener una caracterización geotécnica y la respuesta sísmica que posee en un área específica en el municipio de Quetzaltenango, utilizando correlaciones entre el ensayo de penetración estándar (SPT), y se contempla realizar una comparación con las ecuaciones empíricas que existen en la actualidad, y así mismo obtener un porcentaje de eficiencia para este método propuesto.



# 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se hace necesario conocer las características geotécnicas en nuestro entorno, así como el comportamiento dinámico del suelo ante eventos sísmicos. Para conocer estos factores existe diversidad de ensayos geofísicos y físicos que pueden representar la realidad del sitio con un porcentaje de exactitud muy alto.

La velocidad con que las ondas sísmicas atraviesan los estratos del suelo depende del tipo de este, así como la separación entre las partículas que lo componen. Esto también afectará el comportamiento dinámico que el suelo representará ante un eventual sismo.

Se presentan los resultados de una caracterización geotécnica y los resultados de la respuesta sísmica del suelo analizado en el Municipio de Quetzaltenango. Esto se obtendrá utilizando correlaciones entre el número de golpes (N) obtenido a través del ensayo de penetración estándar (SPT) y la velocidad de ondas sísmicas tipo S que atraviesan los estratos del suelo.

Se realiza la correlación con el número de golpes (N) obtenidos del ensayo de penetración estándar (SPT), considerando que es un ensayo relativamente sencillo para realizar en campo, y su costo de aplicación es muy bajo con relación a utilizar un método geofísico que proporcione una representación de las velocidades de ondas sísmicas inducidas.

En el primer capítulo se realiza una descripción de las ondas sísmicas y los tipos que existen, así como las velocidades que estas pueden alcanzar y los



factores que pueden caracterizarlas. También se describen los métodos tradicionales para la medición de ondas sísmicas.

En el segundo capítulo se hace una descripción del sitio donde se realiza la investigación. Considerando todos los factores geológicos conocidos del área en estudio, también se hará la descripción y el procedimiento de los ensayos realizados en el lugar, consistentes en la prueba de penetración estándar en puntos estratégicos.

En el tercer capítulo se realiza una comparación entre los métodos empíricos de correlación utilizando el número de golpes "N" obtenido de los ensayos de penetración estándar para determinar la velocidad de ondas sísmicas de corte; así mismo, se describirá en qué consiste cada correlación empírica aplicada en la investigación. Al finalizar el capítulo se realiza una comparación entre los distintos métodos empíricos utilizados.

En el cuarto capítulo se muestran todos los resultados obtenidos a través de las correlaciones empíricas aplicadas, a través de estos resultados se realiza la caracterización geotécnica del suelo en estudio para el Municipio de Quetzaltenango. Además de esto se estima el comportamiento de respuesta sísmica o comportamiento dinámico que el suelo posee. Al finalizar el capítulo se resume los logros obtenidos, es decir el porcentaje de eficacia que se obtiene al utilizar correlaciones entre el ensayo de penetración estándar con la velocidad de ondas sísmicas y su comportamiento dinámico.

## 2. ANTECEDENTES

Las ondas sísmicas se caracterizan porque sus propiedades de propagación dependerán directamente del suelo o elemento donde se estén propagando, pero si este es estratificado, como en los suelos por ejemplo, se producirá el fenómeno de dispersión, el cual es utilizado en el método SASW (del inglés Spectral Analysis of Surface Waves). /Sato, 1991). “La dispersión es producida cuando las ondas tipo Rayleigh recorren medios estratificados”. (Bolt, 1999, s/p).

La velocidad de ondas sísmicas que atraviesan un cuerpo, en este caso el suelo en análisis, dependerá de la composición de este, medible por su longitud y su frecuencia.

Uno de los parámetros de mucha importancia para obtener una clasificación de rocas y suelo es la velocidad de ondas de corte ( $V_s$ ), esto dado que describe de forma confiable las características dinámicas y estáticas de los materiales en estudio. Realizar ensayos para poder determinarlo es muy sencillo y fácil, adicional se debe considerar que “los costos de realización son marginales, es decir muy bajos, si se comparan con perforaciones”. (Castillo, 2007).

Para clasificar suelos y rocas es posible utilizar los valores de velocidad de ondas sísmicas que lo recorren, ya que dependiendo la estructura de la que está compuesto, de esto dependerá la velocidad que las ondas puedan alcanzar.

Tabla I. **Clasificación de los perfiles de suelo**

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente.	$V_s > 1500 \text{ m/s}$
B	Perfil de roca de cualquier espesor.	$1500 \text{ m/s} > V_s > 760 \text{ m/s}$
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, de cualquier espesor que cumpla con el criterio de velocidad de la onda cortante.	$760 \text{ m/s} > V_s > 360 \text{ m/s}$
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, de cualquier espesor que cumpla con cualquiera de los dos criterios.	$N > 50$ $S_u > 100 \text{ kPa} (-1 \text{ kgf/cm}^2)$
D	Perfiles de suelos rígidos de cualquier espesor que cumpla con el criterio de velocidad de la onda cortante.	$360 \text{ m/s} > V_s > 180 \text{ m/s}$
	Perfiles de suelos rígidos de cualquier espesor que cumpla cualquiera de las dos condiciones.	$50 > N > 15$ $100 \text{ kPa} (-1 \text{ kgf/cm}^2) > S_u > 50 \text{ kPa} (-0.5 \text{ kgf/cm}^2)$
E	Perfil de cualquier espesor que cumpla el criterio de velocidad de la onda cortante.	$180 \text{ m/s} > V_s$
	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3m de arcillas blandas.	$IP > 20$ $W > 40\%$ $25 \text{ kPa} (-0.25 \text{ kgf/cm}^2) S_u$
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista. Se contemplan las siguientes subclases:  F1 – Suelos vulnerables a la falla o colapso causado por una excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc.  F2 – Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H>3m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas).  F3 – Arcillas de muy alta plasticidad (H>7.5m con índice de plasticidad $IP > 75$ ).  F4 – Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 36m).	

Fuente: Castillo, A. J. (2007). *Correlación entre el valor N del ensayo de penetración estándar y velocidad de ondas de corte para arcillas en Bogotá, Colombia.*

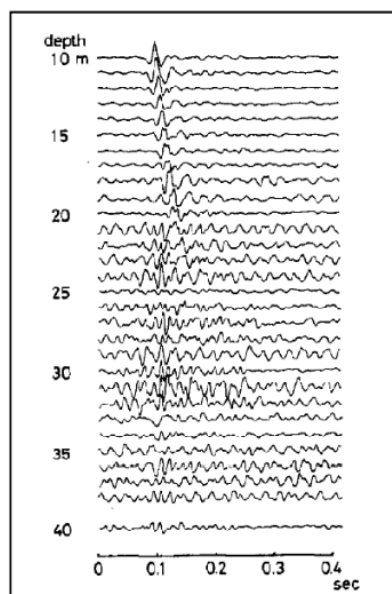
Yutaka Ohta y Noritoshi Goto, en el año 1974, realizaron una serie de experimentos en Sapporo (Japón), ya que tenían como objetivo el desarrollo de una técnica que permitiera utilizar el ensayo de penetración estándar (SPT) para medir la velocidad de ondas de corte.

Cuando se está desarrollando un ensayo tradicional de penetración estándar, en el fondo de la penetración debido al impacto se generan diversos tipos de ondas, sin embargo no es evidente su respectiva identificación, dado que pareciera ser muy complicado su mecanismo de penetración. Sin embargo,

del evento es posible realizar una simplificada interpretación de una fuerza vertical aplicada a través de un medio elástico que podría ser un modelo muy bueno y poder representar la generación de ondas dadas por el efecto cuando se realiza la penetración del muestreador.

En el fondo de la perforación se realiza un registro de los arribos de las ondas generadas, utilizando un geófono instalado fijamente sobre la superficie, tomando aproximadamente 10 metros de la perforación.

Figura 1. **Registro de arribo de onda de corte**



Fuente: Ramos S., C. I. (2012). *Correlación entre el perfil de velocidad.*

Claramente se puede mostrar lo evidente que es el arribo de la onda de corte ( $V_s$ ) cuando se realizan ensayos entre 10 metros y 20 metros de profundidad, dado que los autores no encontraron ningún tipo de dificultad para realizar la interpretación de la velocidad de las ondas de corte ( $V_s$ ) en este intervalo. Sin embargo, cuando se realizan arribos para ensayos a más de 20 metros de profundidad, se complica la identificación del arribo, esto sucede por

la baja relación señal-ruido, la cual disminuye de forma geométrica con la profundidad. Dicha distorsión se da por el incremento en la profundidad, ya que esto requiere de una muy alta amplificación de la señal, para poder estimar la velocidad a unas profundidades mayores.

Al realizarse de forma experimental, es posible confirmar que el método sí posee buenas posibilidades para utilizarse de forma práctica, y puede ser complemento al procedimiento que se realiza de forma tradicional para los ensayos de penetración estándar. Teniendo en cuenta lo dicho anteriormente, que el procedimiento no requiere ningún tipo de conocimiento especial, y que, a través de su uso, “al medir en campo la velocidad de la onda de corte ( $V_s$ ) esta se puede automatizar realizando los procedimientos tradicionales para la exploración de algún subsuelo en análisis”. (Ramos 2012).

Al utilizar correlaciones se podrá obtener de una forma mucho más práctica y sencilla las velocidades de ondas sísmicas y el comportamiento dinámico del suelo en estudio, a través de ensayos simples como el ensayo de penetración estándar (SPT).

Las ondas sísmicas de corte ( $V_s$ ) son esenciales y fundamentales cuando se quiere conocer la caracterización dinámica del suelo en estudio, pero es muy poco común que se realice sus ensayos correspondientes. Dadas las circunstancias es necesario recurrir a diversas correlaciones que han sido desarrolladas en diversas partes del mundo. Algunas de ellas se muestran en la siguiente tabla. (Díaz, 2005).

