

# UNIVERSIDAD DE CUENCA



Facultad de Ingeniería  
Carrera de Ingeniería Civil

## **“Estudio de las velocidades sísmicas de un suelo areno limoso, con diferentes grados de compactación y humedad mediante equipo sísmico.”**

Trabajo de titulación previo a la  
obtención del título de  
Ingeniero Civil.

### **AUTORES:**

Juan Diego Larriva Becerra C.I. 0104959523  
Daniel Santiago Muñoz Zeas C.I. 0105495469

### **DIRECTOR:**

Ing. Benigno Alfredo Vázquez López, M. Sc. C.I. 0101815892

CUENCA – ECUADOR

Octubre 2018



## RESUMEN

El presente trabajo es un estudio experimental que aplica el método de sísmica de refracción, con el propósito de encontrar una relación entre las velocidades de ondas sísmicas principales (P), secundarias (S) y las propiedades físicas de un suelo areno – limoso.

Se obtuvo una muestra de suelo del sitio conocido como “La Unión” en el cantón Chordeleg, provincia del Azuay; se realizaron ensayos en laboratorio bajo las normas AASHTO para corroborar que el suelo cumple características mecánicas areno – limosas. Posteriormente, se efectuaron ensayos dinámicos modificando las propiedades físicas del material, registrando el tiempo de propagación de ondas P y S a diferentes grados de compactación y humedad del suelo.

Entre los resultados alcanzados están: la correlación entre las velocidades sísmicas P, S y la densidad húmeda del suelo; y la correlación entre las velocidades sísmicas P, S y el contenido de humedad del material.

Finalmente, se determinó que, al aumentar la densidad del suelo, las velocidades de onda son mayores, pues la reducción de vacíos del suelo provoca una mejor transmisión de ondas en el mismo; por otro lado, un aumento de la humedad del suelo afectó la propagación de ondas a causa de espacios contenidos de agua que producen cambios de densidad del material, y porque los líquidos no admiten movimientos de corte.

Este estudio pretende ser un incentivo a nuevos análisis experimentales aplicando distintos métodos y tipos de suelo desde el ámbito mecánico, llegando a ser un cimiento para tales fines.

## PALABRAS CLAVE:

Velocidad sísmica, velocidad de propagación, onda sísmica, ondas P, ondas S, sísmica de refracción, areno – limoso, densidad húmeda, contenido de humedad.



## ABSTRACT

The present work is an experimental study that applies the refraction seismic method to find a relation between the main seismic wave velocities (P), the secondary seismic velocities (S) and the physical properties of a sandy ground - silty.

A soil sample was obtained from the site known as "La Unión" in the canton of Chordeleg, province of Azuay; Laboratory tests were carried out under the AASHTO standards to corroborate that the soil meets sand - silty mechanical characteristics. Subsequently, dynamic tests were carried out modifying the physical properties of the material, recording the propagation time of P and S waves at different levels of compaction and soil moisture.

Among the results achieved are: the correlation between the seismic velocities P, S and the wet density of the soil; and the correlation between the seismic velocities P, S and the moisture content of the material.

Finally, it was determined that, as the density of the soil increases, the wave velocities are greater, since the reduction of soil voids causes a better transmission of waves in it; On the other hand, an increase in soil moisture affected the propagation of waves due to spaces contained in water that produce changes in the density of the material, and because the liquids do not admit cutting movements.

This study aims to be an incentive to new experimental analysis by applying different methods and types of soil from the mechanical field, becoming a foundation for such purposes.

## KEYWORDS

Seismic velocity, propagation velocity, seismic wave, P waves, S waves, refraction seismic, sandy - silty, humid density, moisture content.



## INDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>19</b>
1.1. Identificación del Problema	19
1.2. Antecedentes	21
1.3. Justificación	22
1.4. Objetivos	23
1.4.1. Objetivo General	23
1.4.2. Objetivos Específicos	23
1.5. Alcance	23
1.6. Limitaciones	25
<b>2. ÁREA Y GEOLOGÍA DE ESTUDIO</b>	<b>26</b>
2.1. Área de estudio	26
2.2. Geología regional	27
2.2.1. Depósitos Aluviales (Da)	27
2.2.2. Depósitos Coluviales (Dc)	27
2.2.3. Metavolcánicos de San Francisco (JP)	27
2.2.4. Formación Tarqui (PT)	27
2.2.5. Rocas Metamórficas Indiferenciadas (Pzi)	28
2.2.6. Tobas de Gualaceo (QL)	28
2.2.7. Terraza Fluvio Glaciar 1-3 (T1-3)	28
2.3. Geología local y litología	29
<b>3. MARCO TEORICO</b>	<b>31</b>
3.1. El Suelo y sus propiedades	31
3.1.1. Propiedades del Suelo importantes en Ingeniería	31
3.1.1.1. Humedad natural del suelo	31
3.1.1.2. Consistencia del Suelo	31
3.1.1.3. Densidad del Suelo	31
3.1.1.4. Fricción Interna del Suelo	32
3.1.1.5. Porosidad del Suelo	32
3.1.1.6. Índice de Poros	32
3.1.1.7. Permeabilidad del Suelo	32
3.1.1.8. Compresibilidad del Suelo	32
3.2. Análisis mecánico del Suelo	32
3.2.1. Análisis por Cribado (Tamizado)	33
3.2.2. Consistencia del Suelo	33
3.2.3. Carta de Plasticidad	35
3.2.4. Clasificación del Suelo	36
3.2.5. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)	36
3.3. Compactación del Suelo	37
3.3.1. Energía Específica de Compactación	38



3.3.2.	Ensayo Proctor de Compactación	39
3.4.	Principios y leyes que rigen el fenómeno de ondas	40
3.4.1.	Ley de Snell	40
3.4.2.	Principio de Huygens - Fresnel	42
3.4.3.	Principio de Fermat	42
3.5.	Ondas Sísmicas de Propagación	43
3.5.1.	Elementos de una Onda	43
3.5.2.	Tipos de Ondas Sísmicas	44
3.5.2.1.	Ondas Sísmicas Internas	44
3.5.2.1.1.	Ondas Primarias o de Compresión (P)	44
3.5.2.1.2.	Ondas Secundarias o de Corte (S)	44
3.5.2.2.	Ondas Sísmicas Superficiales	45
3.5.2.2.1.	Ondas Rayleigh (R)	45
3.5.2.2.2.	Ondas Love (L)	46
3.5.3.	Factores que Afectan la Propagación de Ondas Sísmicas	46
3.5.3.1.	Difracción	46
3.5.3.2.	Dispersión	47
3.5.3.3.	Desperdigamiento (Scattering)	47
3.5.3.4.	Absorción inelástica	47
3.5.3.5.	Divergencia Esférica	47
3.5.3.6.	Conversión de modo de ondas	47
3.5.4.	Factores físicos del suelo que influyen en las velocidades sísmicas	48
3.5.4.1.	Porosidad	48
3.5.4.2.	Litología	48
3.5.4.3.	Cementación	48
3.5.4.4.	Presión	48
3.5.4.4.1.	Presión de confinamiento	48
3.5.4.4.2.	Presión de poro	48
3.5.4.5.	Saturación de fluidos	49
3.5.4.6.	Anisotropía	49
3.6.	Geofísica y Sísmica de refracción	50
3.6.1.	Prospección Geofísica	50
3.6.1.1.	Métodos Sísmicos	51
3.7.	Análisis por Regresión	51
3.7.1.	Modelo de Regresión Lineal Simple	53
3.7.1.1.	Mínimos Cuadrados Ordinarios y la Recta de Mejor Ajuste	54
3.7.1.2.	El Error Estándar de Estimación	55
3.7.1.3.	Análisis de la relación y el Coeficiente de Correlación	55
3.7.1.4.	Limitaciones del Análisis de Regresión	57
3.7.2.	Modelo de Regresión Lineal Múltiple	57
3.7.2.1.	El Error Estándar de Estimación	58
3.7.2.2.	Coeficiente de Determinación Múltiple	59
3.7.2.3.	Coeficiente de Determinación Corregido	59
<b>4.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>61</b>



4.1.	Procedimiento y Equipo utilizado	61
4.1.1.	Obtención de la muestra de suelo	61
4.1.2.	Humedad Natural del suelo	62
4.1.3.	Análisis del suelo por cribado (Granulometría).	62
4.1.4.	Límites de Atterberg	64
4.1.4.1.	Límite Líquido (LL)	64
4.1.4.2.	Límite Plástico (LP)	65
4.1.4.3.	Índice de Plasticidad (IP)	66
4.1.5.	Clasificación del Suelo	66
4.1.6.	Ensayo Proctor Modificado	68
4.1.7.	Ensayo Dinámico del suelo	69
4.1.7.1.	Ensayo de Sísmica de Refracción	72
4.2.	Procesamiento de Datos	73
4.3.	Análisis por Regresión Lineal	75
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSION</b>	<b>76</b>
5.1.	Resultados de Humedad Natural del Suelo	76
5.2.	Análisis Mecánico del Suelo	76
5.2.1.	Resultados del Análisis del Suelo por Cribado (Granulometría)	76
5.2.2.	Resultados de la Consistencia del Suelo	78
5.2.2.1.	Límite Líquido	78
5.2.2.2.	Límite Plástico	79
5.2.2.3.	Índice de Plasticidad	79
5.2.3.	Clasificación del Suelo por el Método SUCS	80
5.3.	Compactación del Suelo	80
5.3.1.	Resultados de Ensayo Proctor Modificado	80
5.4.	Análisis Dinámico del Suelo	81
5.4.1.	Resultados Obtenidos en la Preparación del Suelo para el Ensayo Dinámico	82
5.4.2.	Resultados Obtenidos en el Ensayo de Sísmica de Refracción	84
5.4.3.	Resumen de Resultados del Ensayo Dinámico del Suelo Considerando Humedades Medias	90
5.4.4.	Resumen de Resultados del Ensayo Dinámico del Suelo Considerando el Grado de Compactación	92
5.5.	Análisis de Regresión Lineal	94
5.5.1.	Correlaciones Múltiples	95
5.5.1.1.	Correlación entre Velocidades de Onda Sísmica $V_p$ y $V_s$ y Densidad Húmeda del Suelo	95
5.5.1.2.	Correlación entre Velocidades de Onda Sísmicas $V_p$ y $V_s$ y Humedad a Diferentes Grados de Compactación	96
5.5.2.	Correlaciones Simples	99
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>101</b>
<b>7.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b>	<b>104</b>



<b>8. ANEXOS</b>	<b>106</b>
8.1. Obtención de la muestra de suelo.	106
8.2. Registro fotográfico de ensayo dinámico	108
8.3. Registro de ensayos dinámicos – Hojas de laboratorio	115
8.4. Registro de tiempos en el equipo sísmico	118



## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 4.1.</b> Símbolos de grupos para suelos arcillosos. Método SUCS-----	Pág. 67
<b>Tabla 5.1.</b> Resultado del ensayo de humedad natural del suelo analizado-----	Pág. 76
<b>Tabla 5.2.</b> Resultados obtenidos en el ensayo de Granulometría-----	Pág. 77
<b>Tabla 5.3.</b> Resumen de la Granulometría del suelo-----	Pág. 77
<b>Tabla 5.4.</b> Resultados del ensayo de límite líquido-----	Pág. 78
<b>Tabla 5.5.</b> Resultados del ensayo de límite plástico-----	Pág. 79
<b>Tabla 5.6.</b> Resultados de índice de plasticidad-----	Pág. 79
<b>Tabla 5.7.</b> Clasificación del suelo ensayado por el método SUCS-----	Pág. 80
<b>Tabla 5.8.</b> Datos del ensayo proctor modificado por el método A-----	Pág. 80
<b>Tabla 5.9.</b> Densidad húmeda y densidad seca del suelo compactado-----	Pág. 80
<b>Tabla 5.10.</b> Contenido de humedad del suelo ensayado-----	Pág. 80
<b>Tabla 5.11.</b> Resultados obtenidos en el ensayo proctor modificado-----	Pág. 81
<b>Tabla 5.12.</b> Resultados obtenidos durante la preparación del suelo para el ensayo dinámico-----	Pág. 82
<b>Tabla 5.13.</b> Resultados obtenidos de la energía de compactación en el molde-----	Pág. 84
<b>Tabla 5.14.</b> Resultados de velocidades de onda, ensayo 1-----	Pág. 85
<b>Tabla 5.15.</b> Resultados de velocidades de onda, ensayo 2-----	Pág. 86
<b>Tabla 5.16.</b> Resultados de velocidades de onda, ensayo 3-----	Pág. 87
<b>Tabla 5.17.</b> Resultados de velocidades de onda, ensayo 4-----	Pág. 88
<b>Tabla 5.18.</b> Resultados de velocidades de onda, ensayo 5-----	Pág. 89
<b>Tabla 5.19.</b> Resultados del Ensayo Dinámico del Suelo Considerando Humedades Medias-----	Pág. 90
<b>Tabla 5.20.</b> Resultados del Ensayo Dinámico del Suelo Considerando el Grado de Compactación-----	Pág. 92
<b>Tabla 5.21.</b> Análisis estadístico de regresión entre Velocidades de Onda $V_p$ , $V_s$ y la densidad húmeda del suelo-----	Pág. 95
<b>Tabla 5.22.</b> Resumen del modelo de regresión lineal múltiple entre velocidades de onda sísmica y humedad a 0 golpes de compactación-----	Pág. 96
<b>Tabla 5.23.</b> Resumen del modelo de regresión entre velocidades de onda sísmica y humedad a 9 golpes de compactación-----	Pág. 97



**Tabla 5.24.** Resumen del modelo de regresión entre velocidades de onda sísmica y humedad a 18 golpes de compactación-----Pág. 98

**Tabla 5.25.** Resumen del modelo de regresión entre velocidades de onda sísmicas y humedad a 36 golpes de compactación-----Pág. 98

**Tabla 5.26.** Resumen de correlaciones simples entre:  $V_p$  vs. densidad húmeda y  $V_s$  vs. densidad húmeda-----Pág. 99

**Tabla 5.27.** Resumen de correlaciones simples entre:  $V_p$  vs. humedad y  $V_s$  vs. Humedad a diferentes grados de compactación-----Pág. 100

## INDICE DE FIGURAS

**Figura 2.1.** Provincia del Azuay-----Pág. 26

**Figura 2.2.** Cantón Chordeleg de la provincia del Azuay-----Pág. 26

**Figura 2.3.** Ubicación del punto de extracción del suelo analizado (Sector La Unión, Chordeleg)-----Pág. 27

**Figura 2.4.** Geología Regional del cantón Chordeleg (Secretaría de Gestión de Riesgos – SGR) ------Pág. 28

**Figura 2.5.** Calicata realizada para la obtención de la muestra de suelo-----Pág. 29

**Figura 2.6.** Geología local del punto de extracción del suelo-----Pág. 30

**Figura 3.1.** Ejemplos de curvas granulométricas-----Pág. 33

**Figura 3.2.** Límites de Atterberg (Das, 2001) -----Pág. 34

**Figura 3.3.** Carta de plasticidad de Casagrande (Das, 2001) -----Pág. 36

**Figura 3.4.** Relación entre el contenido de humedad y el peso específico de un suelo, sometido a energía de compactación (Das, 2001) -----Pág. 38

**Figura 3.5.** Frente de ondas en el análisis de trayectoria de ondas-----Pág. 40

**Figura 3.6.** Reflexión y refracción en un interplano aire-agua (López et al., 2008) -----Pág. 41

**Figura 3.7.** Principio de Huygens - Fresnel. Explica la propagación de una onda plana en el espacio y como avanza un frente de ondas; la flecha indica la dirección de propagación del rayo de luz-----Pág. 42

**Figura 3.8.** Elementos de una onda (Curso de Interpretación sísmica Campo Escuela Colorado, 2011) -----Pág. 43

**Figura 3.9.** Ondas primarias (P) o de compresión-----Pág. 44

**Figura 3.10.** Ondas secundarias (S) o de corte-----Pág. 45

**Figura 3.11.** Ondas Rayleigh (R) -----Pág. 46

**Figura 3.12.** Ondas Love (R) -----Pág. 46



<b>Figura 3.13.</b> Presión diferencial vs velocidades de onda (Wang, 2001) -----	Pág. 49
<b>Figura 3.14.</b> Diagramas de dispersión y su correspondiente ajuste por regresión (Webster ,2000) -----	Pág. 52
<b>Figura 3.15.</b> Análisis de correlación entre variables (Webster ,2000) -----	Pág. 56
<b>Figura 4.1.</b> Obtención de la muestra de suelo en campo-----	Pág. 62
<b>Figura 4.2.</b> Ensayo de límite líquido-----	Pág. 65
<b>Figura 4.3.</b> Determinación del límite líquido para N = 25 golpes-----	Pág. 65
<b>Figura 4.4.</b> Nombres de flujo para suelos tipo grava y arenosos (ASTM, 1998) -----	Pág. 65
<b>Figura 4.5.</b> Molde de madera reforzada, utilizada para el ensayo dinámico del suelo-----	Pág. 70
<b>Figura 4.6.</b> Equipo sísmico PASI modelo 16SG24-N (Avilés & Barzallo, 2016) -----	Pág. 72
<b>Figura 4.7.</b> Colocación de geófonos para el ensayo de sísmica de refracción-----	Pág. 73
<b>Figura 4.8.</b> Tiempos de ondas P registrados en el equipo sísmico-----	Pág. 74
<b>Figura 4.9.</b> Tiempos de ondas S registrados en el equipo sísmico-----	Pág. 74
<b>Figura 5.1.</b> Curva granulométrica del suelo-----	Pág. 78
<b>Figura 5.2.</b> Grafica logarítmica de la relación humedad vs número de golpes en el ensayo de límite líquido-----	Pág. 79
<b>Figura 5.3.</b> Curva de Compactación Proctor Modifico-----	Pág. 81
<b>Figura 5.4.</b> Comportamiento de las $V_p$ con relación al grado de compactación del suelo, tomando constante la humedad promedio de ensayo-----	Pág. 91
<b>Figura 5.5.</b> Comportamiento de las $V_s$ con relación al grado de compactación del suelo, tomando constante la humedad promedio de ensayo-----	Pág. 92
<b>Figura 5.6.</b> Comportamiento de las $V_p$ con relación al porcentaje de humedad en el suelo, tomando constante el grado de compactación-----	Pág. 94
<b>Figura 5.7.</b> Comportamiento de las $V_s$ con relación al porcentaje de humedad en el suelo, tomando constante el grado de compactación-----	Pág. 94

## Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Daniel Santiago Muñoz Zeas, autor del trabajo de titulación “Estudio de las velocidades sísmicas de un suelo areno limoso, con diferentes grados de compactación y humedad mediante equipo sísmico”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, octubre de 2018

A handwritten signature in blue ink, appearing to be "D. S. Muñoz Zeas", written over a horizontal line.