Tabla II. **Ecuaciones de correlación, velocidades de onda de corte ( $V_s$ ) con el número de golpes (N) de la prueba de SPT**

Autores	Año de publicación	Ecuación
Imai y Yoshimura	(1970)	$V_s=76N^{0.33}$
Ohba y Toriumi	(1970)	$V_s=84N^{0.31}$
Ohta y Goto	(1978)	$V_s=85.34N^{0.348}$
Japan Road Association	(2002)	$V_s=100N^{1/3}$
Alfaro	(2007)	$V_s=99.783N^{0.333}$
Maheswari et. al.,	(2008)	$V_s=95.641N^{0.301}$

Fuente: Ordóñez Alfaro, A. J. F. (2012). *Correlación entre el número de golpes (N) del ensayo de penetración estándar y la velocidad de ondas de corte ( $V_s$ ) para las arcillas de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.*

Existe una incertidumbre en la validez para las correcciones al número de golpes (N) por la energía que se aplica, esto es una justificación para que muchos especialistas en geotecnia realicen propuestas para disminuir esta ambigüedad. En la corrección de Skempton se pretende normalizar para el número de golpes (N), que denominó N60, “se considera la influencia que tuvo el martillo, la corrección aplicada del diámetro de la perforación, la longitud para la columna de barras y la corrección del muestreador”. (Basurto, 2013).

Los ensayos directamente para obtener las velocidades de ondas sísmicas son muy poco utilizados debido a su complejidad de realización, a pesar de que son parámetros muy importantes para la caracterización del suelo en estudio, es por esto que se hace uso de correlaciones para obtener estos valores con ensayos más fáciles de realizar y más económicos.

Para poder determinar la estratigrafía de un suelo de forma indirecta se puede hacer uso el ensayo de refracción sísmica, este es un método de exploración geofísica que se basa en el cambio de las propiedades dinámicas que conforman los distintos tipos de materiales. Básicamente “el método consiste en realizar una medición del tiempo que toma las ondas primarias ( $V_p$ ) que son generadas por una fuente de energía sobre puntos específicos a cierta distancia sobre un eje en la superficie del terreno”. (Ávalos, 2008).

Según la velocidad de onda que atraviesa un suelo, es decir, el tiempo en que la onda sísmica atraviesa el medio de forma indirecta, es posible determinar la composición de este o los materiales que lo conforman, ya que se basa directamente en las propiedades dinámicas del mismo. Para esto se hace necesario generar la energía inicial en un punto específico y se realizan mediciones sobre un eje a distancias específicas para determinar el comportamiento que se generará.

Los estudios de la respuesta de sitio son esenciales para definir y entender el papel que juega el perfil geológico, las propiedades estáticas y dinámicas del suelo y la topografía en la respuesta sísmica de un sitio. “Los efectos de sitio han contribuido enormemente a las muertes humanas y a los daños en las construcciones en los terremotos”. (Espindola, 2006). La respuesta dinámica de los suelos dependerá de la composición de los mismos, es decir de los materiales y el estado en que se encuentren, así como la intensidad del sismo que pueda afectar el sitio.

Debido a la influencia que provocan las condiciones topográficas y geológicas al finalizar o durante un sismo, se produce una modificación de la señal sísmica, la cual es conocida como efecto local. “La modificación de señal básicamente consiste en la variación que puede implicar una amplificación, esto

provocará una mayor duración así como alterar su contenido frecuencial”. (Aki, 1988).

En Alemania, a finales del siglo XVII, se desarrolló la que se considera precursora de las pruebas de penetración, la cual consistía en hincar a través de impacto una varilla. De este ensayo dinámico de penetración en el suelo nace el cono dinámico y de forma indirecta la prueba de penetración estándar, la cual después se desarrolló en Estados Unidos a principios del siglo XX y la cual se estandarizó en 1930. (Díaz, 2005).

Desde el siglo XVII inició el uso de penetración estándar, el cual en un principio únicamente consistió en hincar una varilla a través de impactos, a partir de esto se vio la necesidad de utilizar un cono dinámico. Este ensayo se sigue usando en la actualidad ya que se realiza de una forma muy simple y económica y aporta resultados muy certeros del sitio.

Estudios que se realizaron en San Francisco concluyen que la cantidad de daño que se produce por un terremoto depende estrictamente del carácter geológico del suelo en el área, cuando el movimiento se produce en rocas produce daños pequeños pero mayores cuando el movimiento es sobre suelo. (Basurto, 2013, s/p)

El daño que un evento sísmico genere en algún sitio dependerá directamente de la composición del suelo, ya que si es un suelo compuesto de material suelto o no consolidado, el daño será mucho mayor comparado con un suelo que esté mayormente compuesto por roca, esto porque en los materiales rocosos o muy consolidados las ondas sísmicas viajarán más rápido que en un material muy suelto.



Los movimientos sísmicos inducen en el suelo del área condiciones no drenadas, esto significa que la aplicación de la carga cíclica y rápida produce un aumento de la presión entre los poros de las partículas del suelo, por consecuencia provoca que las tensiones efectivas lleguen a cero, es decir, se pierde la tensión entre el contacto de partículas. Esto se conoce como licuefacción y se produce en suelos arenosos, pero también en suelos cohesivos cuando se aplica una mayor energía. (Aki, 1988).

Ya que el paso de las ondas sísmicas sobre un suelo se puede considerar como la aplicación de carga cíclica, esto provoca que en los materiales arenosos mayormente la tensión efectiva entre las partículas llegue a cero, y esto significa que la fuerza que las mantiene unidas tiende a cero y pierde el contacto entre ellas. Al haberse generado este fenómeno se producirá licuefacción en el sitio, además si la carga es demasiado grande también afectará a los suelos de tipo cohesivo.

### 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se desconoce la caracterización geotécnica y la respuesta sísmica que posee el suelo dentro del área del municipio de Quetzaltenango y su respuesta ante un evento sísmico.

Como no se conoce la composición y propiedades físicas, mecánicas y geotécnicas del suelo en el área en estudio, así como su respuesta sísmica o comportamiento dinámico, ¿es posible realizar una caracterización geotécnica y obtener la respuesta sísmica realizando una correlación entre el número de golpes (N) obtenidos por el ensayo de penetración estándar (SPT) y la velocidad de ondas sísmicas tipo S? Y de ser así, ¿cuál es el procedimiento para realizar la correlación entre ambos métodos?

Considerando los puntos anteriores, ¿existe un modelo de correlación que relacione el número de golpes (N) del ensayo de penetración estándar (SPT), o en su defecto, determine un porcentaje de eficiencia o de proximidad utilizando correlaciones empíricas existentes, de tal forma que se pueda obtener los valores reales más exactos posibles?



## 4. JUSTIFICACIÓN

Es de suma importancia conocer el comportamiento del suelo por el que se está rodeado, o bien, dónde se pretende realizar algún tipo de proyecto. Esto puede ser la construcción de algún tipo de edificación o si se desea utilizar un área en específico para extracción de materiales. Cuando se menciona conocer el comportamiento del suelo se hace referencia a obtener una caracterización geotécnica y su efecto de respuesta sísmica o comportamiento dinámico ante el paso de ondas sísmicas. En este caso ondas de corte o tipo (Vs).

Comúnmente la exploración del suelo para obtener estos resultados se realiza con ensayos geofísicos, aplicando ondas superficiales y registrando las vibraciones del suelo. Con esto se determina la velocidad de propagación de las ondas inducidas en cada estrato de suelo del sitio. Realizar estos ensayos es relativamente costoso en Guatemala y no es muy frecuente su realización. Es por esto que se busca tener una alternativa para tratar de llegar a los mismos resultados o por lo menos a un porcentaje muy cercano de eficacia de una forma un poco más económica y que más personas puedan tener acceso a estos resultados.

A través de esta investigación se espera obtener una correlación con resultados exactos o por lo menos muy cercanos a la realidad. Se realizarán diversas pruebas utilizando un ensayo muy común en Guatemala, al cual muchas personas pueden tener acceso. Por su simplicidad de aplicación y su bajo costo de contratación este será el ensayo de penetración estándar (SPT).

Si los resultados son satisfactorios utilizando esta metodología, se resolverá la problemática del desconocimiento geotécnico de suelos que se pretendan utilizar para cimentar algún tipo de proyecto o la extracción de materiales del área. De igual forma se tendrá una representación del efecto que los sismos puedan generar sobre el área.

Con esta investigación se obtendrá información muy útil para la actualidad, ya que de comprobarse que las correlaciones obtenidas son fiables de utilizar y son relativamente exactas a las condiciones reales, se convertirá en una alternativa para realizar caracterizaciones geotécnicas de subsuelos y los efectos de respuesta sísmicos que puedan tener.

Estos resultados ayudarán a los profesionales del área a contar con un método alternativo a los ensayos geofísicos, para obtener las velocidades de ondas sísmicas de corte ( $V_s$ ) y la respuesta sísmica del suelo en estudio o comportamiento dinámico a través del ensayo de penetración estándar (SPT) utilizando el número de golpes (N) obtenido. Y esto podrá realizarse de forma sencilla y económica.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. General**

Caracterizar geotécnicamente y obtener la respuesta sísmica utilizando correlaciones entre el número de golpes (N) del ensayo de penetración estándar para determinar la velocidad de ondas sísmicas para el subsuelo del Municipio de Quetzaltenango en la finca no. 17,396, folio 118, libro 109.

### **5.2. Específicos**

- Obtener la velocidad de ondas sísmicas (velocidad de corte ( $V_s$ ) m/s).
- Obtener el número de golpes (N) del ensayo de penetración estándar (SPT).
- Caracterizar geotécnicamente el suelo del área en estudio.
- Correlacionar el número de golpes del ensayo de penetración estándar (SPT) para obtener la velocidad de las ondas sísmicas (velocidad de corte ( $V_s$ ) m/s) propagadas en el suelo.

### **5.3. Hipótesis**

Existe una correlación de valores entre el número de golpes (N) del ensayo de penetración estándar (SPT) realizado en el Municipio de Quetzaltenango con la velocidad de propagación de ondas sísmicas de corte ( $V_s$ ) que se conducen

por los estratos del suelo. Con estos resultados se obtendrá la caracterización geotécnica del suelo de acuerdo con la clasificación de suelos y rocas que existen en la finca no. 17,396, folio 118, libro 109 de Quetzaltenango, y su respuesta sísmica o comportamiento dinámico.

## **6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN**

Con la investigación se obtendrá la caracterización geotécnica y la respuesta sísmica utilizando correlaciones entre el número de golpes (N) del ensayo de penetración estándar (SPT) y la velocidad de ondas sísmicas de corte ( $V_s$ ), para el suelo del municipio de Quetzaltenango en la finca no. 17,396, folio 118, libro 109.

En esta investigación se utilizará un método empírico para relacionar el número de golpes (N) del ensayo de penetración estándar (SPT) y obtener la velocidad de ondas sísmica de corte ( $V_s$ ), por lo cual se debe contar con la base teórica de los métodos que se aplicarán y la forma de aplicación, así como las condicionantes que se deben considerar. De acuerdo a lo anterior, esta investigación se considera como de tipo descriptivo y correlacional.

Considerando el punto anterior, se obtendrán resultados a través de correlaciones empíricas que relacionan un método con otro, para determinar su porcentaje de exactitud, esperando una alta probabilidad de éxito, para obtener todos los resultados asociados a la realidad.

Con esta investigación se ayudará a obtener la velocidad de ondas sísmicas de tipo corte ( $V_s$ ) y el comportamiento dinámico del suelo, es decir, su respuesta sísmica, a través de un ensayo económico y muy sencillo de realizar (ensayo de penetración estándar) para obtener una caracterización geotécnica del lugar en estudio.

Utilizando este método propuesto se espera que más personas puedan obtener estos resultados de una forma más sencilla y económica, y estar



preparados ante cualquier tipo de evento que pudiese afectar el lugar de estudio.

También se considera una opción alternativa para los profesionales que quieran diseñar y construir algún tipo de edificación sobre áreas rurales de las que se desconozca la composición geotécnica que posean, así como para las personas particulares que quieran obtener este tipo de información.

Al tener una forma más sencilla de obtener este tipo de resultados, se espera que puedan desarrollarse obras con una mejor base de diseño, ya sea para construir algún tipo de edificación o para la extracción de materiales del sitio.

## **7. MARCO TEÓRICO**

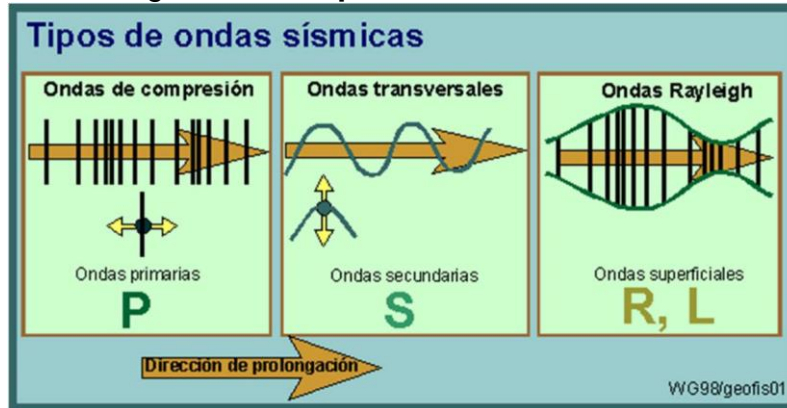
### **7.1. Ondas sísmicas y ensayos de medición**

Las ondas sísmicas son un tipo de onda elástica fuerte en la propagación de perturbaciones temporales del campo de tensiones que generan pequeños movimientos en las placas tectónicas.

#### **7.1.1. Ondas sísmicas**

“Existen dos tipos de ondas que se producen en un sismo: las ondas de cuerpo y las ondas superficiales” (Basurto, 2013, p. 75-76). De acuerdo a lo anterior las ondas superficiales se producen debido a la interacción entre las ondas de cuerpo, ya que estas están viajando en distintas direcciones. Por consecuencia las ondas de tipo superficial es posible clasificarlas en dos tipos: ondas Rayleigh y ondas Love. Este tipo de ondas se caracterizan porque su superficie posee su amplitud máxima, lo contrario que en las grandes profundidades, ya que es nula. “Las ondas de cuerpo que están involucradas con la actividad sísmica local son las ondas P y las ondas S”. (Bolt, 1999, p.110).

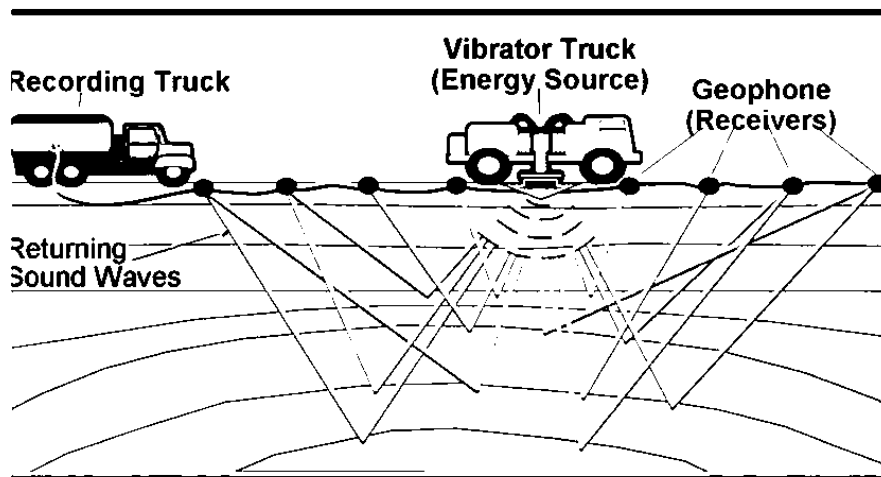
Figura 2. Tipos de ondas sísmicas



Fuente: Ávalos, J. M. (2008). *Aplicación del método de refracción sísmica para la determinación de velocidades de ondas P.*

Al haber movimientos telúricos se generan ondas sísmicas, pero si estas son muy grandes causarán daños severos en sitios donde puedan existir asentamientos urbanos. “En la sismología existe toda una rama de estudio encargada del estudio para estos fenómenos físicos. Por ejemplo, las ondas sísmicas se pueden generar de forma artificial utilizando camiones con una alta carga (vibroseis) o bien explosivos”. (Ávalos, 2008).

Figura 3. Ejemplo de vibroseis



Fuente: Díaz, J. (2005). *Dinámica de suelos.*

## **7.1.2. Tipos de ondas sísmicas**

A continuación se incluye la descripción de las ondas sísmicas anteriormente mencionadas:

### **7.1.2.1. Ondas “s” u ondas transversales u ondas de cizalla**

Este tipo de ondas son transversales, esto porque las ondas se desplazan en forma perpendicular a la dirección de la propagación de la onda. La forma en que se desplaza es alternándose de un lado a otro. Es importante mencionar que “la velocidad de las ondas tipo S puede oscilar entre 500m/s y 4400 m/s, lo cual representaría hasta un 60% si se compara con ondas tipo P. Además también tiene una mayor amplitud, por lo tanto pueden causar mayores daños cuando se desarrolla un evento sísmico”. (Bolt, 1999).

### **7.1.2.2. Ondas “p” u ondas longitudinales u ondas de compresión**

Existe una oscilación en la dirección en que se propagan las ondas, esto se da por las partículas que componen una onda tipo “p” longitudinal y de compresión. Existe una muy parecida relación entre las ondas sonoras ordinarias y las ondas tipo “p”. Las ondas tipo “p” suelen ser más rápidas que las ondas tipo “s”, esto significa que después de un evento sísmico primeramente se registran en un observatorio las ondas tipo “p” y después las ondas tipo “s”. (Ávalos, 2008).

Tabla III. **Comparación entre ondas tipo P y tipo S**

Ondas P	Ondas S
Son primarias, es decir, son las que primero se registran en los sismógrafos	Son secundarias, es decir, aparecen posteriores a las ondas P en los sismógrafos.
Ondas longitudinales.	Ondas transversales.
Pueden viajar a través de cualquier tipo de material líquido o sólido.	Pueden viajar a través de materiales sólidos.
Tienen una velocidad promedio de 1450 m/s en el agua y cerca de 5000 m/s en el granito.	Tienen una velocidad aproximada de entre 500 y 4400 m/s.
Son capaces de transmitirse a través de la atmósfera.	No son capaces de transmitirse a través de la atmósfera.
Su amplitud es menor.	Mayor es su amplitud. Por ello, son las causantes de los daños estructurales durante los sismos.

Fuente: Espíndola, J. M. (2006). *Terremotos y ondas sísmicas*.

### 7.1.2.3. **Ondas de Rayleigh**

“En 1885 Rayleigh pudo predecir la presencia que tienen las ondas superficiales, realizando un diseño matemático para el movimiento de las ondas planas en un espacio elástico semi infinito”. (Ávalos, 2008).

Este tipo de ondas provocan un movimiento rodante, el cual es muy parecido a las ondas provocadas por el mar, dado que sus partículas pueden moverse de forma elipsoidal sobre un plano vertical, el cual pasa por la dirección en que se propagan. Se debe tomar en cuenta que “sobre la superficie el movimiento de las partículas de onda es retrógrado con respecto al avance de este tipo de ondas. La velocidad de las ondas tipo Rayleigh en comparación de las ondas tipo “s” es menor, y es aproximadamente  $v_{\text{Rayleigh}} = (0.9 \times v_s)$ ”. (Ávalos, 2008).

#### **7.1.2.4. Ondas de Love**

“En el año 1911, Love descubrió la onda superficial, la cual lleva su nombre, y estudia el efecto de vibración elástica sobre una capa superficial.” (Bolt, 1999, s/p).