Daniel Santiago Muñoz Zeas

C.I: 0105495469

## Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Juan Diego Larriva Becerra, autor del trabajo de titulación “Estudio de las velocidades sísmicas de un suelo areno limoso, con diferentes grados de compactación y humedad mediante equipo sísmico”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, octubre de 2018

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Juan Diego Larriva Becerra", positioned above a horizontal line.

Juan Diego Larriva Becerra

C.I: 0104959523

## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Daniel Santiago Muñoz Zeas en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Estudio de las velocidades sísmicas de un suelo areno limoso, con diferentes grados de compactación y humedad mediante equipo sísmico”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, octubre de 2018



Daniel Santiago Muñoz Zeas

C.I: 0105495469

## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Juan Diego Larriva Becerra en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Estudio de las velocidades sísmicas de un suelo areno limoso, con diferentes grados de compactación y humedad mediante equipo sísmico”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, octubre 2018



---

Juan Diego Larriva Becerra

C.I: 0104959523



## AGRADECIMIENTOS

Mi sincero agradecimiento al Ing. Alfredo Vázquez López, quien con paciencia y sabiduría supo ser un gran mentor dentro de este proyecto. A todos y a cada uno de mis profesores de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca, quienes impartieron sus conocimientos y hasta valores éticos de manera desinteresada.

De igual forma quiero agradecer a cada uno de mis familiares y amigos que alentaron cada día y durante estos años a “echarle ganas”, sin duda cada palabra fue vigor y energía para continuar.

A mi Tío Romeo le quedo inmensamente gratificado por el ejemplo y la ayuda incondicional en todo momento, mi admiración y respeto para usted.

**DANIEL**



## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación no se pudo llevar a cabo sin la ayuda de algunas personas que fueron de vital importancia para la culminación del mismo. Cabe en este punto hacer unas merecidas, así como sinceras muestras de agradecimiento a cada uno de ellos, en especial a nuestro director Ing. Alfredo Vázquez López, por habernos brindado su tiempo, sabiduría, motivación y ayuda continua a lo largo del desarrollo de este trabajo de titulación, así como también al laboratorio Geo & Geo y todas las personas que aquí trabajan ya que nos ayudaron y nos facilitaron con todos los equipos necesarios para la realización de este trabajo.

De igual manera agradecemos a los ingenieros Daniel Mogrovejo y Jaime Bojorque, por haber sido nuestros lectores y guías para la culminación de este trabajo de Titulación.

Agradecemos también a todos los profesores que a lo largo de la carrera nos compartieron sus conocimientos, al personal administrativo y a los encargados del laboratorio de Suelos de la Universidad de Cuenca que con paciencia y de la mejor forma nos supieron apoyar en las tareas necesarias durante toda la carrera y por ende al desarrollo del trabajo de titulación.

Por último, quiero agradecer a toda mi familia en especial a mis padres, así como también a mis amigos que siempre tuvieron una palabra de aliento para mí.

**JUAN DIEGO**



## DEDICATORIA

Los años no han pasado en vano y junto con ellos grandes lecciones de vida perdurarán. Una gratificante etapa concluye, la más difícil sin duda no por académico, lo fué por los obstáculos que la vida misma impone.

¡Para ti MAMA este logro!, después de tantos sacrificios una vida no es suficiente para darte las gracias y expresar lo mucho que te quiero.

Dedicado para mis hermanas Cristina y Daniela; cuanto las Admiro, las Respeto y las Quiero. Sin ustedes mi existir no estaría completo.

Mi profunda gratificación para Jorgito, tanto apoyo y conocimiento entregado en estos años han sido el mejor obsequio entregado, gracias.

Somos esencia, conciencia y subconciencia.

**DANIEL**



## DEDICATORIA

*“Sólo una cosa convierte en imposible un sueño: el miedo a fracasar” Paulo Coelho*

*“La derrota no es el peor de los fracasos. No intentarlo es el verdadero fracaso” Edward Woodberry*

Este trabajo de titulación va dedicado a toda mi familia, sin excepción de ninguno ya que mis padres, hermanos, abuelos, tíos y primos han sido de suma importancia en mi realización y superación como persona, inculcándome los mejores valores y enseñanzas que una persona puede adquirir. Quiero hacer una mención especial a mis padres Juan Diego Larriva Coronel y Silvia Magdalena Becerra Guillen, ya que ellos han sido los pilares más importantes en toda mi vida dándome siempre el mejor ejemplo, a pesar de los innumerables problemas y decepciones que pude haberles ocasionado siempre confiaron en mí y me supieron guiar de la mejor manera para salir adelante. Es por eso, que en esta etapa donde estoy cumpliendo un sueño más, culminando mis estudios universitarios no puedo pasar por alto estos dos maravillosos nombres. Este logro obtenido no solo es mío si no de ellos también. LOS QUIERO MUCHISIMO PAPITOS.

Por otro lado, quiero también dedicarles a mis amigos y a todas esas personas que siempre estuvieron ahí y quisieron mi bien desinteresadamente, dándome siempre una palabra de motivación, aliento, cariño y amor para así no darme por vencido y continuar.

**JUAN DIEGO**



## 1. INTRODUCCIÓN

La constante dinámica en la litósfera de la tierra causa movimiento y colisión de las placas litosféricas (Tectónica de Placas) y con ello la liberación de gran cantidad de energía a través del suelo en forma de ondas cíclicas. Producto de esta liberación de ondas, se originan oscilaciones y vibraciones que se desplazan a lo largo del suelo, mismo que actúa como medio sólido y elástico.

Estos movimientos ondulatorios se propagan en el interior y en la superficie del suelo. Por las características del desplazamiento las ondas internas se dividen en: 1) ondas primarias o longitudinales (P) y, 2) ondas secundarias o transversales (S); mientras que las ondas superficiales pueden ser: 1) ondas Rayleigh y 2) ondas Love.

En un sismo, por ejemplo, la velocidad con la que viajan estas ondas depende de las características del medio en el cual se propagan, presentando mayor velocidad las ondas P, seguidas de las ondas S y finalmente las ondas superficiales.

El análisis de las velocidades de propagación de las ondas sísmicas, considerando el estado físico del suelo, es fundamental al momento de mitigar riesgos en las construcciones, así como para generar un apoyo de estudio a ciencias en progreso como la Geofísica, disciplina que se encarga del estudio de la tierra y del suelo desde el ámbito físico.

### 1.1. Identificación del Problema

El suelo, al ser el lugar en donde se lleva a cabo distintas obras de Ingeniería Civil, debe ser estudiado frente a los distintos e imprevisibles movimientos de ondas sísmicas producidos por fenómenos naturales y hasta artificiales, ya que estos movimientos son una de las principales causas del daño a nivel estructural en edificaciones, ocasionando incluso su colapso. Así, resulta sustancial el estudio de las velocidades de propagación de ondas sísmicas P y S, debido a que de ello depende del tipo y las condiciones físicas del suelo en el que se distribuye la onda.

Los efectos y deterioros ocasionados por un sismo en las edificaciones dependen de factores como: características de las construcciones, características del movimiento sísmico, y las propiedades del terreno mismo sobre el cual se sitúan las construcciones. La magnitud de un sismo es un parámetro que lo define con relación a su energía liberada y es una dimensión poco útil si se trata de vincular la fuerza de un sismo con el daño estructural en las edificaciones. Los movimientos sísmicos se presentan de forma muy distinta dependiendo del tipo de suelo en donde se propagan las



vibraciones. En otras palabras, “el comportamiento sísmico de las edificaciones obedece al movimiento del suelo y al diseño estructural de los mismos, en muchos casos edificaciones estructuralmente capaces de soportar sismos pueden llegar a desmoronarse, debido al tipo y condiciones del suelo” (Carrillo, 2008, p.1).

Dentro de este contexto, la porosidad (vacíos), el contenido de agua y la compactación están entre los factores que afectan la propagación de las ondas sísmicas en los suelos. Los principales agentes son: 1) propiedades litológicas como forma de los granos, tamaño, distribución, tipo, cantidad, consolidación; 2) propiedades físicas como densidad anisotropía, presión y; 3) propiedades elásticas como módulo de corte, módulo de Young, módulo de Poisson (Uyanik, 2011).

En el caso de un suelo del tipo areno – limoso, por sus características físicas el índice de poros es elevado, por tanto, las velocidades de onda estarán sujetas a variaciones.

Técnicas geofísicas modernas permiten el estudio de las velocidades de onda sísmica, mediante el uso de equipo sísmico altamente susceptible a vibraciones e impactos que registran los tiempos de oscilación de las ondas a través del suelo. Entre los métodos más empleados esta la sísmica de refracción, la cual mide el tiempo de viaje de las ondas entre un punto conocido en donde se generan ondas artificiales (por golpe de un martillo) hasta otro punto de observación. Este procedimiento en la práctica profesional tiene cierta limitación, ya que para dar origen a las ondas S de manera artificial, es necesario aplicar sistemas complejos de impacto en el suelo (mediante viga de cortante) y hasta peligrosos (mediante explosivos), por esta razón usualmente la técnica realiza mediciones en  $V_p$  (mediante un golpe vertical en la superficie del suelo) y a partir de allí obtiene resultados de prospección del suelo.

Desde el punto de vista experimental, establecer el movimiento de propagación de onda S en laboratorio y determinar sus efectos en un suelo areno limoso a través de la sísmica de refracción, permitiría determinar una relación con las condiciones del material, como sostén para la aplicación ingenieril

Se plantea como hipótesis: “Cuando el suelo se encuentra en estado sólido o semisólido, es decir la cantidad de agua está por debajo del límite plástico, las velocidades de onda sísmica aumentarán conforme incrementa la densidad del suelo, mientras que, si la cantidad de agua supera dicho



límite, tanto las características del suelo como las velocidades de onda sísmicas, principalmente las ondas transversales o de corte se verán afectadas”.

## 1.2. Antecedentes

Los primeros estudios llevados a cabo con método de refracción sísmica fueron para determinar la profundidad a basamento en los proyectos de construcción de represas y grandes hidroeléctricas, para la determinación de las condiciones (meteorización, fracturación) y competencia de la roca en donde se asentarán las estructuras y para el estudio de proyecto de construcción de túneles.

En el caso de construcciones urbanas la refracción sísmica tomo un lugar importante para el estudio previo, ya que, a pesar de determinar la profundidad a basamento, también permitía determinar el perfil de las velocidades de onda P y S, así como la extrapolación lateral de perforaciones puntuales de suelos.

Posteriormente este método se hizo muy útil para estudios de estabilidad y riesgos geológicos (detección de fallas y cavidades), para la determinación de los parámetros dinámicos del suelo, para la clasificación geomecánica del suelo, entre otros.

Existen antecedentes acerca de la utilización del método de Refracción Sísmica en varios países del mundo, entre los cuales podemos citar Estados Unidos, El Salvador, México, Chile, Colombia, España, Perú e inclusive existen registros en nuestro país.

En estado Unidos usaron la refracción sísmica para estudiar el fenómeno de la Propagación de Ondas en el terreno asociada con explosivos nucleares, así como el diseño de la cimentación para antenas de radar.

En El salvador realizaron una adaptación de los suelos del área metropolitana basándose en la prospección sísmica, en los que se obtuvo expresiones para determinar los parámetros dinámicos como la velocidad de Ondas P y S en función del valor N de la prueba de campo SPT.

En México usaron la refracción sísmica con el objetivo de caracterizar fallas asociadas a la actividad tectónica, a la subsidencia y al efecto de exceso de extracción de agua del subsuelo en la Ciudad de Morelia, Michoacán, así como caracterizar estructuras arqueológicas y paleontológicas del poblado de San Miguel Tocuila.



En Santiago de Chile la refracción sísmica fue usada para fines urbanísticos, haciendo un estudio en depósitos de cenizas y ripio.

En Colombia la refracción sísmica fue usada para evaluar el comportamiento sísmico de los terrenos en el entorno urbano.

En España la refracción sísmica es muy común en obras de ingeniería, el 90% de los trabajos geofísicos, donde se desarrollan estudios geotécnicos para proyectos tales como carreteras y ferrocarriles usan este método.

En Perú la refracción sísmica ha sido de vital importancia para estudios realizados en minas, donde permite la determinación de perfiles sísmicos, definición del suelo firme o basamento rocoso y en la identificación de las características de resistencia de los materiales existentes en el depósito.

En nuestro país Ecuador se han hecho estudios similares en temas geotécnicos, hidrogeológicos, exploración de minas, entre otros. Así también existe información de estudios de caracterización de suelo en zonas urbanas y su relación con resultados de métodos tradicionales de estudio.

Cabe recalcar que todos estos antecedentes existentes de la utilización de del método de refracción sísmica han sido ensayos hechos en campo, mas no de una forma experimental como es nuestro estudio.

### **1.3. Justificación**

La aplicación de métodos geofísicos en la exploración del subsuelo es un procedimiento moderno dentro del campo Ingenieril, ya que son métodos innovadores y no destructivos que permite conocer las características físicas del terreno evitando excavaciones y perforaciones costosas.

En nuestro país la poca difusión y objetividad de estas técnicas son razones por las que se realizó este trabajo “*Estudio de velocidades sísmicas en un suelo areno-limoso, con diferentes grados de compactación y humedad mediante equipo sísmico*”, como un aporte a nuevas conclusiones en este campo, ya que este proyecto es esencialmente experimental; y como una forma de motivar el avance científico a ramas en completo desarrollo como la ingeniería geotécnica sísmica; así también originar y motivar la realización de estudios similares en suelos de características mecánicas diferentes como suelos arcillosos, limosos o arcillosos - limosos.



El laboratorio de suelos de la Universidad de Cuenca y la colaboración de la empresa Geo & Geo apoyaron y motivaron la realización de este proyecto, ya que conjuntamente estos establecimientos cuentan con las herramientas y recursos necesarios para llevar a cabo este trabajo de titulación.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo General**

El presente trabajo de titulación tiene por objeto general el estudio de la variabilidad de las velocidades de onda sísmica en un suelo areno-limoso, sujeto a distintas condiciones de grado de compactación y porcentaje de humedad. Esta variación de condiciones permitirá obtener una relación entre la densidad húmeda del suelo y las velocidades de onda sísmica, así como una relación entre el porcentaje de humedad del suelo y las velocidades de onda sísmica, considerando el grado de compactación del material.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- a) Establecer una correlación entre la variación de las velocidades de onda sísmicas ( $V_p$ ,  $V_s$ ) y la densidad húmeda del suelo, a diferentes grados de compactación del suelo.
- b) Establecer correlaciones entre la variación de las velocidades de ondas sísmicas ( $V_p$ ,  $V_s$ ) y el porcentaje de humedad, considerando el grado de compactación del suelo.
- c) Establecer una correlación entre las velocidades de ondas primarias y el porcentaje de humedad, considerando el grado de compactación del suelo.
- d) Establecer una correlación entre las velocidades de ondas secundarias y el porcentaje de humedad, considerando el grado de compactación del suelo.
- e) Analizar el comportamiento de las velocidades de onda sísmica con respecto a la humedad óptima y a la densidad máxima seca del suelo.

## **1.5. Alcance**

La relevancia que este proyecto yace en ensayar, probar, experimentar y concluir acerca de un material de características determinadas como lo es un suelo areno – limoso, el comportamiento de las velocidades de propagación de ondas P y S bajo condiciones de compactación y humedad controladas en el suelo. Para ello, en primera instancia se realizó sondeos usando un molde prototipo de madera de 30 cm de largo, 30 cm de alto y 6 cm de ancho mediante equipo ultrasónico; lamentablemente el equipo no registro los resultados. Luego, se optó por cambiar las dimensiones del molde a 30 cm de largo, 30 cm de ancho y 32 cm de alto, así como el instrumento de medición



a equipo sísmico. Fue necesaria también, la construcción de una tapa recia de 30 cm de largo y 30 cm de ancho que ingrese en la caja y sobre la cual se realizaran los impactos de compactación al suelo para que la energía del golpe sea uniforme.

Un factor importante en este proyecto es el grado de compactación del suelo, por lo que se optó realizar ensayos con 4 grados de compactación diferentes. Con ayuda del martillo proctor modificado se efectuó la compactación para conservar la energía de impacto en cada golpe, estos grados de compactación fueron: 0, 9, 18, y 36 golpes por capa.

Puesto que el material debe variar en humedad, se desarrollaron las pruebas con 5 porcentajes de humedades diferentes, siendo nuestro punto de referencia la humedad optima hallada en el ensayo proctor modificado. Estas humedades fueron: 6.10 %, 10.63 %, 16.05 %, 21.20 % y 27,96 %.

El equipo sísmico utilizado en este trabajo para el registro de los tiempos de propagación de las ondas pertenece a la marca PASI modelo 16SG24-N (sismógrafo y tomógrafo eléctrico); consta de 1 cable sísmico de 12 canales, 4 geófonos verticales de 10 Hz, 1 geófono starter y 1 cable para geófono estárter.

Finalmente se obtuvo las correlaciones entre la variabilidad de las velocidades de ondas sísmicas frente al cambio de humedad y grado de compactación del suelo.

Las correlaciones aquí obtenidas permitirán determinar, la humedad y la densidad humedad de un suelo areno limoso, teniendo en conocimiento valores de velocidades de ondas P y S; sin omitir el grado de confiabilidad de las estimaciones aquí presentadas, bajo el criterio del coeficiente de determinación de la regresión utilizada para el hecho. De igual manera, permitirá conocer el comportamiento de  $V_p$  y  $V_s$  en un suelo areno limoso en torno a la variación de humedad y densidad humedad del suelo.

Con lo mencionado en este apartado, se entrega al lector una idea de la magnitud de lo realizado en este trabajo, dejando abierta la posibilidad de nuevas experimentaciones con diferentes tipos de suelo y con un mayor número de observaciones, tomando en cuenta sobre todo el porcentaje del límite líquido del material con el que se trata, debido a que el estado físico del suelo cambia drásticamente.



### 1.6. Limitaciones

- Por razones de tiempo y recursos no se lograron realizar pruebas dinámicas con humedades en el suelo mayores al límite líquido, por lo que no es posible realizar un análisis de la variabilidad de velocidades de ondas P y S considerando el contenido de humedad por sobre este valor.
- Desafortunadamente, la falta de tiempo y la disponibilidad de los equipos no permitieron efectuar ensayos de campo en el lugar de extracción de la muestra de suelo, por lo que no es posible entregar una comparación de las pruebas de laboratorio efectuados en este trabajo con la realidad.
- La escala de ensayo es una limitación sustancial ya que, en cuanto a longitudes de ensayo se refiere, el equipo sísmico usado está diseñado para extensas evaluaciones en comparación a los ensayos realizados en este trabajo.