Este tipo de ondas requiere de una capa superficial que posea menor velocidad si se compara a las formaciones subyacentes, o bien un gradiente que tenga velocidad positiva (es decir que la velocidad incrementa) respecto a la profundidad. “Las ondas tipo “love” son ondas de tipo cizalla, es decir, que pueden oscilar solo sobre el plano horizontal, es decir de cizalla polarizadas horizontalmente”. (Ávalos, 2008).

Las velocidades según el tipo de onda sobre los medios son:

#### **7.1.3. Ondas sísmicas a través del suelo**

Las ondas sísmicas se aprecian como perturbaciones mecánicas que pasan sobre un medio hecho por las partículas que componen algún tipo de depósito de suelo, pero el paso de estas ondas prácticamente no debe alterar las condiciones iniciales. “Para determinar la velocidad de onda de corte en suelos ( $V_s$ ) lo más conveniente es recurrir a pruebas geofísicas de campo para encontrar directamente los valores mediante alguno de los métodos de geofísica sísmica.” (Ordóñez, 2012, s/p).

EN muy repetidas ocasiones no es posible aplicar los métodos geofísicos correspondientes debido al alto costo, o simplemente que no se cuenta con equipo en el sitio de estudio. Entonces es aquí donde se pretende aplicar correlaciones para estimar la velocidad de ondas sísmicas partiendo de la

resistencia del ensayo de penetración estándar, es decir el número de golpes aplicado.

Tabla IV. **Velocidades de ondas sísmicas sobre medio general**

Medio	Velocidad de la onda primaria (m/s)	Velocidad de la onda secundaria (m/s)
Granito	5200	3000
Basalto	6400	3200
Calizas	2400	1350
Areniscas	3500	2150

Fuente: Ramos S., C. I. (2012). *Correlación entre el perfil de velocidad.*

#### **7.1.4. Comportamiento de las ondas sísmicas**

En la superficie de un suelo se puede generar una fuente de diversos tipos de ondas sísmicas, cuando existe un golpe o algún tipo de peso que impacte sobre el área, que poseen las siguientes características:

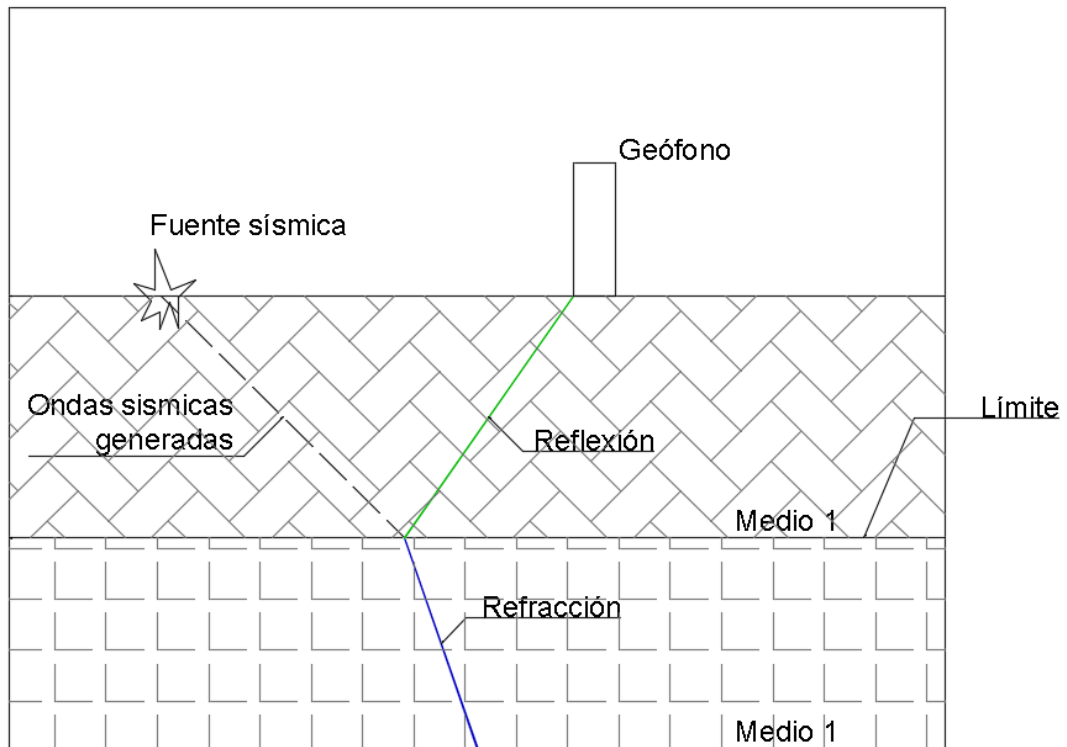
Con velocidad uniforme ( $V_1$ ) sobre el medio de suelo superior se propaga una onda directa que parte de la fuente de inicial.

En este proceso se refleja una onda y esta se engendra a partir de la reflexión de la onda directa que incide entre la interfase del medio 1 y 2, la cual se propaga con velocidad ( $V_1$ ).

Cuando la onda incide sobre la interfase del medio 1 y 2, una porción de esta onda pasa por la interfase y se refracta. La onda que se refracta es propagada por el segundo medio con una velocidad ( $V_2$ ).

“A través de los datos entregados por las reflexiones sísmicas se puede construir el horizonte de reflexión que corresponde a un cambio de materiales.” (Ávalos, 2008, s/p). Por ejemplo, diferentes fallas tectónicas o estratos.

Figura 4. **Reflexión / Refracción de ondas sísmicas**



Fuente: Ávalos, J. M. (2008). *Aplicación del método de refracción sísmica para la determinación de velocidades de ondas P.*

### 7.1.5. Velocidad de ondas sísmicas

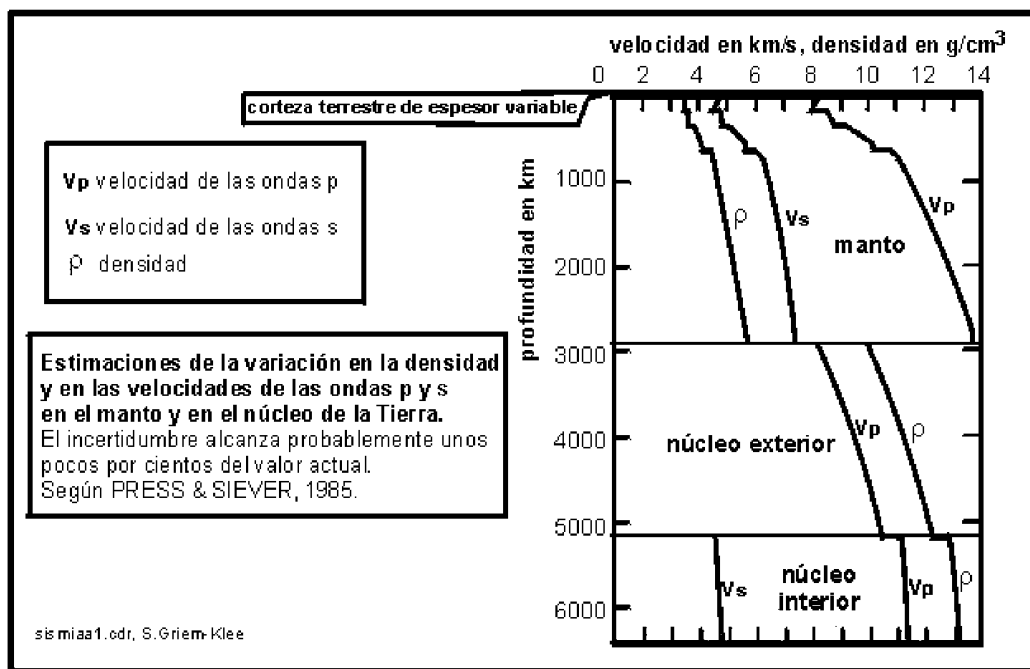
Es posible realizar una demostración de forma teórica, con lo cual se puede observar de forma experimental que la velocidad de las ondas es tal que:  $V_{R,L} < V_s < V_p$ . Donde:  $V_p$  (Ondas tipo P),  $V_s$  (Ondas tipo S) y  $V_R$  (Ondas de Rayleigh),  $V_L$  (Ondas de Love), serán las velocidades de las ondas sísmica tipo P y tipo S, de Love y Rayleigh. Para las dos últimas no es posible establecer un



orden de velocidades, ya que estas son directamente dependientes de múltiples factores y no mantendrán la misma velocidad siempre.

Para las diferentes ondas, la velocidad de estas dependerá de las características del medio por el cual estén atravesando; es decir, en rocas ígneas la velocidad de ondas tipo P en promedio es 6 km/s, caso contrario pasa en rocas que están muy poco consolidadas, ya que en promedio es menor a 2 km/s. Ante un terremoto, su secuencia típica es la siguiente: “primero se produce un ruido sordo es causado por las ondas tipo P, posterior a esto se dan las ondas tipo S y al finalizar el retumbo de la tierra, que es causado por las ondas sísmicas de tipo superficial”. (Ramos, 2012).

Figura 5. Comparación entre ondas tipo Vp y ondas tipo Vs



Fuente: Ramos S., C. I. (2012). *Correlación entre el perfil de velocidad.*

## **7.2. Ensayos tradicionales de medición de ondas sísmicas**

A continuación se describen brevemente diferentes métodos de medición de ondas sísmicas.

### **7.2.1. Método gravimétrico**

Este método tiene como base las diferencias de velocidad en que las ondas elásticas se propagan en los diferentes medios. Es importante considerar que los distintos tipos de minerales varían respecto a su densidad y peso específico, aunque suelen ser muy parecidos; en cambio, pasa lo contrario con los módulos elásticos ya que son muy distintos, y la velocidad de las ondas va a depender mucho del módulo de elasticidad que posea el material que atraviesan, con lo cual es posible correlacionarlos de una forma muy confiable, según lo anterior, se pone en evidencia los cambios de estratificaciones y algún cambio que la naturaleza pudo efectuar sobre los materiales. (Basurto, 2013)

Para realizar este tipo de ensayos las ondas elásticas son provocadas de forma artificial, pudiendo ser de forma explosiva o por medio de algún tipo de impacto. Esto provocará vibraciones sobre el suelo, las cuales serán registradas por medio de aparatos muy sensibles, que se conocen como: geófono o sismógrafo. Estos dispositivos se encuentran distanciados entre sí, pudiendo ser de 15 a 30 metros. Este método se puede aplicar de dos formas: por refracción o reflexión.