## 2. ÁREA Y GEOLOGÍA DE ESTUDIO

En el siguiente capítulo se da a conocer la zona de la cual se obtuvo la muestra de suelo para su posterior análisis; así también se presentan las características geológicas y litológicas de esta área como parte de un estudio geológico previo del material con el que se elaboró este trabajo.

### 2.1. Área de estudio

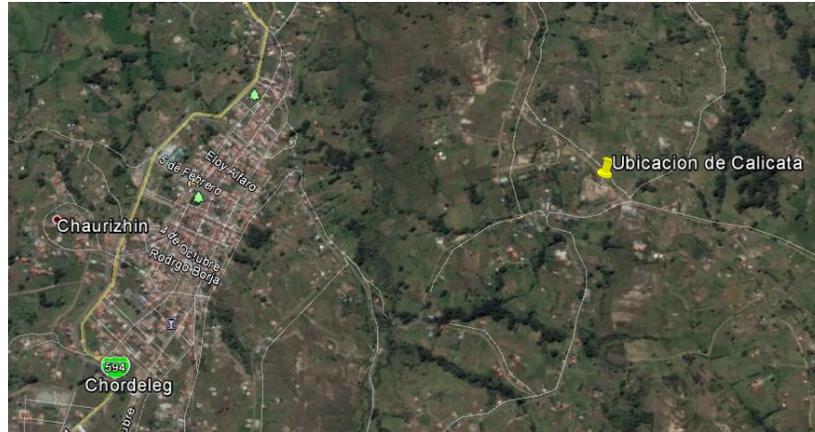
El área de estudio se sitúa en el sector conocido como La Unión perteneciente al Cantón Chordeleg, provincia del Azuay; al sur del Ecuador. El cantón se encuentra dentro de la cuenca del río Paute y sus límites son: al norte con el cantón Gualaceo; al sur con el río Burroplaya; al este el cantón Gualaceo y la Provincia de Morona Santiago; y, al oeste, con el cantón Sigsig y el cantón Gualaceo (figuras 2.1 y 2.2). La ubicación precisa del lugar donde se realizó la extracción del suelo tiene por coordenadas 17S 748639.00 E; 9676570.13 N; 2599.60 m.s.n.m. (figura 2.3).



*Figura 2.1.* Provincia del Azuay.



*Figura 2.2.* Cantón Chordeleg de la provincia del Azuay.



*Figura 2.3.* Ubicación del punto de extracción del suelo analizado (Sector La Unión, Chordeleg).

## 2.2. Geología regional

De las hojas geológicas Gualaceo y Azogues y como se observa en la figura 2.4, la geología regional del punto de extracción del material se compone de las siguientes formaciones:

### 2.2.1. Depósitos Aluviales (Da)

Son depósitos cuaternarios compuestos generalmente de arcillas, limos y arenas transportados y sedimentados por un flujo o aluvión.

### 2.2.2. Depósitos Coluviales (Dc)

Son depósitos que se componen primordialmente de gravas, arenas y en menor proporción por limos; son el resultado de materiales removidos por efecto de la gravedad y que luego han sido depositados al pie de los relieves.

### 2.2.3. Metavolcánicos de San Francisco (JP)

Pertenecen a la serie Paute (Paleozoico o Mesozoico) y componen las rocas más antiguas descubiertas en la hoja Azogues. Constituyen esquistos verdes, filitas negras y metavolcánicas. De litología similar a los Esquistos el Pan de la misma serie.

### 2.2.4. Formación Tarqui (PT)

Formada por rocas piroclásticas ácidas y lavas. Así también, está constituida por granos finos de constitución andesítica sobre la cual nace una secuencia de tobas de composición dacítica y riolítica.

### 2.2.5. Rocas Metamórficas Indiferenciadas (Pzi)

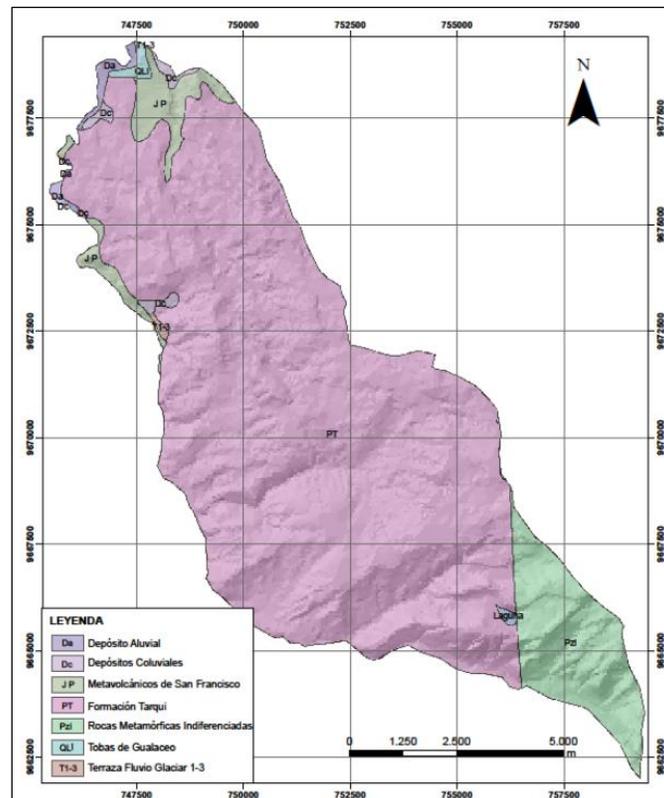
Son el producto de la transformación de rocas preexistentes que han sufrido cambios estructurales y mineralógicos bajo condiciones físicas, química, o ambas; como son la temperatura, presión y/o actividad química de fluidos agentes del metamorfismo. Estas modificaciones impuestas bajo la superficie transforman la roca original sin que abandone su estado sólido generando una roca metamórfica.

### 2.2.6. Tobas de Gualaceo (QL)

Son un conjunto de aglomerados en una matriz de vidrio blanco desvitrificado. Tobas blancas estratificadas e inestables de permeabilidad baja.

### 2.2.7. Terraza Fluvio Glaciar 1-3 (T1-3)

Compuesta por tres niveles de terrazas. Formada característicamente de rocas gruesas de origen fluvio-glaciares que provienen del este de la cordillera occidental.



*Figura 2.4.* Geología Regional del cantón Chordeleg (Secretaría de Gestión de Riesgos – SGR).

### 2.3. Geología local y litología

Para la extracción del material se realizó una calicata de 2.0 m. de profundidad aproximadamente (figura 2.5). Según las coordenadas de la calicata de extracción y el mapa geológico de la zona (figura 2.4), el lugar se encuentra en la formación Tarqui. Junto al sitio existe un talud de 2.5 metros de altura aproximadamente y cubierto de una robusta capa vegetal (figura 2.6). El talud se compone de areniscas angulares poco consolidadas color gris y de tamaños muy variables, moderadamente meteorizadas por el ambiente. El talud presenta una matriz limo arenosa color gris y grano redondeado; contiene un material cementante carbonatico que brinda cierta cohesión a los sedimentos. El talud presenta la formación de pequeñas cárcavas producto de la erosión del agua.



*Figura 2.5.* Calicata realizada para la obtención de la muestra de suelo.



*Figura 2.6.* Geología local del punto de extracción del suelo.

Una vez obtenida la muestra de suelo, fue necesario la realización de ensayos de laboratorio con el propósito de asegurar que el suelo estudiado es de características mecánicas del tipo arenolimoso (SM) según el criterio del sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS). Para ello la experiencia dentro del área de estudio de suelos de la empresa TitaniumRoad Cia. Ltda. fue de gran ayuda, ya que a través de su conocimiento se pudo delimitar un área dentro del austro ecuatoriano en donde se encuentran suelos de tales propiedades.



### **3. MARCO TEORICO**

En el presente capítulo se describen conceptos teóricos que apoyaran al desarrollo de este trabajo, así también respaldar desde el punto de vista científico cada una de las afirmaciones aquí presentadas.

#### **3.1. El Suelo y sus propiedades**

‘El suelo es una delgada capa sobre la corteza terrestre de material que proviene de la desintegración y/o alteración física y/o química de las rocas y de los residuos de las actividades de los seres vivos que sobre ella se asientan’ (Crespo, 2004, p.18).

El suelo se usa como material de construcción en diversos proyectos de ingeniería civil y sirve para soportar las cimentaciones estructurales. Por esto, los ingenieros deben estudiar las propiedades del suelo, tales como origen, distribución granulométrica, capacidad de carga y otras más (Das, 2001).

##### **3.1.1. Propiedades del Suelo importantes en Ingeniería**

El suelo es una mezcla de materiales sólidos, líquidos y gaseosos. La composición en la que se encuentran estos elementos define sus propiedades físicas y determinan el comportamiento de este.

###### **3.1.1.1. Humedad natural del suelo**

Se define como la relación en porcentaje entre el peso del agua contenida en una masa de suelo y el peso de las partículas sólidas. Es una propiedad importante, ya que a través de ella se puede explicar cualidades del suelo como: cambios de volumen, adhesión, estabilidad mecánica, entre otros.

###### **3.1.1.2. Consistencia del Suelo**

Se refiere a la máxima resistencia del suelo a esfuerzos de deformación o ruptura que se pueden aplicar sobre él. Dependiendo del contenido de humedad del suelo la consistencia puede ser muy dura, dura y suave. Dentro del área de la construcción se requiere un análisis completo sobre este tema.

###### **3.1.1.3. Densidad del Suelo**

Se consideran dos tipos de densidades:



- Densidad aparente ( $d_a$ ): es la masa contenida en una unidad de volumen de una muestra de suelo incluyendo el volumen ocupado por los poros.
- Densidad real ( $d_r$ ): es la densidad de las partículas sólidas del suelo.

#### **3.1.1.4. Fricción Interna del Suelo**

Describe la resistencia a la fuerza cortante dentro del comportamiento elástico del suelo.

#### **3.1.1.5. Porosidad del Suelo**

Es la relación (en porcentaje) que existe entre el volumen total de huecos o vacíos y el volumen total del suelo. Depende del tipo de suelo, ya que suelos de textura fina tienen mayor porosidad que los suelos de textura gruesa.

Los suelos arcillosos por ejemplo tienen un alto contenido de microporos, mientras que los arenosos o gravosos tienen un bajo contenido de macroporos entre sí.

#### **3.1.1.6. Índice de Poros**

Es la relación entre el volumen total de huecos y el volumen total de las partículas sólidas.

#### **3.1.1.7. Permeabilidad del Suelo**

Es la capacidad que tiene cierto suelo para permitir el flujo de un líquido a través de sus vacíos. Esta propiedad depende del tamaño de las partículas y de la distribución de los poros que conforman el suelo.

#### **3.1.1.8. Compresibilidad del Suelo**

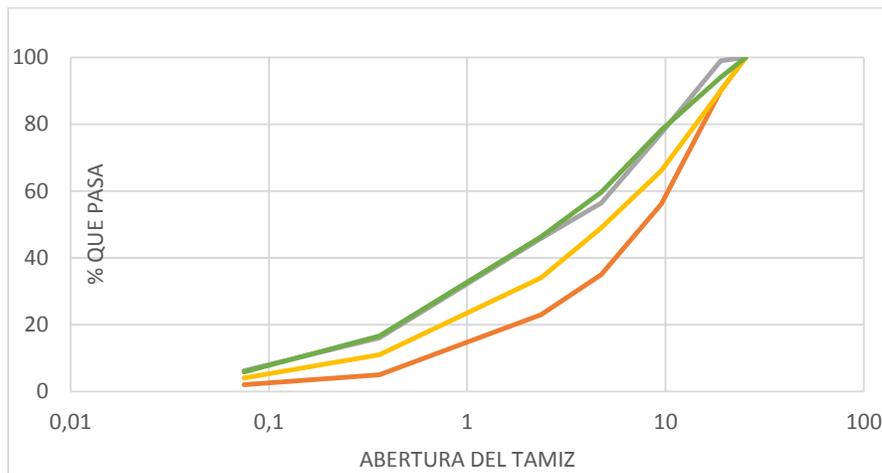
Es la propiedad que tiene un suelo para disminuir su volumen bajo efectos de carga. En suelos de grano grueso esta característica es mínima y aumenta a medida que crece el porcentaje de partículas pequeñas, teniendo los suelos de grano fino valores máximos.

### **3.2. Análisis mecánico del Suelo**

El análisis mecánico es la determinación del rango del tamaño de partículas presentes en un suelo, expresado como un porcentaje del peso seco total. Se usan generalmente dos métodos para encontrar la distribución del tamaño de las partículas del suelo: 1) análisis con cribado, para tamaños de partículas mayores de 0.075 mm de diámetro, y 2) análisis hidrométrico, para tamaños de partículas menores de 0.075 mm de diámetro. (Das, 2001, p.7).

### 3.2.1. Análisis por Cribado (Tamizado)

El tamizado consiste fundamentalmente en disponer una serie de tamices normalizados, uno sobre otro y de mayor a menor abertura de malla, y tamizar o cribar una determinada cantidad de suelo, del que se ha consignado su peso inicial, por ejemplo 1 kilogramo; tras someter al conjunto a vibrado, ya sea manual o mecánico, se pesa la cantidad de suelo retenido en cada uno de los tamices, y con esos datos se calculan por diferencia del peso total con el retenido, los porcentajes que pasan por cada uno de los tamices, o sea el tanto por ciento de suelo con partículas menores que la abertura del tamiz considerado. Con esos resultados se pueden graficar curvas granulométricas como la mostrada en la Figura 3.1, donde se dispone en el eje de abscisas el tamaño en mm de las partículas y/o el N° del tamiz (en escala logarítmica); y en el eje de ordenadas el porcentaje del peso de suelo que pasa (González, 2001, p.18).

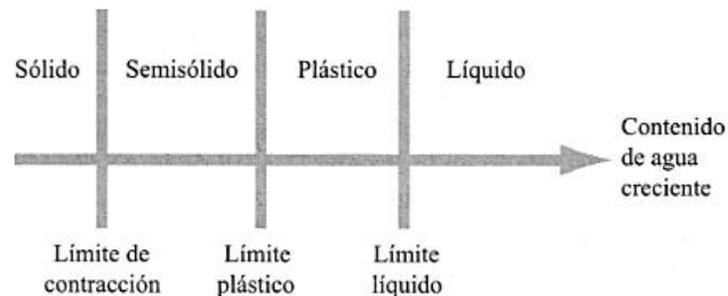


*Figura 3.1.* Ejemplos de curvas granulométricas.

### 3.2.2. Consistencia del Suelo

Es una de las propiedades más notorias y difíciles de cuantificar en el suelo. La consistencia se refiere al comportamiento de este ante fuerzas o perturbaciones externas que tienden a deformarlo. Las características de la deformación están sujetas a: 1) el tipo de suelo; 2) porcentaje de humedad; 3) la fuerza aplicada; 4) las condiciones físicas y 5) la forma en que se aplican las fuerzas. El principal factor que influye en la consistencia de un suelo es el porcentaje de humedad o contenido de agua, puesto que la mayoría de los suelos son suaves y cohesivos cuando se saturan, siendo fácilmente deformables; pero cuando se encuentra seco puede ser altamente resistente a deformaciones y a fuerzas aplicadas (Warren, 1985).

Entonces, dependiendo del contenido de agua el comportamiento del suelo presenta cuatro estados denominados: sólido, semisólido, plástico y líquido (Figura 3.2). El porcentaje de humedad en el que el suelo pasa de estado sólido a semisólido se define como límite de contracción (SL). El contenido de agua en el punto de transición de estado semisólido a estado plástico es el límite plástico (LP); mientras que el límite líquido (LL) delimita el estado plástico y el estado líquido. A estos puntos se les conoce también como límites de Atterberg (Das, 2001).



*Figura 3.2.* Límites de Atterberg (Das, 2001).

- **Límite Líquido (LL):** De acuerdo con lo estipulado en el párrafo anterior, los suelos plásticos tienen en el límite líquido una resistencia muy pequeña al esfuerzo cortante, pero definida, y según Atterberg es de  $25 \text{ g/cm}^2$ . Por otro lado, la cohesión es nula a partir del límite líquido (Crespo, 2004, p.70).

Casagrande (1932) concluyó que en un dispositivo estándar (cuchara de Casagrande) para límite líquido cada golpe realizado por la máquina, se le retribuye una resistencia de aproximadamente  $1 \text{ g/cm}^2$  ( $0.1 \text{ kN/m}^2$ ). Por tanto, el límite líquido de un suelo de grano fino es de aproximadamente 25 golpes ( $2.5 \text{ kN/m}^2$ ).

- **Límite Plástico (LP):** Se define como el contenido de agua, en porcentaje, con el cual el suelo al ser enrollado en rollitos de 3.2 mm de diámetro, se desmorona. El límite plástico es el límite inferior de la etapa plástica del suelo. La prueba es simple y se lleva a cabo enrollando repetidamente a mano sobre una placa de vidrio una masa de suelo de forma elipsoidal como se ve en la figura 3.5. (Das, 2001, p.29).
- **Límite de Contracción (SL):** La masa del suelo se contrae conforme se pierde gradualmente el agua del suelo. Con una pérdida continua de agua, se alcanza una etapa de



equilibrio en la que más pérdida de agua conducirá a que no haya cambio de volumen. El contenido de agua, en porcentaje, bajo el cual el cambio de volumen de la masa del suelo cesa. Se define como el límite de contracción (Das,2001, p.29).

- **Índice de Plasticidad (IP):** Es la diferencia numérica entre los límites líquidos y plásticos, y determina el rango de humedades dentro del cual el suelo se encuentra en estado plástico tal como lo definen los ensayos (Crespo, 2004).

### 3.2.3. Carta de Plasticidad

Casagrande (como citó Das, 2001) estudió la relación entre el índice de plasticidad y el límite líquido de una gran variedad de suelos naturales y en base a los resultados obtenidos propuso una carta de plasticidad (Figura 3.3); donde la característica más importante es la una línea A empírica (Ecuación 3.1.). La línea formada por esta ecuación separa las arcillas inorgánicas de los limos inorgánicos. Por encima de la línea A se encuentran las arcillas inorgánicas; mientras que los limos inorgánicos se ubican por debajo de la línea. Tanto los limos inorgánicos como las arcillas orgánicas de compresibilidad media se encuentran en la misma región (debajo de la línea A y LL variando entre 30 y 50). Las arcillas orgánicas se ubican en la misma región que los limos inorgánicos de alta compresibilidad (debajo la línea A y LL mayor a 50).

La carta de plasticidad es la base para la clasificación de suelos finos dentro del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Das, 2001).

$$PI = 0.73(LL - 20)$$

*Ecuación 3.1.* Línea A dentro de la carta de plasticidad de Casagrande.

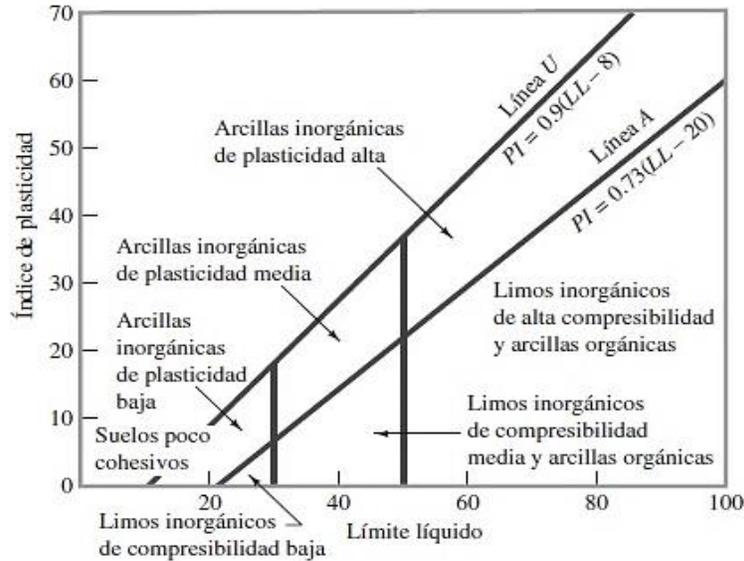


Figura 3.3. Carta de plasticidad de Casagrande (Das, 2001).

En la figura 3.3 se observa la línea U por encima de la línea A, la cual representa de forma aproximada el límite superior de la relación del límite líquido e índice de plasticidad para cualquier suelo encontrado hasta ahora. U se define por:

$$PI = 0.9(LL - 8)$$

Ecuación 3.2. Línea U dentro de la carta de plasticidad de Casagrande.

### 3.2.4. Clasificación del Suelo

Debido a la gran variedad de suelos en la naturaleza, la Mecánica de Suelos ha desarrollado sistemas de clasificación en donde cada uno tiene un amplio campo de aplicación, dependiendo del uso y necesidades que los haya fundamentado. Es así, que según el tamaño de las partículas que conforman el suelo se tiene: el sistema de clasificación de la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (AASHTO), la clasificación de la Administración de Aeronáutica Civil (CAA), el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), entre los más empleados. Hoy en día el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos es el más aceptado, puesto que es el mejor satisfaciendo las exigencias de la Mecánica de Suelos (Crespo, 2004).

### 3.2.5. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

(Das, 2001) El sistema unificado de clasificación de suelos separa los suelos en dos grupos:



- a. Suelos de grano grueso: son de cualidades tipo grava y arenosa, donde menos del 50% pasa por el tamiz N° 200. Los símbolos de grupo son: G para un suelo tipo grava o un suelo gravoso, y S para un suelo tipo arena o un suelo arenoso.
- b. Suelos de grano fino: son suelos en el cual el 50% o más pasan el tamiz N°200. Los símbolos de grupo son: M para un suelo del tipo limo inorgánico, C para un suelo del tipo arcilla inorgánica y O para suelos limos y arcillas orgánicas.

Además, pueden estar acompañados de otros símbolos:

- W: bien graduado.
- P: mal graduado.
- L: baja plasticidad (límite líquido menor que 50).
- H: alta plasticidad (límite líquido mayor que 50).

Para una correcta clasificación se debe conocer la siguiente información:

- Porcentaje de grava, es decir, la fracción que pasa la malla de 76.2 mm y es retenida en la malla No°4 (abertura de 4.75 mm).
- Porcentaje de arena, es decir, la fracción que pasa la malla N°4 (abertura de 4.75 mm) y es retenida en la malla N° 200 (abertura de 0.075 mm).
- Porcentaje de limo y arcilla, es decir, la fracción de finos que pasan la malla No°200 (abertura de 0.075 mm).
- Coeficiente de uniformidad (Cu) y coeficiente de curvatura (Cc).
- Límite líquido e índice de plasticidad de la porción de suelo que pasa la malla No°40.

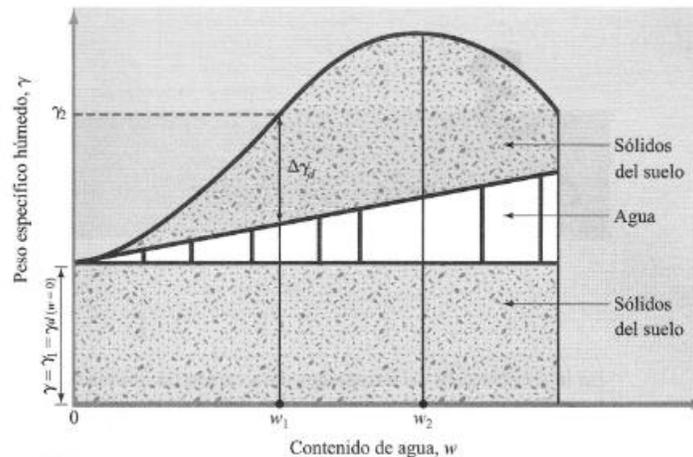
En base a estas cifras y por medio de la norma ASTM D2487 se obtiene la clasificación del suelo, definida por el nombre y símbolo de grupo correspondiente.

### 3.3. Compactación del Suelo

La compactación de suelos es un proceso mecánico realizado para reducir el índice de poros ( $e$ ) e incrementar el peso específico seco  $\gamma_d$ . Al igual que la consolidación, la compactación reduce el índice de poros, pero se diferencian, pues la consolidación es un proceso natural en función del tiempo. Por otra parte, en suelos con alto contenido de finos siempre se encuentra atrapado aire entre sus partículas, por lo cual no le logra la saturación, ni la expulsión de agua de los poros (Armas, 2002).

El grado de compactación de un suelo se mide en términos de su peso específico seco. Cuando se agrega agua al suelo durante la compactación, ésta actúa como un agente ablandador de las partículas del suelo, que hace que se deslicen entre sí y se muevan a una posición de empaque más denso (Das, 2001, p.51).

A medida que se incrementa el contenido de agua durante una misma energía de compactación, el peso de los sólidos de suelo contenidos en un volumen unitario crece paulatinamente (figura 3.4); de igual manera el peso específico seco aumenta hasta cierto punto de contenido de agua ( $w_2$  en la figura 3.4); a partir de allí, el aumento de agua reduce el peso específico seco del suelo, ya que el agua ocupa los espacios que podrían ser utilizados por las partículas sólidas. El porcentaje de humedad para el cual el peso específico seco es máximo se llama contenido de agua óptimo (Das, 2001).



**Figura 3.4.** Relación entre el contenido de humedad y el peso específico de un suelo, sometido a energía de compactación (Das, 2001).

El objetivo de la compactación de suelos es mejorar sustancialmente sus propiedades mecánicas, tales como: características de resistencia a la compresión y al corte, disminuir la cantidad de asentamientos, permeabilidad, flexibilidad, entre otras. Por otra parte, problemas relacionados con la expansión o hinchamiento de los suelos afectan este procedimiento, pues un exceso de compactación podría producir un suelo susceptible al agrietamiento (Das, 2001; Montejó, 2002).

### 3.3.1. Energía Específica de Compactación

Se entiende por energía específica de compactación la que se entrega al suelo por unidad de volumen, durante el proceso mecánico de que se trate (Rico y Castillo, 2005, p. 156).

Es posible determinar la energía de compactación en un ensayo de laboratorio, en el cual se compacta el suelo por golpes de un martillo o pistón. La energía está dada por la ecuación 3.3 como se muestra:

$$E_c = \frac{N * n * W * h}{V}$$

*Ecuación 3.3.* Línea U dentro de la carta de plasticidad de Casagrande.

Donde:  $E_c$  = Energía de Compactación.

$N$  = Número de golpes del pistón compactador por cada una de las capas en que se acomoda el suelo en el molde de compactación.

$n$  = Numero de capas que se dispone hasta llenar el molde.

$W$  = Peso del martillo proctor modificado.

$h$  = Altura de caída del pistón al aplicar los impactos del suelo.

$V$  = Volumen total del molde de compactación, igual al volumen total del suelo compactado.

Para un mismo suelo, a medida que aumenta la energía de compactación el peso específico seco máximo es mayor y la humedad óptima es menor. Conceptos de humedad óptima y densidad seca máxima están asociados por tanto a una energía de compactación determinada (Das, 2001; Armas, 2002).

### 3.3.2. Ensayo Proctor de Compactación

Proctor (1933) instauró un procedimiento de compactación, en la cual se aplica una determinada energía dinámica, para el estudio de la compactación económica. El objetivo de Proctor era compactar de manera económica por lo que el termino de humedad óptima tiene un significado netamente económico, puesto que es el contenido de agua con el que se obtiene el peso específico seco máximo a una misma energía de compactación (Armas, 2002).

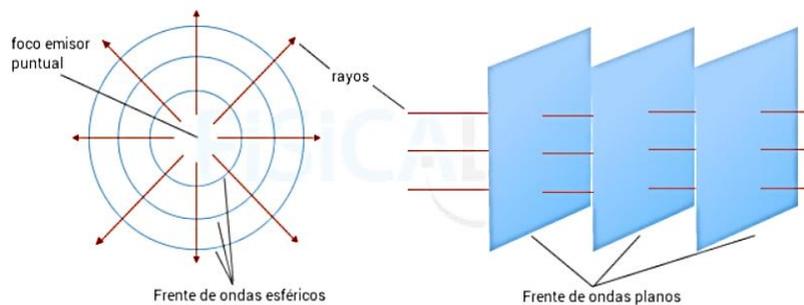
El ensayo Proctor determina la relación entre la humedad y el peso específico de un suelo, mediante la obtención de datos proyectables en el plano cartesiano (curva de compactación); permitiendo establecer un punto de control de calidad de un suelo sometido a cierta energía de compactación, dicho punto está dado por el máximo valor en la curva (González, 2001; Armas, 2002).

### 3.4. Principios y leyes que rigen el fenómeno de ondas

Las ondas son perturbaciones que se transmiten en un medio, ya sea material (ondas mecánicas) o en el vacío (ondas electromagnéticas y gravitacionales), implicando el transporte de energía sin el traslado de materia.

Rosales (como citó López, Mejía & Vega, 2008) menciona que la propagación de ondas de cualquiera naturaleza, ya sean mecánicas, electromagnéticas o gravitacionales; se puede interpretar mediante el concepto de “rayo”, mismo que se fundamenta en la ley de Snell y los principios de Huygens - Fresnel y Fermat. Este criterio es usado para analizar las trayectorias de ondas, como es el caso de la sísmica de refracción, que analiza los efectos de reflexión y refracción que sufren las ondas en las diferentes interfaces al propagarse en medios de propiedades variables como por ejemplo suelo y roca.

Así también, para explicar el movimiento de ondas es necesario el concepto de *frente de ondas*, que es el lugar geométrico que une los puntos que en un momento dado se encuentran en el mismo estado de vibración (figura 3.5).



**Figura 3.5.** Frente de ondas en el análisis de trayectoria de ondas.

#### 3.4.1. Ley de Snell

Snell (1621) desarrolló una fórmula para calcular el ángulo de refracción de una onda de luz que atraviesa una superficie que separa dos medios con distinto índice de refracción.

En la figura 3.6 se observa un haz de luz que choca con una superficie plana (interplano aire-agua), mismo que se refleja y se refracta. El rayo incidente está representado por una línea que es el haz incidente, paralela a la dirección de la propagación. Se supone que los frentes de onda del haz incidente que es una onda plana son normales al rayo incidente. Los haces reflejado y refractado

también se simbolizan por rayos. Los ángulos de incidencia ( $\theta_1$ ), de reflexión ( $\theta'_1$ ) y de refracción ( $\theta_2$ ) se valoran entre la perpendicular a la superficie y el rayo correspondiente.

El ángulo de refracción  $\theta_2$  depende de las propiedades de los dos medios y del ángulo de incidencia  $\theta_1$ .

A partir de la gráfica se tiene:

1. *Reflexión:*

$$\theta_1 = \theta'_1$$

**Ecuación 3.4.** Ángulo de incidencia y de reflexión de un haz de luz.

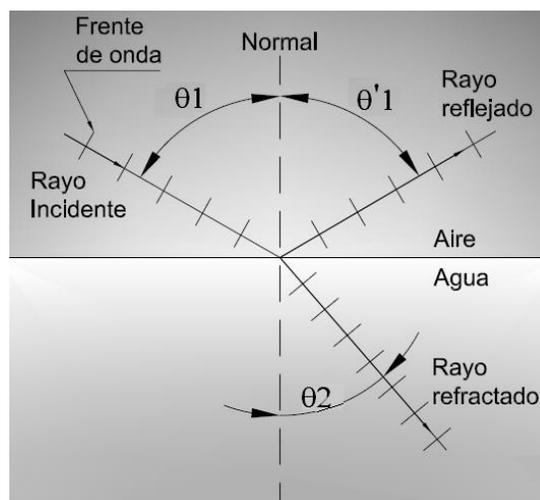
2. *Ley de Snell - Refracción:*

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2} = \frac{V_1}{V_2} = n_{21}$$

**Ecuación 3.5.** Ley de Snell.

3. *El plano constituido por el rayo incidente y la normal a la superficie, es el mismo para el rayo reflejado y refractado.*

Donde  $V_1$  es la velocidad de onda en el primer medio (aire) y  $V_2$  es la velocidad de onda en el segundo medio (agua).  $n_{21}$  es el índice de refracción del medio 2 con respecto al medio 1, el cual es variable dependiendo de la longitud de onda. La ley de Refracción llamada también ley de Snell, es primordial dentro del estudio de ondas sísmicas ya que su comportamiento está gobernado por esta ley (López et al.,2008).



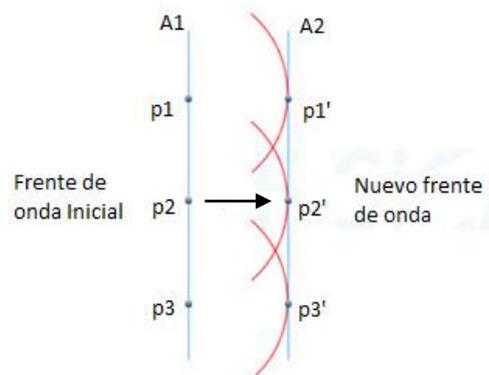
**Figura 3.6.** Reflexión y refracción en un interplano aire-agua (López et al., 2008).

### 3.4.2. Principio de Huygens - Fresnel

Huygens (como citó López et al., 2008) afirma: “Todo punto de un frente de onda inicial puede considerarse como una fuente de ondas esféricas secundarias que se extienden en todas las direcciones con la misma velocidad, frecuencia y longitud de onda que el frente de onda del que proceden”.

La formulación del principio de Huygens considerando una onda plana es:

- Cuando una onda llega al conjunto de puntos  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  como se ve en la figura 3.7. forman un frente de ondas en el plano  $A_1$ . Cada punto mencionado genera oscilaciones, dando paso a una nueva onda elemental individual.
- El conjunto de todas estas nuevas ondas elementales es un nuevo frente de ondas  $p_1'$ ,  $p_2'$ ,  $p_3'$  tangentes al plano  $A_2$  denominado envolvente de ondas elementales.



**Figura 3.7.** Principio de Huygens - Fresnel. Explica la propagación de una onda plana en el espacio y como avanza un frente de ondas; la flecha indica la dirección de propagación del rayo de luz.

Más tarde Fresnel (1826) completó el razonamiento realizando un análisis en tres dimensiones, afirmando que un frente de ondas elementales también se forma en sentido contrario y en la parte posterior del frente de ondas original, las cuales desaparecen debido a una interferencia mutua ya que las diferentes ondas elementales se destruyen entre sí (Roller y Blum, 1983).

### 3.4.3. Principio de Fermat

Fermat (1657) manifestó un principio relevante, que en la actualidad establece: “Un haz de luz que se desplaza de un punto a otro seguirá una trayectoria tal que, comparada con trayectorias posibles, el tiempo usado en recorrerla es estacionario, es decir mínimo, máximo o invariable” (Saavedra, 2013).

### 3.5. Ondas Sísmicas de Propagación

Las ondas sísmicas son un tipo de onda elástica de naturaleza mecánica, que se originan por la liberación de una cantidad de energía en un punto que se denomina fuente sísmica (hipocentro), generando deformaciones y esfuerzos temporales que se desplazan a través del suelo, mismo que actúa como medio elástico de propagación (Millones, 2005).

Según el tiempo de duración de la vibración de las ondas pueden ser: *a) Pulso*: transporta vibración por un corto periodo de tiempo; *b) Trenes de ondas*: transportan vibraciones por un periodo prolongado de tiempo.

#### 3.5.1. Elementos de una Onda

- Cresta (C): Es el máximo valor positivo de la amplitud.
- Valle (V): Es el máximo valor negativo de la amplitud.
- *Amplitud (A)*: Altura alcanzada por la onda medida sobre el nivel de referencia.
- *Período (T)*: Tiempo entre las repeticiones sucesivas de la onda, su unidad es el segundo.
- *Frecuencia (f)*: Número de onda por unidad de tiempo. Es el inverso del período. Su unidad es el Hz.
- *Longitud de onda ( $\lambda$ )*: Distancia entre sucesivas repeticiones de la onda. Se mide en metros.
- *Número de Onda  $K$  ( $1/\lambda$ )*: Número de onda por unidad de distancia. Su unidad es  $1/\text{metros}$ .
- *Fase ( $\theta$ )*: Desplazamiento en fracciones de ciclos, de un punto dado sobre la onda.
- *Velocidad (V)*: Número de ondas por unidad de tiempo que pasan por un mismo punto.  $V = \lambda * f$ .