### **7.2.2. Refracción y reflexión sísmicas**

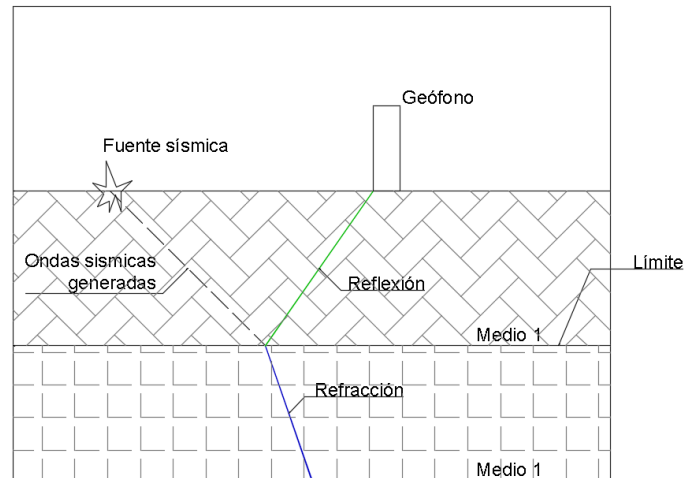
El método por reflexión consiste en medir el tiempo en que una onda sísmica tarda en realizar el trayecto entre el geófono receptor desde el origen o

fuerza inicial, después de que es reflejada sobre una superficie delimitante entre dos diferentes medios naturales distintos. El procedimiento para realizar el ensayo es muy sencillo, requiere de instrumentos y dispositivos específicos y de la ubicación hacia el centro de perturbación en una profundidad específica. Al utilizar estos dispositivos surge la necesidad de realizar un registro para la onda sísmica cuando el suelo aún está en movimiento. “Este es uno de los métodos que devuelven resultados más exactos y es comúnmente usado en prospección petrolífera”. (Ávalos, 2008).

El método por refracción tiene como base que la onda sísmica que pasa sobre el cambio o frontera entre materiales que conforman el medio es refractada hacia el plano donde ocurre el cambio de materiales y se genera un cambio de velocidad sobre la que se tenía al principio y se refracta perpendicularmente sobre un plano si la velocidad en que se propaga disminuye en comparación al medio inicial. Se colocan varios geófonos a diferentes distancias del punto de la fuente inicial, el más alejado oscila entre 3 y 12 veces la profundidad a explorar. (Ávalos, 2008).

Es considerado que este método es posible utilizarlo únicamente cuando va aumentando la velocidad en que se propagan las ondas entre los estratos del suelo. Aunque también pueden presentarse complicaciones entre depósitos sueltos en los que la velocidad va en aumento de acuerdo a la profundidad, esto significa que las gráficas de tiempo vs distancia generadas serán curvas, y esto provocaría una dificultad para determinar la velocidad en que se propaga y los posibles espesores para los estratos.

Figura 6. **Método sísmico por refracción / reflexión**



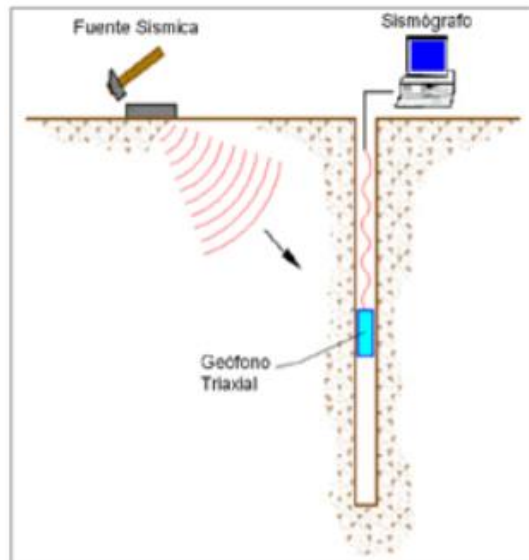
Fuente: Rodríguez, A. R. (2005). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres*.

### 7.2.3. **Método Down Hole**

El objetivo del método Down-Hole es generar sobre la superficie ondas sísmicas, esto a través de golpes horizontales y verticales, sobre una placa situada a una distancia entre 1.00 a 3.00 metros aproximadamente del pozo. Se registran los tiempos de llegada de las ondas sísmicas tipo P y tipo S. (Álvarez, 2007).

Estas ondas se registran utilizando la ayuda de un geófono, el cual normalmente está situado en el inferior de la sonda, estas suelen medirse entre cada metro, así hasta que alcance la totalidad de la profundidad del pozo. Como se conoce la forma geométrica de la fuente – geófono, y el tiempo en que llegan las ondas sísmicas generadas, hace posible que se pueda obtener matemáticamente la velocidad en que se propagan a través de los diferentes niveles de profundidad por todo el pozo.

Figura 7. **Esquema de un ensayo Down-Hole**



Fuente: Álvarez, J. P. (2007). *Geofísica con radar*.

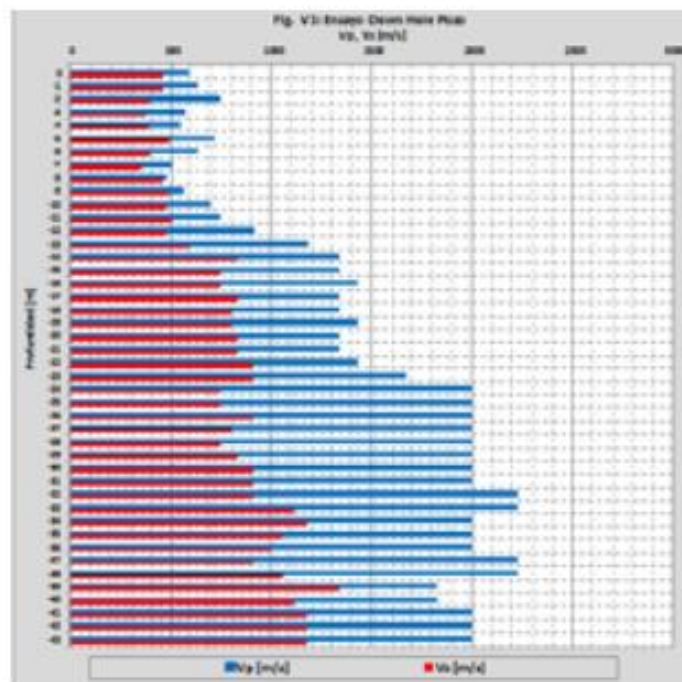
Si se basa en la velocidad en que las ondas se propagan, y se considera la densidad del material de que está compuesta el área de estudio, es posible poder determinar los módulos dinámicos en que el terreno es deformado, los cuales son: Módulo de Young, Poisson, Módulo de corte, etc.

Entre las principales aplicaciones destacan:

- Actualmente este método es recomendado para determinar la velocidad en que las ondas sísmicas de corte ( $V_s$ ) se propagan y es posible clasificar el suelo según DS61 2011.
- Para el reconocimiento entre las fronteras de las diferentes unidades litológicas.
- Realizar una evaluación sobre las propiedades geotécnicas para cada unidad geológica y también determinar las zonas de fractura, cambio de rocas, etc.

- “A través de los resultados o módulos obtenidos, es posible calcular la respuesta sísmica en diferentes obras civiles o estructuras”. (Álvarez, 2007).

Figura 8. **Perfiles en profundidad y velocidad de onda**



Fuente: Álvarez, J. P. (2007). *Geofísica con radar*.

### 7.3. Ensayo de penetración estándar

El ensayo de penetración permite obtener un valor N de resistencia a la penetración que consiste en sumar los números de golpes de los dos tramos intermedios de 15 cm desechándose tanto el primer como el último tramo por posibles alteraciones del suelo, derrumbes de las paredes del sondeo o sobrecompactaciones del propio ensayo.

### **7.3.1. Descripción del ensayo**

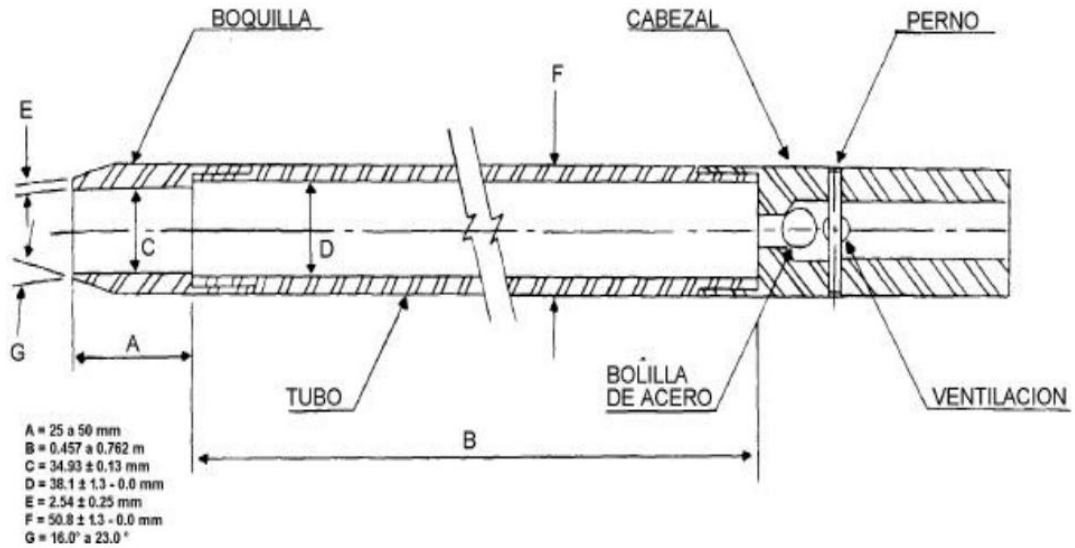
Este ensayo consiste en una penetración dinámica, se utiliza comúnmente para realizar sondeos en áreas específicas donde se pretende realizar un reconocimiento geotécnico.