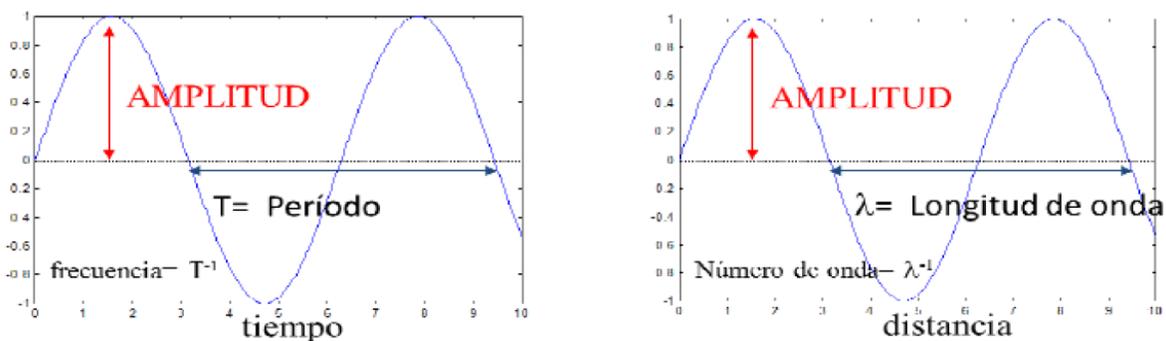


Figura 3.8. Elementos de una onda (Curso de Interpretación sísmica Campo Escuela Colorado, 2011).

### 3.5.2. Tipos de Ondas Sísmicas

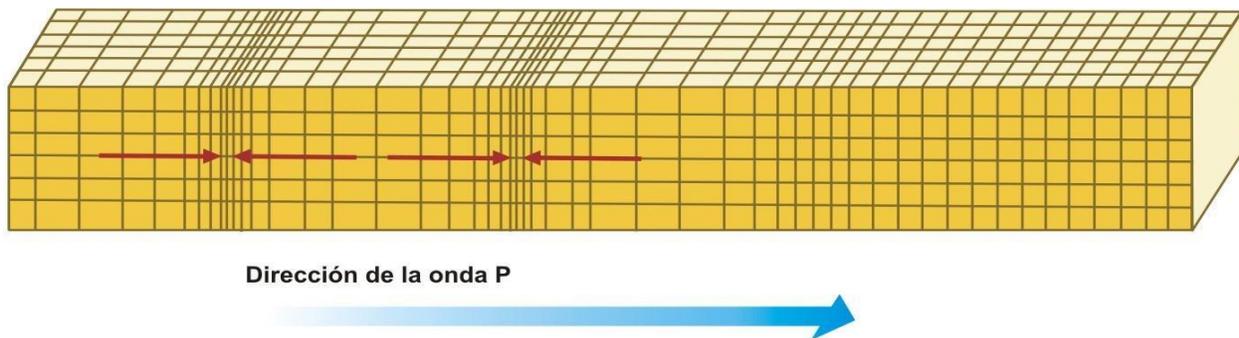
Las vibraciones del suelo producidas de forma natural o artificial producen dos tipos de ondas sísmicas: *ondas internas o de cuerpo* y *ondas superficiales*

#### 3.5.2.1. Ondas Sísmicas Internas

Son ondas que se propagan en el interior de la tierra, incluso adentrándose en grandes profundidades. Por la dirección y esfuerzos que producen estas ondas con relación al movimiento sísmico, se dividen en: 1). ondas primarias o de compresión y 2). ondas secundarias o de corte.

##### 3.5.2.1.1. Ondas Primarias o de Compresión (P)

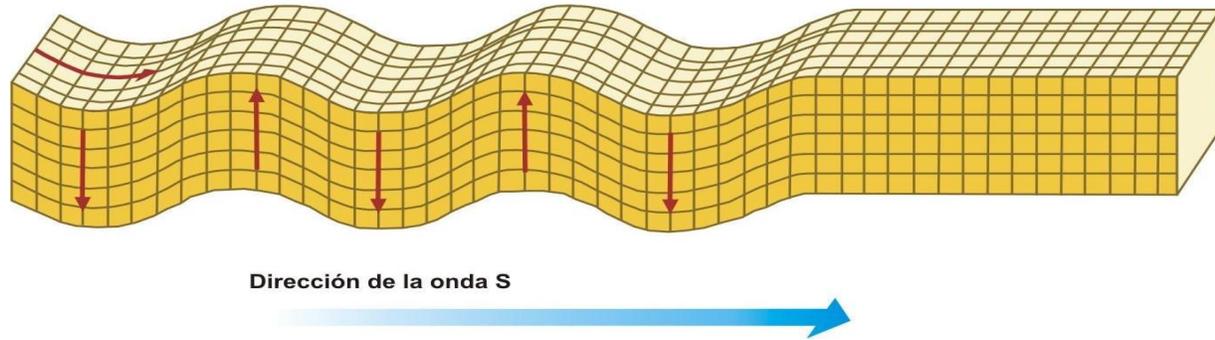
Son las ondas que se propagan con mayor velocidad en el suelo, por lo que son las primeras en ser registradas a cualquier distancia con respecto a la fuente sísmica. Estas ondas al propagarse originan en el suelo vibraciones en el mismo sentido del tren de ondas, generando compresión y dilatación a las partículas en su camino (figura 3.9). Puesto que, tanto sólidos, líquidos y gases se pueden comprimir, estas ondas se propagan en todo tipo de medio. Se las denomina también ondas longitudinales (López et al., 2008).



**Figura 3.9.** Ondas primarias (P) o de compresión.

##### 3.5.2.1.2. Ondas Secundarias o de Corte (S)

Son ondas que viajan en sentido perpendicular al tren de ondas. La velocidad de estas ondas es menor con respecto a las ondas P y pueden presentar mayor amplitud, por lo que transportan mayor energía generada por la vibración; debido a esto se suscita un mayor poder destructivo en cuanto a edificaciones se refiere. El sentido perpendicular de estas ondas causa esfuerzos de corte en el suelo (figura 3.10); y solo son capaces de transmitirse en materiales sólidos (López et al., 2008).



*Figura 3.10.* Ondas secundarias (S) o de corte.

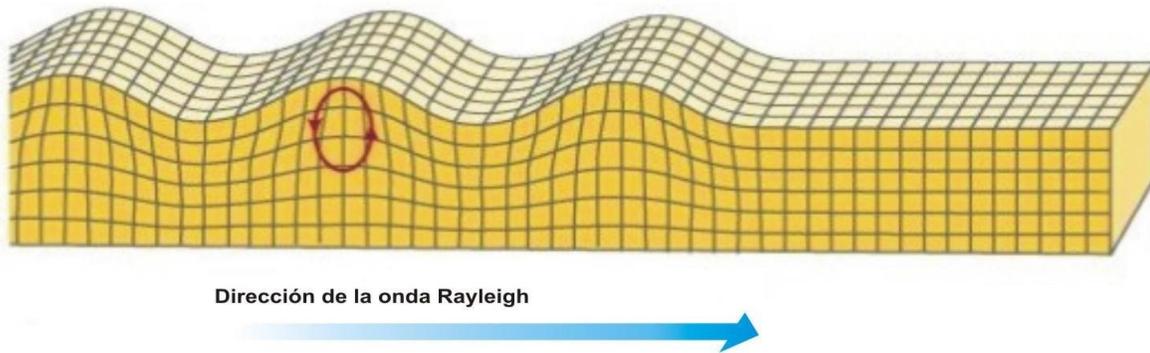
### 3.5.2.2. Ondas Sísmicas Superficiales

Son ondas que se propagan solamente en la superficie de la tierra. Presentan amplitudes muy largas en comparación con las ondas internas, pero esta característica disminuye exponencialmente a medida de la profundidad del suelo; de igual manera sus amplitudes decaen mientras mayor es la distancia a la fuente sísmica. Se propagan más lentamente que las ondas superficiales, generándose con menor eficiencia por fuentes sísmicas enterradas (Chammas, Abraham, Cote, Pedersen, & Semblat, 2003)

Estas ondas son el resultado de la energía que poseen las ondas internas que llegan a la superficie y se presentan de dos formas: ondas Rayleigh y ondas Love.

#### 3.5.2.2.1. Ondas Rayleigh (R)

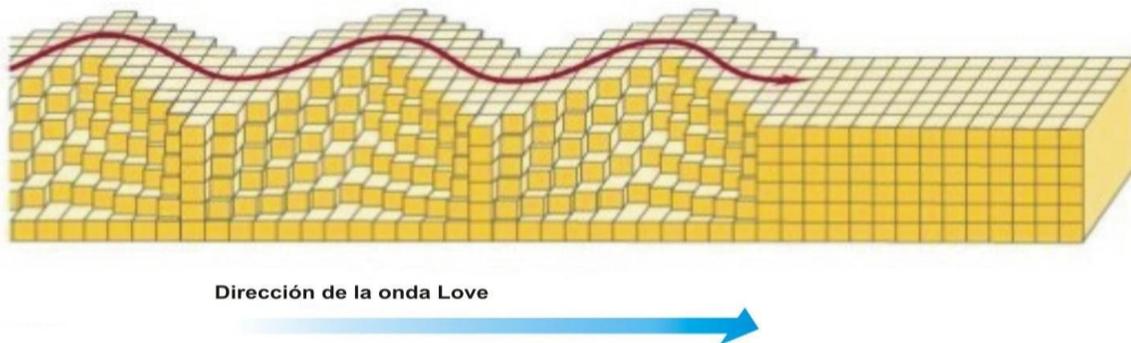
Son ondas que viajan por la superficie libre de la tierra con amplitudes que se degradan exponencialmente con la profundidad del suelo. Las partículas se mueven en sentido elíptico retrógrado (en sentido de las manecillas del reloj, figura 3.11) en un plano perpendicular a la superficie terrestre y se transmiten únicamente por medios sólidos, ya que producen esfuerzos de corte. Su velocidad de propagación se define como velocidad de fase  $C_r$  y es determinada principalmente por la velocidad  $V_s$  de los distintos tipos de suelos. La relación entre estas se expresa como  $C_r = 0.94 V_s$  (Lazcano, 2007).



*Figura 3.11.* Ondas Rayleigh (R).

### 3.5.2.2.2. Ondas Love (L)

Son ondas que se originan cuando un medio elástico es estratificado como el caso de nuestro planeta, que está formado por capas de distintas propiedades físicas y químicas. El movimiento de este tipo de ondas es perpendicular a la dirección de propagación del tren de ondas (como las ondas S) y paralelo a la superficie de la tierra como se muestra en la figura 3.12.



*Figura 3.12.* Ondas Love (R).

### 3.5.3. Factores que Afectan la Propagación de Ondas Sísmicas

Chelotti, et al. (2009) indican que cuando el medio en el que se propagan las ondas sísmicas no es homogéneo, se producen factores que afectan su movimiento como:

#### 3.5.3.1. Difracción

Es un fenómeno típico de las ondas y consiste en la distorsión de estas al atravesar un obstáculo como: fallas, cambios bruscos de buzamiento, terminaciones rocosas subhorizontales; que provocan posteriormente que las ondas se propaguen en todas las direcciones. Este efecto sucede ya que se limita el frente de ondas.



### 3.5.3.2. Dispersión

Es el efecto por el cual distintas longitudes de onda se refractan (cambio en la dirección y velocidad de una onda) con ángulos diferentes al atravesar medios materiales. En medios elásticos y homogéneos no se produce este fenómeno; sin embargo, en medios imperfectamente elásticos como la tierra podemos apreciar tal variación.

### 3.5.3.3. Desperdigamiento (Scattering)

Rosales (como se citó en López et al.,2008) afirma que scattering es la formación de ondas pequeñas que propagan la energía en todas las direcciones. Se origina al momento en que un frente de ondas colisiona con partículas libres u objetos pequeños en comparación con la longitud de ondas. Mientras mayor es la frecuencia de una onda, menor es este efecto.

### 3.5.3.4. Absorción inelástica

Hace referencia a la pérdida de energía de una onda producto de la fricción entre partículas de la roca y que se convierte en calor. Está en relación directa con la compactación y resulta:

$$A_i = A_0 e^{-q \cdot r}$$

*Ecuación 3.6.* Absorción inelástica en una onda sísmica.

Siendo  $A_0$  la amplitud,  $r$  la distancia recorrida y  $q$  el coeficiente de absorción.

### 3.5.3.5. Divergencia Esférica

Es la distribución de la energía inicial focal (teóricamente puntual) en una superficie cuasi-esférica cada vez mayor. Representa una disminución exponencial de la relación energía/área.

### 3.5.3.6. Conversión de modo de ondas

Describe el efecto que tiene una onda primaria que, al llegar a una interfaz con un ángulo de incidencia menor a 90 grados distribuye su energía, una parte es reflejada, otra es transmitida y otra parte se transforma en onda S.

Los tres factores: difracción, dispersión y scattering, junto con las pérdidas por absorción de energía causan una disminución en la fuerza de propagación de las ondas sísmicas, a esto se denomina *amortiguamiento*. Cuando la onda sísmica viaja a través de las diferentes capas, las altas frecuencias de las ondas son absorbidas más rápidamente que las bajas frecuencias.



### **3.5.4. Factores físicos del suelo que influyen en las velocidades sísmicas**

Villamizar (2011) indica diversos factores que influyen en la velocidad de propagación de las ondas sísmicas, estos son:

#### **3.5.4.1. Porosidad**

Este factor disminuye a mayor profundidad en el suelo, aumentando la densidad y las velocidades de propagación de las ondas.

#### **3.5.4.2. Litología**

Las velocidades de onda sísmicas difieren dependiendo del tipo de material que compone el suelo o roca.

#### **3.5.4.3. Cementación**

Se refiere al grado de cementación que posee las partículas en el suelo después de su depósito, generalmente por medios químicos. Este proceso tiene efectos en las velocidades de onda ya que los espacios de los poros son rellenados con minerales de mayor densidad que los fluidos, provocando un aumento en las velocidades de propagación de ondas.

#### **3.5.4.4. Presión**

La presión dentro del suelo también es un factor que influye en la alteración de las velocidades sísmicas. Por ejemplo, en una arenisca existen dos tipos de presiones:

##### **3.5.4.4.1. Presión de confinamiento**

Es la presión que ejerce la masa total de rocas que suprayace la arenisca.

##### **3.5.4.4.2. Presión de poro**

Es la presión que ejerce la estructura del poro y la masa del fluido contenida en ella. Esta presión se opone a la presión de confinamiento, de esta forma se evita un posible colapso.

La presión diferencial está dada por la diferencia de la presión de confinamiento y la presión de poro y es la que controla las propiedades sísmicas de las rocas. La figura 3.20 muestra la relación que existe entre las velocidades de onda P y la presión diferencial en una arenisca (similar para las ondas S). Se observa que la relación no es lineal. A bajas presiones mayor es la cantidad de espacios porosos y con ello las variaciones de velocidad de onda son significativas; mientras que

a altas presiones los espacios porosos en las areniscas son menores y como consecuencia las variaciones de velocidad son bajas.

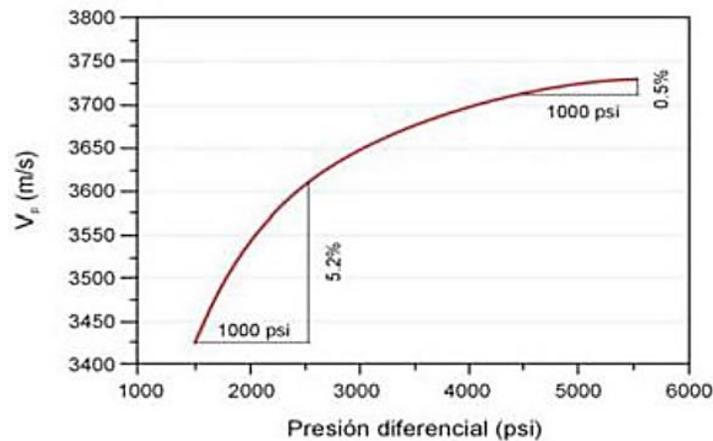


Figura 3.13. Presión diferencial vs velocidades de onda (Wang, 2001).

#### 3.5.4.5. Saturación de fluidos

Las velocidades de onda sísmicas se ven afectadas, ya que existe un aumento si aumenta la densidad del fluido intersticial

#### 3.5.4.6. Anisotropía

La anisotropía desde el punto de vista de velocidades de onda sísmica se refiere a la variación de velocidad en función a la dirección.

Cuando la dirección de la velocidad de propagación en una onda varía, esta deja de ser una unidad escalar y debe ser considerada como un vector que caracterice el cambio de valor en la dirección. Algunos mecanismos físicos dan lugar a un comportamiento anisotrópico (anisotropía intrínseca), estos son:

- *Anisotropía inducida litológicamente*: originada por la deposición de sedimentos.
- *Anisotropía cristalina*: se genera por grupos cristalinos distintos.
- *Anisotropía por esfuerzos inducidos*: ocasionada por microfracturas abiertas o cerradas debido a presiones de confinamiento.
- *Anisotropía inducida paleomagnéticamente*: en el proceso de sedimentación los minerales magnéticos se colocan en una dirección determinada, lo que da lugar a una anisotropía sísmica detectable.



### 3.6. Geofísica y Sísmica de refracción

La geofísica proviene del etimológico griego *naturaleza de la tierra*. Es la ciencia que se encarga del estudio de la Tierra desde el punto de vista físico, mediante métodos de carácter indirecto con el propósito de conocer su evolución y características actuales (geofísica pura) y como herramienta de prospección de recursos (geofísica aplicada). Para fines de estudio se apoya en mediciones usando campos físicos naturales como: gravedad, magnetismo, radioactividad, entre otras; o mediante campos artificiales como electricidad o energía sísmica (Chelotti, Acosta y Foster, 2009).

Tomando en cuenta los criterios más importantes dentro del estudio de la geofísica como ciencia directa se clasifica en las siguientes ramas:

- Geodesia y Gravimetría
- Sismología
- Geomagnetismo y Aeronomía
- Oceanografía física
- Meteorología
- Geodinámica
- Geoquímica y Volcanología
- Planetología
- Prospección Geofísica

#### 3.6.1. Prospección Geofísica

La prospección geofísica es un conjunto de métodos y procedimientos físicos y matemáticos aplicados al estudio y exploración del subsuelo; para la búsqueda y posterior análisis de recursos naturales como: petróleo, agua subterránea, minerales, carbón, entre otros; por medio de la experimentación de las propiedades físicas de los materiales en el interior de la tierra (Villamizar,2011).

Los métodos usados en prospección geofísica son:

- Método Gravimétrico.
- Método Magnetométrico
- Método Eléctrico
- Método Sísmico
- Método Radioactivo



- Método de Perfilajes en pozo

#### **3.6.1.1. Métodos Sísmicos**

Estos métodos registran y analizan las diferentes velocidades con las que se propagan las ondas sísmicas en los diferentes medios que conforman el terreno, con la ayuda de sensores de onda (geófonos) que captan las vibraciones de onda generadas natural o artificialmente (ya sea a través de explosiones o golpes) en un punto del área estudiada.