El ensayo de penetración estándar es de los que más se utilizan en la actualidad para realizar sondeos. El ensayo consiste en realizar un conteo de los golpes que se necesitan para que la probeta normada pueda introducirse a una profundidad específica, y le permita tomar una muestra en el interior.

El número de golpes se contabiliza y se anota el número que sea necesario para introducir la probeta normada de ensayo, comúnmente es en intervalos de 0.15m. El ensayo de penetración estándar es muy útil para caracterizar suelos granulares (gravas arenosas o arenas), ya que en estos suelos es muy difícil obtener alguna muestra inalterada para su correspondiente ensayo en el laboratorio.

Al estar su uso muy extendido y disponer de una gran experiencia geotécnica en estas pruebas, “se han realizado planteamientos para correlacionar el número de golpes (N) del ensayo de penetración estándar (SPT) respecto a las características de suelo arenoso, y también con diferentes aspectos para el diseño geotécnico”. (Cassan, 1982).

Figura 9. Muestreador normalizado para (SPT)



Fuente: Cassan, M. (1982). *Los ensayos in situ en la mecánica del suelo*.

### 7.3.2. Generación de ondas por ensayo SPT

Al desarrollarse de forma tradicional un ensayo de penetración estándar, en el fondo de la perforación se genera un impacto que produce varios tipos de ondas, y no es evidente su identificación para cada una, dado que parece muy complicado el mecanismo de penetración. Sin embargo, una interpretación simplificada del evento como una fuerza vertical aplicada en profundidad en un medio elástico puede ser un modelo bastante bueno para representar la generación de ondas por el efecto de la penetración del muestreador.

Al utilizar coordenadas esféricas  $(r, \theta, \Phi)$ , cuando una fuerza con magnitud  $G$  dependiente del tiempo actúa en el origen de la dirección vertical ( $\Phi = 0$ ), los componentes obtenidos del desplazamiento  $(u_r, u_\theta, u_\Phi)$  para la profundidad podrían estar descritos como:



$$u_r = \frac{G \cos\varphi}{4\pi\rho\alpha^2 r} g \left( t - \frac{r}{\alpha} \right)$$

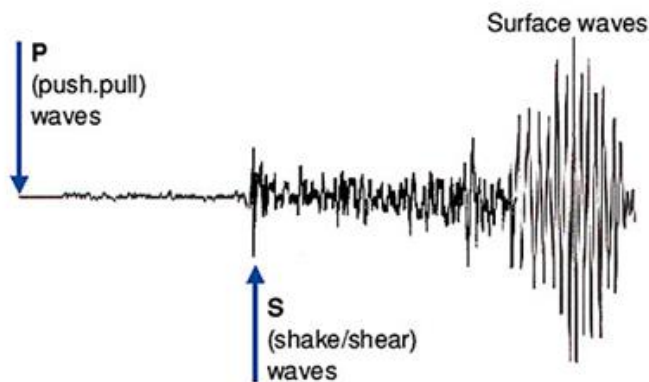
$$u_\theta = 0$$

$$u_\varphi = \frac{G \sin\varphi}{4\pi\rho\beta^2 r} g \left( t - \frac{r}{\beta} \right)$$

Considerando que “ $\alpha$ ” es la velocidad para la onda de compresión (p),  $\beta$  para la velocidad de la onda corte (s) y la  $\rho$  como la densidad del material. “El desplazamiento que se genera de forma radial  $u_r$  es dado únicamente por las ondas tipo P, al contrario de la componente tangencial  $u_\phi$  es el resultado únicamente por las ondas tipo S”. (Cassan, 1982 p. 97). Se espera que las ondas tipo S posean una mayor amplitud en comparación de las ondas tipo P.

En conclusión a lo expuesto anteriormente, será beneficioso para la medición de ondas tipo S, ya que existirá un predominio en los resultados para el registro de las ondas de corte que se puedan generar en las pruebas.

Figura 10. **Ejemplo de registro de ondas tipo P y S**



Fuente: González, J. A. (2011). *Evaluación de métodos no convencionales de caracterización geotécnica*.

#### **7.4. Caracterización del movimiento del suelo**

Las ondas sísmicas son ondas elásticas, las cuales se caracterizan porque generan deformaciones y fuerzas, lo cual obedece la teoría de elasticidad, que dice: “los cuerpos sólidos poseen la capacidad de resistir cambios en su volumen y forma, así como regresar a su forma inicial cuando se le retiran las fuerzas externas”. (Josa, 2007).

Para caracterizar un suelo se busca obtener la velocidad de ondas que se propagan a través del mismo, ya que la velocidad de ondas sísmicas está en función con las propiedades de los suelos. Ya que esto permite obtener información de las propiedades dinámicas del lugar de estudio, con esta técnica se obtienen los perfiles de las capas o medios del suelo para identificar cavidades, fallas y cualquier otro tipo de discontinuidad sobre la superficie del suelo.

La deformación que se genera en el suelo responde a una compresión y dilatación alternada, de tal manera que las partículas que componen cada tipo de material pueden acercarse y alejarse respectivamente a la fuerza que generan las ondas sísmicas.

Cuando existe un cambio de material y las ondas sísmicas pasan de uno hacia el otro, cambiará su velocidad, es decir, una parte estará reflejada y la otra estará refractada. Principalmente es posible detectar límites de tipo de material, fallas y rellenos de poros.

#### 7.4.1. Coeficiente de Poisson

El coeficiente de Poisson dice que: cuando el cuerpo al que se le aplican las fuerzas externas (en este caso las ondas sísmicas) provoca que se acorte por una fuerza de compresión y se alargue perpendicularmente a la dirección de la compresión, o si el cuerpo es alargado por el efecto de tensión, pero este disminuye su ancho perpendicularmente a la tensión, entonces de la relación para la deformación transversal  $e_a$  respecto a la deformación longitudinal  $e_l$  surge la siguiente ecuación:

$$s = \frac{e_a}{e_l} = \frac{D \frac{a}{a}}{D \frac{l}{l}}$$

Se considera que la tensión actúa sobre el material hacia una dirección pero, como el volumen es constante, el coeficiente de Poisson tendrá su valor máximo como: 0.5. A partir de esto se considera la siguiente tabla de datos:

Tabla 1 Tipos de roca con Poisson

Tipo de roca	Rango del coeficiente de <u>Poisson</u>
Roca consolidada, no alterada	0.2 – 0.3
Roca sedimentaria clástica	0.02 – 0.05

Fuente: Basurto, C. A. (2013). *Estudio de atenuación sísmica en la región centro-sur del Golfo de California.*

#### 7.4.2. Módulo de Young E

Cuando se habla de tensiones de compresión o tracción, las cuales son las responsables de dar origen a una pequeña deformación, se tiene que la

magnitud de la deformación se da de forma proporcional al esfuerzo de tensión:

$$e = k's = (1/E)'s = E'e$$

Donde:

- S = tensión
- e = deformación
- E= constante de proporcionalidad denominada Módulo de Young.

Si se tiene un material sólido con Módulo de Young “E” con valor alto, la deformación será grande en comparación a si su número de Young “E” es pequeño. Véase la siguiente tabla de comparaciones:

Tabla VI. **Clasificación de materiales con “E”**

<b>Tipo de roca</b>	<b>Resistencia a la compresión en kg/cm<sup>2</sup> -valores limites-</b>	<b>Resistencia a la tracción en kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>Resistencia al cizallamiento en kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>Módulo de YOUNG en kg/cm<sup>2</sup> - valores medios-</b>
Basalto	1500 - 4500	150	300	800000
Granito de grano fino	2000 - 2500	65 - 115	150 - 160	
Granito de grano grueso y en general	370 - 3790	30 - 80	100 - 300	100000 - 400000
Pórfido de cuarzo	1500 - 3500	65	150	
Cuarcita	260 - 3200			100000 - 450000
Mármol	310 - 3000	30 - 90	100 - 300	800000
Caliza en general	60 - 3600	10 - 117	35- 200	100000 - 800000
Caliza porosa	400 - 800			
Dolomía	790 - 1300	16 - 28	70 -75	<100000 - 710000
Arenisca en general	100 - 3000	oct-43	46 -150	<20000 - 636000
Arenisca calcárea	900 - 3000			30000 - 60000
Arcilla esquistosa	600 - 3130	250	50 - 250	40000 - 200000
Gneis	810 - 3270		<650	<100000 - 400000

Fuente: Castillo, A. J. (2007). *Correlación entre el valor N del ensayo de penetración estándar y velocidad de ondas de corte para arcillas en Bogotá, Colombia.*

## 7.5. Respuesta sísmica de los suelos

“A través del paso de ondas sísmicas sobre el suelo, principalmente pueden presentarse dos tipos de respuesta en el sitio.” (Aki, 1988, p. 100). La primera se caracteriza porque el suelo es capaz de modificar su contenido

frecuencial y su amplitud, esto provoca que el suelo sea muy destructivo; en cambio, en la segunda forma el suelo falla y se fisura, ya que se mueve de forma vertical y horizontal. “Estos estudios son muy esenciales, ya que con estos se pueden definir y entender el papel en el que está involucrado el perfil geológico del suelo, las propiedades dinámicas y estáticas que posee.” (Aki, 1988, s/p).

Los movimientos que un suelo genera en la superficie en una masa de suelo no saturado se pueden atribuir a la propagación de forma vertical de las ondas de corte ( $V_s$ ) desde su formación rocosa. “El suelo se comporta como un material de tipo viscoelástico lineal, y la rigidez del suelo es constante con la profundidad. En cuanto al movimiento en la base, se realiza de forma horizontal, simple y armónico”. (Díaz, 2005).

### **7.5.1. Licuefacción del suelo**

“Este fenómeno puede producirse en lugares con arena fina limpia o poco limosa, no cohesiva, considerando también que el nivel freático se puede encontrar muy cerca en la superficie.” (Bolt, 1999, s/p).

Cuando estos tipos de suelo son sometidos a esfuerzos cortantes de forma cíclica, que pueden provenir de ondas de corte ( $V_s$ ), tenderán a comprimirse, esto puede generar presiones en los poros, que no podrán disiparse, y esto ocasionará disminución de esfuerzo efectivo dentro de los materiales del suelo. Y si las presiones en los poros tienden a ser igual al esfuerzo geostático, se genera la condición del esfuerzo efectivo = 0. Esto provocará la pérdida de resistencia al esfuerzo de corte total, las partículas perderán su confinamiento y se desplazarán hasta la superficie del suelo, en forma de chorros de agua, lo cual tendrá como consecuencia la falla de algún

tipo de cimentación que se encuentre en el sitio y también la inestabilidad de taludes, etc.

## 8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

HIPÓTESIS

RESUMEN DEL MARCO TEÓRICO

INTRODUCCIÓN

### CAPÍTULO I

- 1.1 Ondas sísmicas y ensayos de medición
  - 1.1.1 Ondas sísmicas
  - 1.1.2 Tipos de ondas sísmicas
  - 1.1.3 Ondas sísmicas a través del suelo
  - 1.1.4 Velocidad de ondas sísmicas
- 1.2 Ensayos tradicionales de medición de ondas sísmicas
  - 1.2.1 Método gravimétrico
  - 1.2.2 Método Down Hole
- 1.3 Ensayo de penetración estándar
  - 1.3.1 Descripción del ensayo
  - 1.3.2 Generación de ondas por ensayo (SPT)
- 1.4 Caracterización del movimiento del suelo
  - 1.4.1 Coeficiente de Poisson



- 1.4.2 Módulo de Young E
- 1.5 Respuesta sísmica de los suelos
  - 1.5.1 Licuefacción del suelo

## CAPÍTULO II

- 2.1 Métodos y materiales
- 2.2 Descripción del sitio
- 2.3 Ensayos de penetración estándar
- 2.4 Descripción de la prueba
- 2.5 Modelo de análisis

## CAPÍTULO III

- 3.1 Obtención de resultados
  - 3.1.1 Aplicación de ecuaciones empíricas de correlación “N” del SPT con la velocidad de ondas de corte vs.
    - 3.1.1.1 Aplicación de ecuación Imai y Yoshimura
    - 3.1.1.2 Aplicación de ecuación Ohta y Goto
    - 3.1.1.3 Aplicación de ecuación Imai
- 3.2 Comparación de resultados entre las distintas ecuaciones empíricas

## CAPÍTULO IV

- 4.1 Presentación de resultados obtenidos
- 4.2 Análisis de resultados obtenidos
- 4.3 Caracterización geotécnica del subsuelo a través de los resultados obtenidos
- 4.4 Estimación del comportamiento dinámico del suelo
- 4.5 Logros obtenidos

CONCLUSIONES  
RECOMENDACIONES  
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS  
ANEXOS



## 9. METODOLOGÍA

Se realizará una inspección general de campo, esto permitirá identificar en forma general las características del sitio en estudio. A su vez se podrá determinar los puntos donde se realizarán los ensayos de penetración estándar (SPT). Se realizará el ensayo de penetración estándar (SPT) en las posiciones donde se crea conveniente en el sitio de estudio. Una vez realizados los ensayos se conocerán las propiedades físico-mecánicas del suelo.

Mediante los resultados obtenidos a través de los ensayos se espera obtener la velocidad de ondas sísmicas (velocidad de corte ( $V_s$ ) m/s a través de una correlación con el número de golpes (N) del ensayo SPT. A través de las velocidades de onda sísmica obtenidas en los ensayos se realizará una caracterización geotécnica del suelo, mediante el uso de tablas con datos empíricos.

Se estimará el comportamiento de respuesta sísmica o comportamiento dinámico que el suelo posee. Se obtendrán los logros obtenidos, es decir el porcentaje de eficacia que se obtiene al utilizar correlaciones entre en el ensayo de penetración estándar con la velocidad de ondas sísmicas y su comportamiento dinámico.

## 9.1 Ensayo de penetración estándar (SPT)

El ensayo de penetración estándar SPT (del inglés Standard Penetration Test), es un tipo de prueba de penetración dinámica, empleada para ensayar terrenos en los que se quiere realizar un reconocimiento geotécnico a una profundidad mayor a 5.0 m. El método ha sido estandarizado desde 1958, con varias revisiones (ASTM D-1586) y consiste en hincar un tomamuestras partido de 18" (» 45cm) de largo colocado al extremo de una varilla AW, por medio de un peso (martillo) de 140lb (» 63.5kg) que se deja caer "libremente" desde una altura de 30" (» 76cm), anotando los golpes necesarios para penetrar cada 6" (» 15cm).

Figura 11. **Maquinaria utilizada**



Fuente: Cassan, M. (1982). *Los ensayos in situ en la mecánica del suelo*.

## **9.2. Descripción del ensayo SPT**

Una vez que en la perforación del sondeo se ha alcanzado la profundidad a la que se ha de realizar la prueba, sin avanzar la entubación y limpio el fondo del sondeo, se desciende el tomamuestras SPT unido al varillaje hasta apoyarse en el fondo. Realizada esta operación, se eleva repetidamente la masa con una frecuencia constante, dejándola caer libremente sobre un cabezal que se coloca en la zona superior del varillaje.

Se contabiliza y se anota el número de golpes necesarios para hincar la cuchara los primeros 15 centímetros. Posteriormente se realiza la prueba en sí, introduciendo otros 30 centímetros, anotando el número de golpes requerido para la hincada en cada intervalo de 15 centímetros de penetración.

Si el número de golpes necesario para profundizar en cualquiera de estos intervalos de 15 centímetros es superior a 50, el resultado del ensayo deja de ser la suma anteriormente indicada, para convertirse en rechazo (R), debiéndose anotar también la longitud hincada en el tramo en el que se han alcanzado los 50 golpes. El ensayo SPT en este punto se considera finalizado cuando se alcanza este valor. (Por ejemplo, si se ha llegado a 50 golpes en 120 mm en el intervalo entre 15 y 30 centímetros, el resultado debe indicarse como en 120 mm, R).

Como la cuchara SPT suele tener una longitud interior de 60 centímetros, es frecuente hincar mediante golpeo hasta llegar a esta longitud, con lo que se tiene un resultado adicional que es el número de golpes.

Figura 12. **Operación del ensayo**



Fuente: González, J. A. (2011). *Evaluación de métodos no convencionales de caracterización geotécnica.*

## 10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

### 10.1. Ensayo de penetración estándar

Consiste en medir el número de golpes necesario para que se introduzca una determinada profundidad una cuchara (cilíndrica y hueca) muy robusta (diámetro exterior de 51 milímetros e interior de 35 milímetros, lo que supone una relación de áreas superior a 100), que le permite tomar una muestra en su interior, naturalmente alterada. El peso de la maza y la altura de la caída libre están normalizados, siendo de 63'5 kilopondios y 76 centímetros, respectivamente.

Cuando en la perforación del sondeo se alcanza la profundidad donde se efectuará la prueba, sin avanzar la entubación y viendo limpio el fondo del sondeo, se desciende el tomamuestras SPT unido al varillaje hasta apoyar en el fondo con suavidad. Luego se eleva repetidamente la maza con una frecuencia constante, dejándola caer libremente sobre una sufridera colocada en la zona superior del varillaje. Se contabiliza y se anota el número de golpes necesarios para hincar la cuchara los primeros 15 centímetros (N0 – 15).

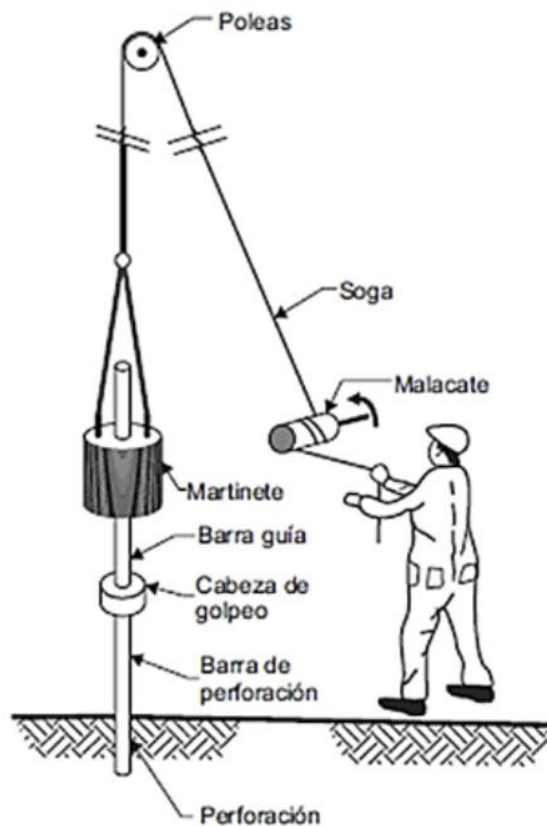
Seguidamente se realiza la prueba en sí, introduciendo otros 30 centímetros, anotando el número de golpes requerido para la hincada en cada intervalo de 15 centímetros de penetración (N15 – 30 y N30 – 45). El resultado del ensayo es el golpeo SPT o Resistencia a la Penetración Estándar:

$$NSPT = N15 - 30 + N30 - 45$$



Si el número de golpes requerido para profundizar en cualquiera de estos intervalos de 15 centímetros supera los 50, el resultado del ensayo deja de ser la suma anteriormente indicada, para convertirse en rechazo (R), debiéndose anotar también la longitud hincada en el tramo en el que se han alcanzado los 50 golpes.

Figura 13. Esquema ilustrado el ensayo SPT



Fuente: Cassan, M. (1982). *Los ensayos in situ en la mecánica del suelo*.