Dentro de los métodos sísmicos el más empleado es el de *sísmica de refracción* el cual, mide el tiempo de llegada de la primera onda detectada (onda P) en una serie puntos a intervalos regulares a lo largo de una línea de referencia en el terreno. Esta línea llamada línea de inspección contiene en cada punto sensores o geófonos los cuales receptan las señales de perturbación. Las ondas son generadas a partir de una fuente de energía ubicada de forma estratégica siendo del tipo explosiva o por impacto en o sobre el terreno. (López et al., 2008).

La longitud de la línea de inspección suele extenderse entre 20 y 200 m con separación entre geófono no más de 10 m.

Dentro de los alcances y limitaciones del método están:

- Para el caso de aplicaciones urbanas el método está limitado por la disponibilidad de zonas descubiertas con suficiente extensión. La profundidad de exploración depende principalmente de la longitud de tendido de la línea de inspección.
- Funciona cuando la velocidad de propagación de las ondas aumenta con la profundidad, para casos en que el suelo presenta capas intermedias de menor velocidad el método arroja resultados errados.

En la Ingeniería Civil las aplicaciones más importantes de esta técnica son: estudios hidrogeológicos, estudios geotécnicos, determinación de nivel freático, determinación del espesor de estratos de suelos, entre otros.

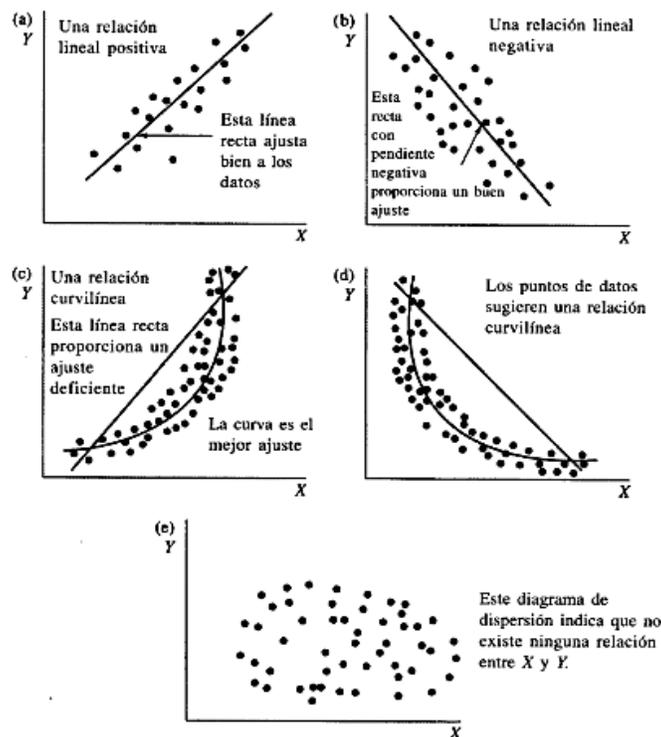
### **3.7. Análisis por Regresión**

Muchas de las investigaciones académicas pretenden buscar y establecer relaciones entre dos o más variables, con el objetivo de efectuar pronósticos que permitan tomar decisiones, en base a datos y cifras conocidas.

El método estadístico que se utiliza para este propósito se conoce como *análisis de regresión*; que, a más de permitir establecer la relación funcional o ecuación matemática entre las variables, proporciona la fuerza de esa relación (Cardona, González, Rivera & Cárdenas, 2013).

El análisis de regresión entre dos variables se define como regresión simple, mientras que el caso de un estudio entre más de dos variables se define como regresión múltiple. Se definen además dos tipos de variables: la variable dependiente que es la que se va a pronosticar, y la o las variables independientes que son utilizadas para predecir la variable dependiente.

Debido a que el conjunto de datos a ser analizados puede presentar distintos diagramas de dispersión (disposición de los datos con respecto al sistema de ejes), es necesario conceptualizar entre regresión lineal y regresión curvilínea. La regresión lineal es aquella en que los datos se ajustan por medio de una línea recta, es decir que a medida que la variable independiente cambia, la variable dependiente varía en una cantidad constante. La regresión curvilínea emplea una curva para expresar la relación entre variables; esto es que, a medida que la variable independiente cambia, la variable dependiente varía en una medida diferente. Si el conjunto de datos no expresa ningún patrón de análisis, no es posible establecer una relación entre variables. La figura 3.21 explica lo antes mencionado:





*Figura 3.14.* Diagramas de dispersión y su correspondiente ajuste por regresión (Webster ,2000).

### 3.7.1. Modelo de Regresión Lineal Simple

El modelo de regresión lineal simple se expresa en un sistema de ejes ( $x$ ,  $y$ ) por medio de una línea recta que busca ubicarse justo en medio de todos los puntos que conforman el diagrama de dispersión; donde la variable dependiente ( $y$ ) está condicionada por la variable independiente ( $x$ ), siendo:

$$y = a + bx$$

*Ecuación 3.7.* Ecuación de la recta como modelo de regresión lineal.

Donde  $a$  es la ordenada del modelo de regresión, ya que cruza el eje  $y$  en tal punto (intercepto); mientras que  $b$  es la pendiente de la recta que representa la razón de cambio entre las variables.

$$b = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

*Ecuación 3.8.* Razón de cambio en la ecuación de la recta como modelo de regresión lineal.

Los valores de  $a$  y  $b$  son constantes, puesto que, para cualquier recta dada, sus valores no cambian. La configuración entre variables puede ser determinística o estocástica. La relación determinística es aquella que expresa de forma exacta el vínculo existente entre las variables. La relación estocástica debido a la presencia de variación aleatoria (en la mayoría de los casos), presenta algún tipo de error al describir la relación entre las variables. Por tanto, dentro de este contexto el modelo de regresión lineal simple se puede expresar como:

$$y = B_0 + B_1x + \epsilon$$

*Ecuación 3.9.* Modelo de regresión lineal simple.

La expresión 3.9 representa de forma objetiva la relación por la cual se hace regresión de  $y$  sobre  $x$ . La porción  $B_0 + B_1x$  es la parte determinística de la relación, mientras que  $\epsilon$  es la variación aleatoria de la variable dependiente, y por tanto el error en la ecuación.

Debido a que los datos muestrales se disponen de forma aleatoria, el termino  $\epsilon$  contempla que no todas las cifras forman una línea recta exacta. El valor de  $y$  puede entonces solamente estimarse, pues si se conociera de manera precisa esta cifra, el valor de  $y$  sería exacto. Por lo antes mencionado se puede expresar el modelo de regresión lineal como:

$$y' = b_0 + b_1x$$



**Ecuación 3.10.** Modelo de regresión lineal simple estimado.

Donde  $y'$  es el valor estimado de  $y$ . Así también,  $b_0$  y  $b_1$  expresan el intercepto y la pendiente de la recta del modelo de regresión lineal estimado (Webster, 2000).

### 3.7.1.1. Mínimos Cuadrados Ordinarios y la Recta de Mejor Ajuste

El objetivo del análisis de un problema por regresión es encontrar la mejor relación entre los datos muestrales, para ello el procedimiento matemático para hallar esta correspondencia se denomina mínimos cuadrados ordinarios (MCO). Este método determina una recta que se ubica en medio de los datos muestrales, a una distancia tal que se aproxima a todos los puntos de datos más que cualquier otra recta.

La línea estimada de regresión lineal es la de mejor ajuste, ya que la diferencia entre los datos observados ( $y$ ) y los datos estimados ( $y'$ ) es mínima, siendo esta diferencia el error existente dentro del análisis.

$$(y - y') = error$$

**Ecuación 3.11.** Diferencia entre los datos observados y estimados en el método de MCO.

Ahora bien, el método de MCO considera la sumatoria de cada una de estas diferencias al cuadrado, donde el error tiende a cero; esto se debe a que las diferencias para cada punto pueden ser positivas o negativas, dependiendo de la disposición de los puntos de datos con respecto a la recta estimada de regresión lineal. Entonces el criterio de MCO asegurará que el error se minimice (ecuación 3.16).

$$\Sigma(y - y')^2 = \text{mínimo}$$

**Ecuación 3.12.** Error mínimo en el método de MCO.

Para definir la recta de mejor ajuste, el método de MCO determina la suma de cuadrados y productos cruzados de  $x$ ,  $y$ ,  $x_m$  y  $y_m$  ( $x_m$ : media de los valores de  $x$ ;  $y_m$ : media de los valores de  $y$ ) como se muestra:

$$SCx = \Sigma(x_i - x_m)^2$$

**Ecuación 3.13.** Suma de los valores de  $x$  al cuadrado.

$$SCy = \Sigma(y_i - y_m)^2$$

**Ecuación 3.14.** Suma de los valores de  $y$  al cuadrado.



$$SCxy = \Sigma(x_i - x_m)(y_i - y_m)$$

*Ecuación 3.15.* Suma de los valores de x multiplicado los valores de y.

Obtenidos estos valores, la recta de regresión lineal queda definida por la pendiente e intercepto por:

$$b_1 = \frac{SCxy}{SCx}$$

*Ecuación 3.16.* Pendiente de la recta de regresión.

$$b_0 = y_m - (b_1x_m)$$

*Ecuación 3.17.* Intercepto de la recta de regresión.

### 3.7.1.2. El Error Estándar de Estimación

Es un valor que estima el grado de distribución de los valores observados en torno a la recta de regresión. Manifiesta el comportamiento de estos valores de alejarse o acercarse a los valores reales de y en el modelo de regresión con propósito predictivo.

La ecuación 3.18. determina el error estándar de estimación, en donde el numerador representa la diferencia entre los valores reales y los valores estimados de y.

$$S_e = \sqrt{\frac{\Sigma(y - y')^2}{n - 2}}$$

*Ecuación 3.18.* Error estándar de estimación en el modelo de regresión lineal simple.

### 3.7.1.3. Análisis de la relación y el Coeficiente de Correlación

Una idea objetiva de la fuerza de relación entre los datos estudiados se lo obtiene a través del coeficiente de correlación o coeficiente de correlación producto – momento de Pearson (R), el cual puede tomar valores comprendidos entre -1 y +1.

Cuando el valor de R es -1 la relación es negativa perfecta entre x y y, figura 3.15 (a). Si el valor de R es +1 la relación es positiva perfecta entre x y y, figura 3.15 (b). Se ha dicho antes que relación entre variables por lo general es variable con respecto a la recta de regresión, por lo que la correspondencia entre variables puede ser fuerte pero menos perfecta, figura 3.15 (c) y figura 3.15 (d); así como puede ser muy poca o nula la relación entre variables, figura 3.15 (e). Mientras mayor sea el valor de R en términos absolutos, más fuerte es la correlación entre las variables x y y.

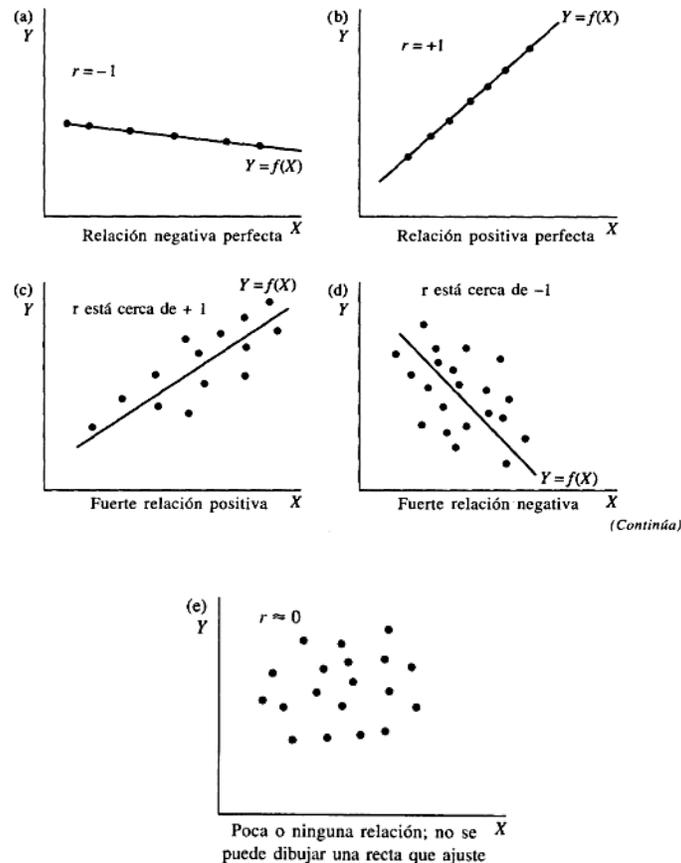


Figura 3.15. Análisis de correlación entre variables (Webster ,2000).

Para determinar el coeficiente de correlación y el coeficiente de determinación, se deben analizar tres valores de desviación:

- La desviación total: es la cantidad determinada por la variación del valor medido de  $y$  con respecto a la media  $y_m$ . La adición de todos estos valores al cuadrado entrega la *suma de cuadrados tota* (SCT).

$$SCT = \sum (y_i - y_m)^2$$

Ecuación 3.19. Suma de cuadrados total.

- La desviación explicada: representa la diferencia entre lo que determina el modelo de regresión  $y'$  y la media  $y_m$ . La adición de todos estos valores al cuadrado entrega la *suma de cuadrados de la regresión* (SCR).

$$SCR = \sum (y' - y_m)^2$$

Ecuación 3.20. Suma de cuadrados de la regresión.

- La desviación no explicada: es el error producto de la diferencia entre el valor medido de  $y$  y el valor estimado  $y'$ . La adición de todos estos valores al cuadrado entrega la *suma al cuadrado del error* (SCE).



$$SCE = \Sigma(y_i - y')^2$$

*Ecuación 3.21.* Suma del cuadrado del error.

El coeficiente de correlación relaciona la desviación explicada y el valor total de desviación alrededor de  $y'$ .

$$R = \sqrt{\frac{\text{Variación explicada}}{\text{Variación total}}} = \sqrt{\frac{SCR}{SCT}}$$

*Ecuación 3.22.* Coeficiente de correlación.

Otra manera de calcular el coeficiente de correlación es:

$$R = \frac{SCxy}{\sqrt{(SCx)(SCy)}}$$

*Ecuación 3.23.* Coeficiente de correlación.

Donde el coeficiente de determinación es  $R^2$ , el cual brinda una idea clara de la bondad de ajuste del modelo de regresión con respecto a los datos analizados.

#### **3.7.1.4. Limitaciones del Análisis de Regresión**

Si bien es cierto, al ser el modelo de regresión es una técnica confiable en la toma de decisiones dentro del campo de la ingeniería, temas económicos y hasta de negocios, éste no define relaciones de causa – efecto; es decir que la relación no implica casualidad.

Así también, se debe tener mayor atención y cuidado de no pronosticar los valores de  $y$  utilizando valores de  $x$  que se encuentren fuera del rango de análisis, ya que dichos datos no forman parte de la regresión y se desconoce el tipo de relación que forman fuera de esta condición.

No obstante; otra falla común dentro de este entorno es encontrar algún tipo de correlación entre variables que por lógica no guardan ningún tipo de relación; por tanto, se debe tener especial cuidado al momento de tratar y examinar las variables de la regresión (Webster, 2000).

#### **3.7.2. Modelo de Regresión Lineal Múltiple**

El modelo de regresión lineal múltiple a diferencia del modelo de regresión lineal simple integra dos o más variables independientes para obtener una correlación entre variables y poder predecir el valor de la variable dependiente. El modelo de regresión lineal múltiple con  $n$  variables se expresa como:



$$y = B_0 + B_1x_1 + B_2x_2 + \dots + B_nx_n + \epsilon$$

**Ecuación 3.24.** Modelo de regresión lineal múltiple.

Donde los términos  $B_n$  son los coeficientes de la regresión y  $\epsilon$  es el error por variación aleatoria de la variable dependiente.

Al igual que en la regresión lineal simple se estima el valor de  $y$ , teniéndose:

$$y' = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n$$

**Ecuación 3.25.** Modelo de regresión lineal múltiple estimado.

En donde  $y'$  es el valor estimado de la regresión y  $b_n$  representa los coeficientes estimados de ajuste, es decir  $b_n$  es la cantidad por la cual  $y'$  cambiará si  $x_n$  varía en una unidad, manteniendo constantes las otras variables independientes.

Dentro de la regresión lineal múltiple, es necesario que se cumplan dos requisitos:

- El número de datos u observaciones  $n$  debe ser mayor al número de variables independientes en mínimo 2 unidades. En el modelo de regresión lineal múltiple hay  $n + 1$  coeficientes por estimar para las variables independientes, por lo que los grados de libertad relacionados al modelo son  $g. l. = n - (k + 1)$ .
- La relación entre las variables independientes no debe ser linealmente relacionada; ya que se genera un problema de multicolinealidad, en donde los signos algebraicos de los coeficientes pueden llegar a ser opuestos, generándose un incremento en el error estándar de los coeficientes.

### 3.7.2.1. El Error Estándar de Estimación

De la misma forma que en la regresión lineal simple, el error estándar de estimación es un valor que estima el grado de dispersión de los valores observados con respecto al modelo de regresión (plano de regresión). Si la dispersión entre los valores es poca, el error estándar de estimación es menor y por lo tanto el modelo de regresión es más conciso en el pronóstico.

El error estándar de estimación dentro del modelo de regresión lineal múltiple se manifiesta:

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum(y - y')^2}{n - k - 1}}$$

**Ecuación 3.26.** Error estándar de estimación en el modelo de regresión lineal múltiple.



Donde  $n$  es el número de datos u observaciones y  $k$  representa el número de variables independientes. El numerador de la ecuación es la diferencia entre los valores reales y estimados de  $y$ .

### 3.7.2.2. Coeficiente de Determinación Múltiple

Este coeficiente da a conocer la fuerza con la que se relaciona  $y$  y las variables independientes dentro del modelo de regresión lineal múltiple. Para ello, la relación de la variación expresada con la variación total, al igual que en la regresión lineal simple, entendiendo como variación el cambio de los valores observados de  $y$  y la media  $y_m$ , mide la porción total de cambio de  $y$  en base a las variables independientes.

La variación en  $y$  estaría expresada por la suma de los cuadrados de la regresión (SCR); mientras que la variación total en  $y$  se establecería por la suma total de cuadrados (SCT), como se ve:

$$R^2 = \frac{SCR}{SCT}$$

*Ecuación 3.27.* Coeficiente de determinación múltiple.

### 3.7.2.3. Coeficiente de Determinación Corregido

Debido a que  $R^2$  es una forma sencilla de evaluar que tan bien se ajusta un modelo de regresión a un conjunto de datos observados, es importante destacar y conocer que cualquier adición de una variable independiente (variable explicativa absurda) al modelo, da lugar a un incremento en el valor de  $R^2$ , pues la más mínima correlación casual introducida en el modelo (sea positiva o negativa), aumenta el valor de  $R^2$ . De ser el caso en que  $R^2$  aumente debido a variables explicativas absurdas, el fin predictivo del modelo de regresión se verá ampliamente afectado.