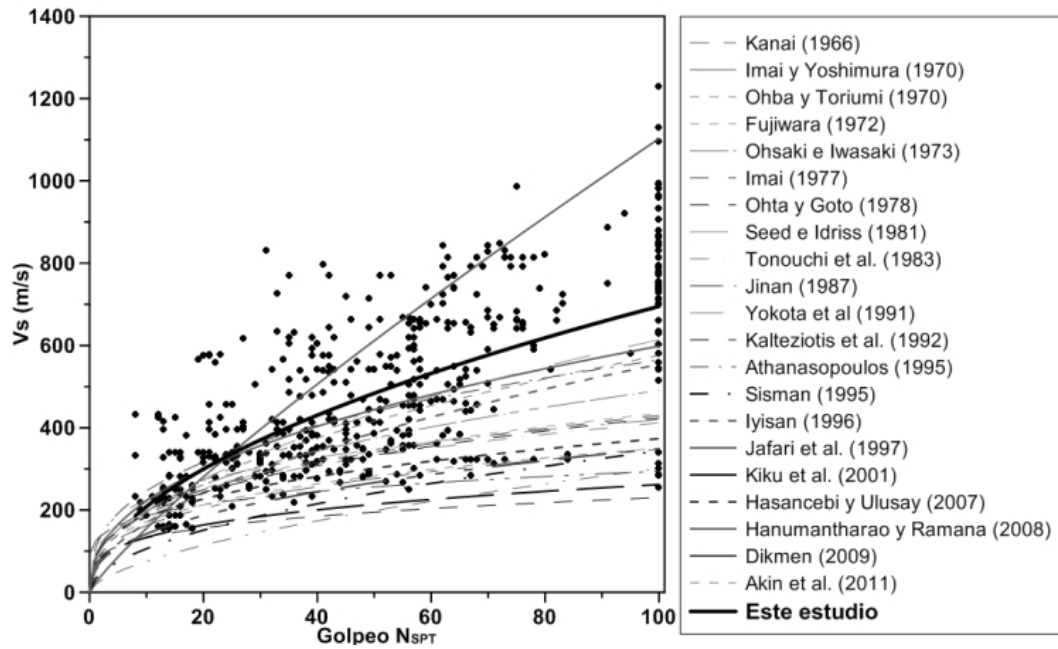
## 10.2. Correlaciones entre SPT y velocidad de ondas sísmicas

Naturalmente siempre es mejor contar directamente con datos medidos *in situ*, pero en muchas ocasiones no se pueden realizar ciertos ensayos o estos requieren demasiado tiempo y dinero, por lo que hay que recurrir a ecuaciones

empíricas para poder estimarlos. Por este motivo, las correlaciones empíricas se utilizan frecuentemente como una herramienta predictiva en la ingeniería geotécnica, especialmente en las etapas preliminares de diseño de proyectos, cuando es necesario caracterizar rápidamente grandes extensiones de terreno y determinar la idoneidad del suelo para un propósito específico. Con esta finalidad, existen en la literatura multitud de estimaciones que relacionan entre sí, todo tipo de propiedades mecánicas y parámetro geotécnicos.

El creciente interés en la ingeniería por conocer el valor de la velocidad de ondas sísmicas, así como las habituales dificultades para estimarla directamente, han dado lugar a un número de correlaciones que establecen el valor de  $V_s$  en función de la litología y distintos parámetros geotécnicos. De entre todas estas correlaciones, sin duda la más frecuente es la que relaciona la  $V_s$  y el resultado del ensayo de resistencia a la penetración estándar (N), al ser este un parámetro de uso muy común y extendido. (Pérez Santiesteban, 2012).

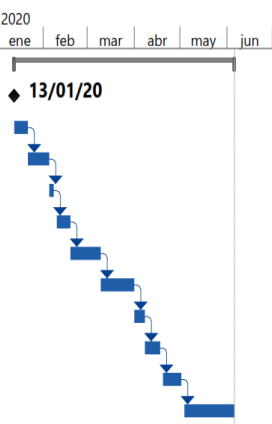
Figura 14. Ejemplo de comparación de correlaciones entre Vs y N



Fuente: Pérez Santiesteban, M. M. (2012). *Correlaciones empíricas entre la velocidad de propagación de las ondas S (Vs) y otros parámetros geotécnicos para los suelos.*

## 11. CRONOGRAMA

Tabla VII. Cronograma de trabajo

Id	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	2020 ene   feb   mar   abr   may   jun
0	<b>CRONOGRAMA</b>	<b>105 días</b>	<b>lun 13/01/20</b>	<b>vie 5/06/20</b>	
1	Inicio	0 días	lun 13/01/20	lun 13/01/20	
2	Observar geología y topografía local del lugar en estudio	7 días	lun 13/01/20	mar 21/01/20	
3	Realizar una caracterización del lugar a través del subsuelo expuesto	10 días	mié 22/01/20	mar 4/02/20	
4	Realizar pruebas de penetración estándar	3 días	mié 5/02/20	vie 7/02/20	
5	Estudio de condiciones geológicas de la zona	7 días	lun 10/02/20	mar 18/02/20	
6	Procesamiento y análisis de datos obtenidos	14 días	mié 19/02/20	lun 9/03/20	
7	Utilizar correlaciones y obtener las velocidades de ondas	16 días	mar 10/03/20	mar 31/03/20	
8	Obtención de resultados a través de las correlaciones	5 días	mié 1/04/20	mar 7/04/20	
9	Análisis de datos resultados para concluir la hipótesis	8 días	mié 8/04/20	vie 17/04/20	
10	Presentación de resultados	10 días	lun 20/04/20	vie 1/05/20	
11	Presentación y finalización de informe	25 días	lun 4/05/20	vie 5/06/20	

Fuente: elaboración propia.



## 12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Tabla VIII. Recursos necesarios para la investigación

ACTIVIDAD	COSTO	TIPO DE FINANCIAMIENTO
Honorarios de asesor	Q2,500.00	Propio
Visitas de campo	Q4,000.00	Propio
Ensayos SPT	Q15,000.00	Laboratorio Provida
Estudio de condiciones geológicas generales de la zona.	Q3,000.00	Laboratorio Provida
Procesamiento y análisis de lo obtenido.	Q3,000.00	Propio
Informe final	Q2,000.00	Propio
TOTAL	Q29,500.00	

Fuente: elaboración propia.

La investigación se realizará con una inversión propia, para esto se tiene considerado realizar visitas técnicas al sitio donde se realizará el análisis, esto con la finalidad de identificar visualmente el área. En este segmento se considera tener un costo de Q. 4,000.00.

En el sitio se realizarán varios ensayos SPT, con el apoyo y asesoramiento del ingeniero asesor y el Laboratorio Provida, considerando Q.15,000.00, que será el costo de los materiales y recursos necesarios para realizar las pruebas.

Para el estudio de las condiciones geológicas de la zona se consideran Q. 3,000.00. y con esto se tendrá el apoyo y asesoramiento del personal del Laboratorio Provida y el ingeniero asesor de tesis.

Se consideran Q. 3,000.00 para el procesamiento y análisis de todos los datos obtenidos, esto se realizará en gabinete.

Para las impresiones y otros costos varios destinados al informe final se consideran Q. 2,000.00. Esto será al finalizar la investigación.

Se considera que la investigación es factible ya que será un costo total de Q. 29,500.00, los cuales se obtendrán a través de un financiamiento propio.

### 13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aki, K. (1988). *Local site effects on strong ground motion*. Park City Utah, USA: W.H. Freeman.
2. Álvarez, J. P. (2007). *Geofísica con radar*. Tesis de licenciatura, Universidad de Ovideo, Sevilla, España.
3. Ávalos, J. M. (2008). *Aplicación del método de refracción sísmica para la determinación de velocidades de ondas P*. Tesis de licenciatura, Universidad de El Salvador. San Salvador, El Salvador:
4. Basurto, C. A. (2013). *Estudio de atenuación sísmica en la región centro-sur del Golfo de California*. Baja California, USA: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
5. Bolt, Bruce. (1999). *Earthquakes*. San Francisco, USA: W.H. Freeman.
6. Caballero, M. G. (2001). *El terreno*. Barcelona, España: Edicions, UPC.
7. Cassan, M. (1982). *Los ensayos in situ en la mecánica del suelo*. Barcelona, España: Editores Técnicos Asociados, S. A.
8. Castillo, A. J. (2007). *Correlación entre el valor N del ensayo de penetración estándar y velocidad de ondas de corte para arcillas en Bogotá*. Bogotá, Colombia: Epsilon.



9. Cosa, A. (2007). *Reconocimiento geotécnico del suelo*. Barcelona, España: Edicions UPC.
10. Díaz, J. (2005). *Dinámica de suelos*. Madrid, España: Limusa.
11. Espíndola, J. M. (2006). *Terremotos y ondas sísmicas*. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de México, Ciudad de México, México.
12. González, J. A. (2011). *Evaluación de métodos no convencionales de caracterización geotécnica*. Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
13. Hernández, F. B. (2001). *Ingeniería de presas*. Madrid, España: Gráficas Calima.
14. Huanca, A. C. (1998). *Geografía física*. Tesis de licenciatura, University of Michigan, Michigan, USA.
15. Josa, A. (2007). *Reconocimiento geotécnico del terreno*. Barcelona, España: Edicions UPC.
16. Ordóñez Alfaro, Alejandro J. F. (2012). *Correlación entre el número de golpes (N) del ensayo de penetración estándar y la velocidad de ondas de corte (Vs) para las arcillas de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*. México: Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C.
17. Pérez Santiesteban, M. M. (2012). *Correlaciones empíricas entre la velocidad de propagación de las ondas S (Vs) y otros parámetros*

*geotécnicos para los suelos*. Tesis de maestría, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.

18. Ramos S., C. I. (2012). *Correlación entre el perfil de velocidad*. Santiago, Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil.
19. Rodríguez, A. R. (2005). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres*. México DF, México: Limusa.
20. Satoh T., R. J. (1991). *Soil profiling by spectral analysis of surface waves*. San Francisco, USA: 2° International Conference on Recent Advances in Geotechnical.
21. Vargas, A. J. (1990). *Geotecnia para ingenieros*. México DF, México: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