Es una práctica común en regresión múltiple reportar el coeficiente de determinación corregido  $R'^2$ , estadístico que se ajusta a la medida del poder explicativo para el número de grados de libertad. Debido a que el grado de libertad para SCE (suma al cuadrado del error como se vio en la ecuación 3.21) es  $n - k - 1$ , agregar otra variable explicativa termina en la pérdida de otro grado de libertad.  $R'^2$  decrecerá si se adiciona una variable que no ofrece suficiente poder explicativo como para justificar su pérdida en los grados de libertad. Si se reduce demasiado se debe considerar su retiro (Webster, 2000, p. 382).

El coeficiente de determinación corregido se presenta en la ecuación 3.28:



$$R'^2 = \frac{\frac{SCE}{(n - k - 1)}}{\frac{SCT}{(n - 1)}}$$

*Ecuación 3.28.* Coeficiente de determinación corregido.



## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se presenta de forma detallada el procedimiento seguido en cada uno de los ensayos realizados, así como los análisis numéricos efectuados para llegar a los objetivos planteados. Dentro de los ensayos mecánicos del suelo, las normas ASTM fueron el principal de apoyo a seguir.

En base a los objetivos planteados en el presente proyecto de titulación, se ha procedido a realizar ensayos de laboratorio tanto mecánicos como dinámicos sobre el suelo obtenido en la zona conocida como La Unión, en el cantón Chordeleg.

Los ensayos mecánicos indican: 1) que el suelo obtenido es de características limo arenosa mediante la clasificación de suelos por el método SUCS; 2) el porcentaje de humedad óptima y densidad máxima del suelo a través de la prueba proctor modificado, esto permitirá establecer un rango de variación de humedades en torno a la humedad óptima para posteriores ensayos; y 3) el porcentaje de humedad natural de suelo, siendo esta una cifra importante para establecer posteriormente los porcentajes de humedad que se le suministrará o extraerá al suelo durante los ensayos dinámicos.

Los ensayos dinámicos a su vez ayudaran a precisar y analizar las relaciones existentes entre las variaciones de las velocidades de onda sísmica, el porcentaje de humedad y el grado de compactación del suelo; todo esto a través del método de sísmica de refracción.

### 4.1. Procedimiento y Equipo utilizado

#### 4.1.1. Obtención de la muestra de suelo

- Para la obtención del suelo se realizó de forma manual una calicata de 2.00 metros de profundidad con un diámetro de 1.10 metros aproximadamente (figura 4.1). Se extrajo desde el fondo del agujero alrededor de 400 kilogramos de material e inmediatamente se cubrió con plástico la muestra con el fin de conservar la humedad natural del suelo. Se registró la coordenada del punto de extracción mediante GPS marca Garmin.



**Figura 4.1.** Obtención de la muestra de suelo en campo.

#### 4.1.2. Humedad Natural del suelo

El instrumental utilizado para realizar el ensayo es el siguiente:

- Horno de secado con circulación de aire y temperatura regulable capaz de mantenerse en  $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$ .
- Balanza con precisión de 0.01 gramos.
- Recipientes para especímenes.
- Guantes.

El procedimiento seguido en base a la norma ASTM D - 2216, es el siguiente:

- Se determina y se registra los pesos de los dos recipientes limpios y secos.
- Se coloca un trozo de suelo dentro de cada uno de los recipientes y se registra el peso del material húmedo y recipiente.
- A continuación, se secan las muestras en el horno a una temperatura de  $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$ .
- Después de que las muestras fueron secadas, se dejan enfriar en un lugar fresco hasta que alcancen la temperatura ambiente.
- Se pesa y se registran estos valores.

El contenido de humedad se determina mediante la ecuación 4.1.

$$w = \frac{M_{CWS} - M_{CS}}{M_{CS} - M_C} * 100$$

**Ecuación 4.1.** Contenido de humedad natural del suelo.

Donde:  $w$  = Contenido de humedad en porcentaje.  
 $M_{CWS}$  = Masas del recipiente y muestra húmeda.  
 $M_{CS}$  = Masa del recipiente y muestra seca.  
 $M_C$  = Masa del recipiente.

#### 4.1.3. Análisis del suelo por cribado (Granulometría).

La norma ASTM D - 422 describe el método que se utilizó para determinar los porcentajes de suelo que pasan a través de la serie de tamices utilizados.



El equipo utilizado para realizar el ensayo es el siguiente:

- Un juego de tamices normalizados.
- Balanza con capacidad de 2000 gr.
- Horno de secado con circulación de aire y temperatura regulable capaz de mantenerse en  $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$ .
- Un vibrador mecánico.
- Cronómetro.
- Bandejas metálicas.

El procedimiento seguido en base a la norma antes mencionada es el siguiente:

- Se homogeniza cuidadosamente la muestra de suelo tratando de evitar que sus partículas individuales se rompan. Se toma alrededor de 800 g. de material de la muestra totalmente seca (secado al ambiente o mediante horno) y se divide pasado el tamiz 3/8”.
- De la fracción de muestra que pasa el tamiz 3/8” se toma una muestra representativa de 500 g., la cual es lavada con el fin de eliminar el material fino menor a 0.074 mm.
- Una vez lavado el material se seca en horno para luego ser ensayado utilizando tamices comprendidos entre la malla N ° 4 y la N ° 200 de la norma ASTM. Para el análisis, se ha usado los tamices N ° 4, N ° 10, N ° 40, y N ° 200.

El porcentaje retenido en cada malla se determina mediante la ecuación 4.2.

$$\% RM = \frac{PRM}{500} * K$$

**Ecuación 4.2.** Porcentaje de material retenido en cada tamiz por granulometría.

Donde: PRM = Peso retenido en cada malla.

K = Porcentaje de muestra que paso el tamiz 3/8”

%RM = Porcentaje retenido en cada malla.

Los porcentajes retenidos acumulados es la suma progresiva de los porcentajes retenidos en las mallas y se determina con la ecuación 4.3.

$$\% RA = \% R_{ant} + \% R_{act}$$

**Ecuación 4.3.** Porcentaje acumulado de material por granulometría.

Donde: %RA = Porcentaje retenido acumulado.

%Rant = Porcentaje retenido en la malla anterior.

%Ract = Porcentaje retenido en la malla actual.

El porcentaje de material que pasa se obtiene al restar al 100% del material, el porcentaje retenido acumulado en cada malla.

$$\% MP = 100\% - \% RA$$

**Ecuación 4.4.** Porcentaje de material que pasa cada tamiz por granulometría.

Donde: %RA = Porcentaje retenido acumulado.

%MP = Porcentaje de material que pasa en tamiz analizado.



Finalmente se elabora la gráfica de la curva granulométrica, donde la ordenada será el porcentaje que pasa en peso en cada tamiz en escala natural y la abscisa el tamaño (diámetro equivalente) de las partículas en escala logarítmica.

#### 4.1.4. Límites de Atterberg

Para la clasificación de suelos por el método SUCS es necesario conocer los valores de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad; para ello en base a la norma ASTM D - 4318 se realizaron las siguientes pruebas:

##### 4.1.4.1. Límite Líquido (LL)

El equipo utilizado para realizar el ensayo es el siguiente:

- Aparato de límite líquido (cuchara de Casagrande) que consiste en una cuchara de bronce con una masa de  $200 \pm 20$  gr. montada sobre una base fija de madera.
- Acanalador (Casagrande o ASTM).
- Espátula.
- Plato de evaporación de porcelana de 120 mm de diámetro.
- Horno de secado con circulación de aire y temperatura regulable capaz de mantenerse en  $110^\circ \pm 5^\circ$  C.
- Balanza con precisión de 0.01 gr.
- Herramientas y accesorios. Placas de vidrio, agua destilada, recipientes herméticos, tamiz N° 40 (ASTM) y una probeta de 25 ml de capacidad.

El procedimiento de ensayo es el siguiente:

- Se obtiene una muestra igual o mayor a 100 g. que haya pasado el tamiz N°40 (ASTM). Se coloca a continuación la muestra en el plato de evaporación agregándole a su vez suficiente agua destilada hasta lograr una pasta homogénea con la espátula. Esto se hace el tiempo necesario hasta que la muestra logre una distribución de humedad adecuada.
- Se coloca entre 50 a 70 g. de material preparado previamente en la cuchara del aparato del límite líquido, para luego alisar con la espátula la superficie del material haciendo que en el centro la altura sea de 10 mm y la masa ocupe un volumen de  $16 \text{ cm}^3$  aproximadamente. Seguidamente se pasa el acanalador por el centro de la cuchara dividiendo a la pasta en dos partes separadas por un surco de 63 mm de longitud (figura 4.2).
- Una vez realizado el surco, se gira la manivela del aparato generando 2 golpes por cada segundo. Se contabilizan los golpes necesarios para que la manivela cierre el fondo del surco en 10 mm de longitud.
- Realizado el proceso anterior, finalmente se toman alrededor de 10 g de material del fondo de la cuchara y se obtiene su humedad. El material sobrante es utilizado para repetir el procedimiento 3 veces más mezclándolo con agua destilada, de modo que se obtiene cuatro puntos que varían en un rango de 15 a 35 golpes.



Figura 4.2. Ensayo de límite líquido.

El límite líquido se obtiene al realizar una gráfica semilogarítmica como la observada en la Figura 4.3. Los puntos obtenidos en el ensayo tienden a alinearse sobre una recta, la cual permite interpolar la ordenada de LL para la abscisa  $N=25$  golpes.

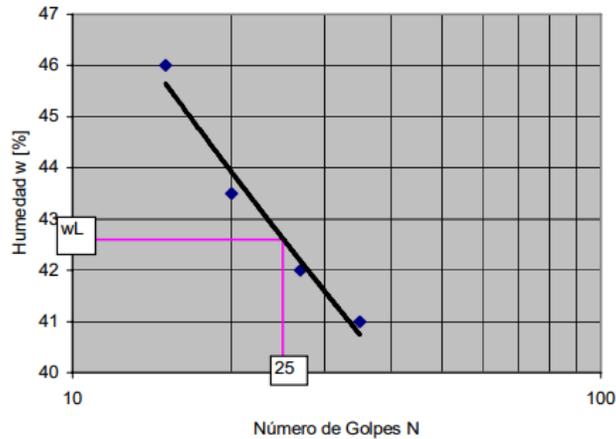


Figura 4.3. Determinación del límite líquido para  $N = 25$  golpes.

#### 4.1.4.2. Límite Plástico (LP)

El equipo que se utilizó para realizar el ensayo es el siguiente:

- Plato de evaporación de porcelana de 120 mm de diámetro.
- Espátula.
- Placa de vidrio esmerilado como superficie de amasado.
- Horno de secado con circulación de aire y temperatura regulable capaz de mantenerse en  $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$ .
- Patrón de comparación, en este caso se usó un alambre de 3 mm de diámetro.
- Balanza con precisión de 0.01 gr.
- Herramientas y accesorios: Malla N° 40 ASTM, agua destilada y recipientes.

El procedimiento de ensayo es el siguiente:



- La muestra para el ensayo se obtiene de forma idéntica a la descrita en el ensayo de límite líquido.
- Una vez que se obtuvo la masa de suelo con una distribución de humedad adecuada, se toma  $1 \text{ cm}^3$  aproximadamente de muestra y se amasa el material con las palmas de las manos de modo que se forme un cilindro de alrededor 3 mm (se compara con el alambre) de diámetro; se dobla y se amasa nuevamente para volver a formar el cilindro. Este procedimiento se repite hasta que el cilindro se disgregue al llegar al diámetro de 3mm. en trozos de tamaños de 1 cm. de largo y no pueda ser reconstruido.
- El contenido de humedad de la muestra en ese momento representa el límite plástico, mismo que se determina secando de los trozos de suelo en el horno.
- Este ensayo se realiza dos veces procurando que los datos obtenidos no difieran en más de 2%, caso contrario el proceso se repite.

El contenido de humedad para el límite plástico se determina de forma similar a la humedad natural del suelo descrita anteriormente. El límite plástico tiene por resultado el promedio de dos ensayos realizados.

#### 4.1.4.3. Índice de Plasticidad (IP)

Es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico como se ve en la ecuación 4.5.

$$IP = LL - LP$$

*Ecuación 4.5.* Índice de plasticidad.

#### 4.1.5. Clasificación del Suelo

Por medio del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) se realizó la clasificación de suelos. Para ello la norma ASTM D-2487 fue el documento base a seguir.

El procedimiento para establecer el nombre y símbolo de grupo del suelo es el siguiente:

- Se determina el porcentaje de suelo que pasa la malla No. 200 (F). Si  $F < 50\%$ , se trata de un suelo de grano grueso, es decir, tenemos un suelo tipo grava o arenoso (donde  $F =$  porcentaje de granos más finos que la malla N° 200).
- Para un suelo de grano grueso,  $(100 - F) / 2$  es la fracción gruesa en porcentaje. Se determina entonces el porcentaje de suelo que pasas el tamiz N°4 y es retenido en el tamiz N°200, siendo este valor  $F_1$ .
- Si  $F_1 \geq (100 - F) / 2$  se trata de un suelo de características arenosas. Para obtener el nombre y símbolo de grupo nos dirigimos a la tabla 4.1 y a las figuras 3.3 y 4.4:



SIMBOLO DE GRUPO	CRITERIOS
SW	Menos de 5% pasa la malla No. 200; $C_n = D_{60} / D_{10}$ mayor que o igual a 6; $C_2 = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$ entre 1 Y 3.
SP	Menos de 5% pasa la malla No.200; no cumple ambos criterios para SW.
SM	Mas de 12% pasa la malla No 200; los límites de Atterberg se grafica debajo de la línea A (figura 3.5) índice de plasticidad menor que 4.
SC	Mas de 12% pasa la malla No. 200; los imites de Atterberg se grafica debajo de la línea A (figura 3.5) índice de plasticidad mayor que 7.
SC – SM	Mas de 12% pasa la malla No. 200; los límites de Atterberg caen en el área sombreada marcada CL-ML en la figura 3.5.
SW - SM	El porcentaje que pasa la malla No. 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para SW y SM.
SW - SC	El porcentaje que pasa la malla No.200 está entre 5y 12; cumplen los criterios para SW y SC.
SP- SM	El porcentaje que pasa la malla No. 200 está entre 5y12; cumple los criterios para SP y SM.
SP - SC	El porcentaje que pasa la malla No. 200 está entre 5 y 12; cumple los criterios para SP y SC.

Tabla 4.1. Símbolos de grupos para suelos arcillosos. Método SUCS.

Símbolo de grupo	Nombre de grupo
GW	< 15% arena → Grava bien graduada
	≥ 15% arena → Grava bien graduada con arena
GP	< 15% arena → Grava mal graduada
	≥ 15% arena → Grava mal graduada con arena
GW-GM	< 15% arena → Grava bien graduada con limo
	≥ 15% arena → Grava bien graduada con limo y arena
GW-GC	< 15% arena → Grava bien graduada con arcilla (o arcilla limosa)
	≥ 15% arena → Grava bien graduada con arcilla y arena (o arcilla limosa y arena)
GP-GM	< 15% arena → Grava mal graduada con limo
	≥ 15% arena → Grava mal graduada con limo y arena
GP-GC	< 15% arena → Grava mal graduada con arcilla (o arcilla limosa)
	≥ 15% arena → Grava mal graduada con arcilla y arena (o arcilla limosa y arena)
GM	< 15% arena → Grava limosa
	≥ 15% arena → Grava limosa con arena
GC	< 15% arena → Grava arcillosa
	≥ 15% arena → Grava arcillosa con arena
GC-GM	< 15% arena → Grava limo-arcillosa
	≥ 15% arena → Grava limo-arcillosa con arena
SW	< 15% grava → Arena bien graduada
	≥ 15% grava → Arena bien graduada con grava
SP	< 15% grava → Arena mal graduada
	≥ 15% grava → Arena mal graduada con grava
SW-SM	< 15% grava → Arena bien graduada con limo
	≥ 15% grava → Arena bien graduada con limo y grava
SP-SC	< 15% grava → Arena bien graduada con arcilla (o arcilla limosa)
	≥ 15% grava → Arena bien graduada con arcilla y grava (o arcilla limosa y grava)
SP-SM	< 15% grava → Arena mal graduada con limo
	≥ 15% grava → Arena mal graduada con limo y grava
SP-SC	< 15% grava → Arena mal graduada con arcilla (o arcilla limosa)
	≥ 15% grava → Arena mal graduada con arcilla y grava (o arcilla limosa y grava)
SM	< 15% grava → Arena limosa
	≥ 15% grava → Arena limosa con grava
SC	< 15% grava → Arena arcillosa
	≥ 15% grava → Arena arcillosa con grava
SC-SM	< 15% grava → Arena limo-arcillosa
	≥ 15% grava → Arena limo-arcillosa con grava

Figura 4.4. Nombres de flujo para suelos tipo grava y arenosos (ASTM, 1998).



#### 4.1.6. Ensayo Proctor Modificado

La norma utilizada en este ensayo es la ASTM D-1557 la cual propone tres métodos (método: A, B, y C) para determinar la relación entre la humedad y la densidad seca de un suelo (curva de compactación). De acuerdo con el tamaño de las partículas del suelo estudiado en el presente trabajo de titulación, la norma recomienda que el procedimiento a seguir es el método A, que se describe a continuación:

##### METODO A

- Molde: Se emplea el de 4 pulg (101.6 mm) de diámetro
- Material: Se emplea el que pasa por el tamiz N°4 (4.75 mm).
- Capas:5
- Golpes por capa: 25

El equipo que se utilizó para realizar el ensayo es el siguiente:

- Molde proctor modificado de 4 pulg de diámetro.
- Collar de extensión proctor modificado de 4 pulg de diámetro.
- Pisón o martillo proctor modificado de 10 lbf (44,5 N) que cae de una altura de 18 pulg (457 mm), produciendo una Energía de Compactación de 56 000 lb-pie/pie<sup>3</sup> (2 700 kN-m/m<sup>3</sup>).
- Balanza con aproximación de 1gr.
- Horno de secado con circulación de aire y temperatura regulable capaz de mantenerse en 110° ± 5° C.
- Juego de tamices ASTM.
- Herramientas de mezcla.

El procedimiento de ensayo es el siguiente:

- Se registra el peso de cada molde seco, limpio y sin collarín.
- Se utiliza el material que haya pasado el tamiz N°4 y de acuerdo con el método A se compacta el material con 25 golpes por cada una de las 5 capas con ayuda del martillo proctor modificado. Se registran los pesos del material compactado más el molde.
- Se repite el proceso anterior aumentando el porcentaje de humedad en cada prueba, hasta obtener tres registros de pesos con sus respectivas humedades.
- Se determina la humedad en cada ensayo realizado, con lo cual es posible obtener el peso específico seco correspondiente.

La densidad húmeda del suelo se determina en base a la ecuación 4.6:

$$\gamma_h = \frac{W_{m+s} - W_m}{945 \text{ cm}^3} * 1000$$

**Ecuación 4.6.** Densidad húmeda del material en el ensayo Proctor modificado.

Donde:  $\gamma_h$  = Densidad húmeda del suelo en kg/m<sup>3</sup>.



$$W_{m+s} = \text{Peso de molde y suelo.}$$

$$W_m = \text{Peso de molde.}$$

La densidad seca del suelo se determina en base a la ecuación 4.7:

$$\gamma_s = \frac{\gamma_h}{1 + \left(\frac{\omega}{100}\right)}$$

**Ecuación 4.7.** Densidad seca del material en el ensayo Proctor modificado.

Donde:  $\gamma_h$  = Densidad húmeda en kg/m<sup>3</sup>.

$\gamma_s$  = Densidad seca en kg/m<sup>3</sup>.

$\omega$  = Porcentaje de humedad del suelo durante el ensayo.

Se representa gráficamente los datos obtenidos, los mismos que se ajustan a una curva; polinómica de segundo orden; en donde el punto máximo de la curva representa la densidad máxima y la humedad óptima del suelo objeto de ensayo.

#### 4.1.7. Ensayo Dinámico del suelo

Para llevar a cabo los ensayos dinámicos del suelo, se estableció un método experimental, en el cual los resultados sean favorables a escala pequeña de trabajo; ya que, para este tipo de mediciones siguiendo el método de refracción sísmica y con los equipos disponibles en nuestro medio, una defectuosa manipulación e incorrecta posición del instrumental puede ser un factor de alteración en los resultados.

Preliminarmente se llevaron a cabo dos pruebas en laboratorio, utilizando equipo ultrasónico en donde las medidas de un molde de madera prototipo fueron de: 6 cm de ancho, 30 cm de largo y 30 cm de alto; siendo los resultados irrelevantes.

Entre los inconvenientes encontrados previo a los ensayos dinámicos podemos destacar también:

- El suelo ensayado estará forzado a compactación lo cual aumentará su peso considerablemente, siendo compleja su manipulación y registro.
- El suelo no debe perder cantidades significativas de humedad durante el tiempo de ensayo.
- El molde debe ser capaz de resistir golpes al momento de compactar el suelo.
- La energía de compactación debe distribuirse de forma uniforme en el suelo.

Por los problemas mencionados anteriormente fue necesaria y conveniente la construcción de una caja de madera plywood de 30 cm de largo, 30 cm de ancho, 32 cm de alto internamente y 1.3 cm de grosor de pared; reforzada a su alrededor con alambres y clavos (figura 4.5) para que resista los golpes de compactación a los que se someterá durante el ensayo. Ya que el molde cuenta con una

altura de 32 cm, se dictaminó en cada prueba incorporar 6 capas de muestra de suelo de 5 cm aproximadamente, esto con el fin de mantener uniforme la compactación en el suelo.

Del mismo modo, para preservar la compactación fue imprescindible construir una cubierta o tapa cuadrada de 30 cm de largo y 30 cm de ancho, que ingrese en la caja de madera y sobre la cual se efectúan los golpes de compactación.

Para conservar una energía de compactación igualitaria, el martillo proctor modificado fue la herramienta que se utilizó para esta finalidad.

Los golpes de compactación ejecutados sobre la cubierta de madera son 0, 9, 18 y 36 golpes, siendo a 0 golpes el material suelto. Este número de impactos se definió a causa de que en el área de la cubierta de madera de  $900\text{ cm}^2$  aproximadamente, es simétrico y ordenado aplicar un total de 9 golpes con el martillo proctor modificado y por ende un número múltiplo de este.

La variación de la humedad en el suelo para las pruebas dinámicas fue establecida en base al resultado del ensayo proctor modificado, pues se evaluó en el ensayo experimental dos cifras de contenidos de humedad menores a la humedad óptima, dos cifras de contenidos de humedad mayores a la humedad óptima y una cifra cercana al porcentaje de humedad óptima.

Se decidió además utilizar equipo sísmico para registrar los tiempos de llegada de las ondas sísmicas, debido a que el uso de ultrasonido fue defectuoso.



*Figura 4.5.* Molde de madera reforzada, utilizada para el ensayo dinámico del suelo.



El instrumental utilizado para ejecutar los ensayos de compactación de suelo previo a los ensayos de refracción sísmica consta de:

- Una caja de madera reforzada con las características antes descritas, más cubierta o tapa.
- Pisón o martillo proctor modificado de 10 lbf (44,5 N) que cae de una altura de 18 pulg (457 mm), produciendo una Energía de Compactación de 56 000 lb-pie/pie<sup>3</sup> (2 700 kN-m/m<sup>3</sup>).
- Una pala.
- Balanza de capacidad superior a los 60 kg.
- Dos recipientes de capacidad mayor a los 50 litros.
- Probeta de 500 cm<sup>3</sup>.

Un total de 20 pruebas fueron realizadas, variando en cada una de ellas el grado de compactación (número de golpes por capa) y el contenido de humedad.

El procedimiento para adecuar el suelo se efectúa de la siguiente manera:

- Se registra el peso de la caja vacía y limpia.
- Con ayuda de la pala se llena progresivamente de material la caja de madera mediante 6 capas de suelo de un grosor de 5 cm aproximadamente por capa.
- Se compacta con la ayuda del martillo proctor modificado cada una de las capas de suelo, colocando encima del material la tapa de madera para producir una compactación uniforme.
- Por cada variación de humedad en el suelo se efectúan 0, 9, 18 y 36 golpes de compactación.
- Se enrasa la superficie del suelo después de compactar la capa final y enseguida se registra el peso de la caja y material.
- Se obtiene el contenido de humedad, la densidad húmeda y la densidad seca del suelo en cada una de las pruebas.
- Finalmente, se evalúa la energía de compactación en el molde en cada caso mediante la ecuación 3.3.

La densidad húmeda del suelo se obtiene mediante la ecuación 4.8:

$$\gamma_h = \frac{W_{m+s} - W_m}{V} * 1000$$

**Ecuación 4.8.** Densidad húmeda del material en el ensayo dinámico del suelo.

Donde:  $\gamma_h$  = Densidad húmeda del suelo en kg/m<sup>3</sup>.

$W_{m+s}$  = Peso de molde y suelo.

$W_m$  = Peso de molde.

$V$  = Volumen del molde de madera.

La densidad seca del suelo se determina mediante la ecuación 4.9:

$$\gamma_s = \frac{\gamma_h}{1 + \left(\frac{\omega}{100}\right)}$$

**Ecuación 4.9.** Densidad seca del material en el ensayo dinámico del suelo.

Donde:  $\gamma_h$  = Densidad húmeda del suelo en kg/m<sup>3</sup>.  
 $\gamma_s$  = Densidad seca del suelo en kg/m<sup>3</sup>.  
 $\omega$  = Porcentaje de humedad del suelo durante el ensayo.

#### 4.1.7.1. Ensayo de Sísmica de Refracción

El equipo utilizado para realizar el ensayo de sísmica de refracción es el siguiente (figura 4.6):

- Equipo sísmico PASI modelo 16SG24-N (Equipo combinado: sismógrafo y tomógrafo eléctrico; figura 4.7).
- 1 cable sísmico de 12 canales.
- 4 geófonos verticales de 10 Hz.
- 1 geófono starter.
- 1 cable para geófono estándar.
- Tubo metálico de 350 g.



**Figura 4.6.** Equipo sísmico PASI modelo 16SG24-N (Avilés & Barzallo, 2016).

El procedimiento de ensayo se efectuó de la siguiente forma:

- Una vez preparado el suelo para el ensayo, se colocan en la superficie lisa del suelo los cuatro geófonos: dos verticales (denominados 11 y 12 en el equipo sísmico) de color amarillo para registrar los tiempos de llegada de las ondas P y dos horizontales (denominados 9 y 10 en el equipo sísmico) de color rojo para registrar los tiempos de llegada de las ondas S. Se denominan geófonos 12, 11, 10 y 9 a los correspondientes por ubicación más cercana en el cable sísmico de 12 canales conectado al sismógrafo.
- A continuación, se coloca el geófono estándar que es el encargado de emitir las señales de onda al resto de geófonos.
- Es importante señalar que se colocan los 5 geófonos tratando de mantener simetría entre ellos.
- Con la ayuda del tubo metálico de 350 g se realizaron 3 golpes ligeros sobre el geófono estándar, un golpe vertical y dos golpes horizontales con diferente dirección (un impacto de izquierda a derecha y un impacto de derecha a izquierda) sobre el geófono; siendo los golpes los responsables de producir perturbaciones en el suelo, lo cual se traduce a un

tiempo de registro en el sismógrafo. Se realizaron dos golpes diagonales sobre el geófono estárter como una forma de respaldar la medición, ya que este impacto produce que el geófono se mueva y se desestabilice del lugar en el que se encuentra anclado (figura 4.7).

- Finalmente, se mide y se registran las distancias existentes entre el punto central de cada uno de los geófonos al punto central del geófono estárter.



*Figura 4.7.* Colocación de geófonos para el ensayo de sísmica de refracción.

#### 4.2. Procesamiento de Datos

Una vez terminadas las pruebas dinámicas en el suelo, la obtención y el procesamiento de la información se lo realizó en ordenador. En esta sección se obtienen los tiempos de llegada registrados en el equipo sismógrafo y se determinan las velocidades de propagación de ondas en el suelo ensayado.

El instrumental utilizado para realizar el procesamiento de datos es el siguiente:

- Software SismoPcNew.
- Software Excel.

El procedimiento seguido para desarrollar este apartado es el siguiente:

- Se adquieren los datos informáticos registrados en el equipo sísmico.
- Por medio del software SismoPcNew se obtienen los tiempos de llegada en milisegundos de las ondas sísmicas tanto en P como en S (geófono 11, 12 para las ondas P y los geófonos 9, 10 para las ondas S). La información que entrega este programa se aprecia en la figura 4.8 para el tiempo de registro de ondas las P y en la figura 4.9 para el tiempo de registro de las ondas S.



**Figura 4.8.** Tiempos de ondas P registrados en el equipo sísmico.



**Figura 4.9.** Tiempos de ondas S registrados en el equipo sísmico.

- Una vez tabulados los datos en Excel, se obtienen las velocidades de onda sísmica de compresión y de corte.
- Mediante el uso de filtros en Excel se realizaron tablas ilustrativas y gráficos para cada ensayo de compactación (material suelto, 9, 18 y 36 golpes), en las que se puede observar y analizar mejor el comportamiento físico del suelo.

La velocidad de las ondas sísmicas P se determinan mediante la ecuación 4.10:

$$V_P = \frac{d}{t}$$

**Ecuación 4.10.** Determinación de la velocidad de ondas primarias.

Donde:  $V_P$  = Velocidad de onda de compresión en m/s

$d$  = Distancia entre geófonos.

$t$  = Tiempo en milisegundos registrado en el sismógrafo.

La velocidad de las ondas sísmicas S se establecen mediante la ecuación 4.11:

$$V_S = \frac{d}{t}$$



*Ecuación 4.11.* Determinación de la velocidad de ondas secundarias.

Donde:  $V_s$  = Velocidad de onda de corte en m/s

$d$  = Distancia entre geófonos.

$t$  = Tiempo en milisegundos registrado en el sismógrafo.

- Corrección en los tiempos de registro.

Es necesario realizar una corrección a los tiempos registrados en el sismógrafo, ya que al recrear las ondas sísmicas en el suelo mediante los golpes dados en el geófono estándar, las perturbaciones viajan en un principio a través del geófono y luego se transmiten al suelo; por tanto, se habla de dos distancias: una vertical ( $D_v$  = longitud del geófono estándar) y una horizontal ( $D_h$  = distancia entre geófonos). Considerando esta situación y al eliminar el lapso que le toma a la perturbación viajar por medio del geófono, se determina un promedio de ajuste de 0,9 milisegundos menos en los tiempos obtenidos en el ensayo de sísmica de refracción para ondas P y un promedio de 2 milisegundos menos en los tiempos obtenidos en el ensayo de sísmica de refracción para ondas S. Por tanto, estos valores se estiman en función de la longitud del geófono  $D_v$ , tomando en cuenta que la densidad del geófono es diferente al suelo.

Es primordial destacar que los resultados de las velocidades calculadas mediante el procedimiento propuesto en este trabajo de titulación son velocidades relativas, esto es debido a la escala y al dimensionamiento de los ensayos llevados a cabo; pues al ser un estudio de índole experimental trata de simular en laboratorio las condiciones reales en cuanto a las propiedades físicas del suelo se refiere, así como la aplicación del método de sísmica de refracción en la práctica ingenieril.

### 4.3. Análisis por Regresión Lineal

Finalmente se realiza el análisis de las correlaciones planteadas como objetivos en el presente trabajo de titulación, llevándose a cabo este proceso de cálculo mediante el software Excel y siguiendo los lineamientos que la teoría de regresión estadística desarrolla.

En este punto del trabajo, se destaca la disponibilidad de los datos necesarios para obtener las distintas correlaciones propuestas como son: velocidades de onda sísmica P y S del suelo, densidades secas y húmedas del suelo a distintos grados de compactación, condiciones de humedad del suelo para sus correspondientes grados de compactación, densidad seca máxima y humedad óptima del suelo obtenidos del ensayo proctor modificado.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSION

En el presente capítulo se da a conocer los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos realizados en este trabajo; de igual modo se realiza un análisis del comportamiento de estos valores bajo los lineamientos que la teoría indica.

### 5.1. Resultados de Humedad Natural del Suelo

En la tabla 5.1 se presenta el resultado de la humedad natural del suelo. En laboratorio se obtuvieron dos terrones inalterados de suelo; de los cuales se obtuvo su humedad, siendo como respuesta final de humedad natural la media resultante de estos valores.

HUMEDAD NATURAL					
N° TARRO	PESO HUMEDO (g)	PESO SECO (g)	PESO TARRO (g)	% DE HUMEDAD	PROMEDIO
1	31,79	27,88	9,99	21,86	21,87
2	31,06	27,30	10,11	21,87	

*Tabla 5.1.* Resultado del ensayo de humedad natural del suelo analizado.

### 5.2. Análisis Mecánico del Suelo

Por medio de los ensayos realizados en este trabajo, se determina en porcentajes la distribución del tamaño de las partículas que conforman el suelo en cuestión. Este resultado, junto con un estudio de límites de Atterberg permitió clasificar el suelo bajo los estándares SUCS.

#### 5.2.1. Resultados del Análisis del Suelo por Cribado (Granulometría)

En la tabla 5.2 se observan los resultados del análisis por cribado, más conocido como ensayo de granulometría del suelo, este ensayo se llevó a cabo en el laboratorio de suelos de la Universidad de Cuenca.

De acuerdo con el tamaño de las partículas predominantes del suelo, estos se clasifican en áridos gruesos (gravas y arenas) y áridos finos (limos y arcillas). Como se observa en la tabla 5.2 no existe porcentaje de material retenido desde el tamiz de 4 pulgadas hasta el tamiz N°4, por lo que el suelo analizado no contiene material grueso tipo grava en su composición.

El porcentaje de arena en el suelo es el 65% ya que es el porcentaje acumulado que se retiene desde el tamiz N°4 hasta el tamiz N°200; el porcentaje de finos en el suelo es el 35% puesto que es el porcentaje de material que pasa el tamiz No. 200.

Por consiguiente, el resultado de la composición granulométrica del suelo analizado se presenta en la tabla 5.3.

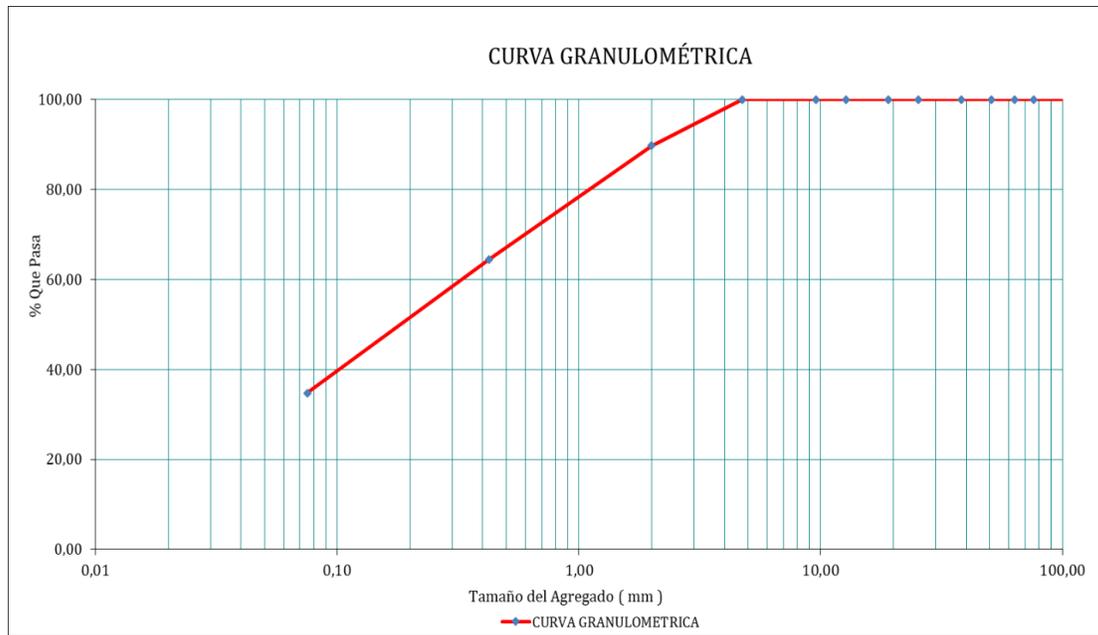
<b>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR LAVADO</b>					
Peso Inicial de la Muestra Seca		500,00	g		
Peso de la Muestra Después del Lavado		326,00	g		
Perdida por Lavado		174,00	g		
Tolerancia	65,200		%		
Tamiz	Abertura (mm)	Ret Parcial (gr)	Ret Acumulado		% Que Pasa
			(gr)	( % )	
4"	101,60	---	---	---	100
3"	76,20	---	---	---	100
2½"	63,50	---	---	---	100
2"	50,80	---	---	---	100
1½"	38,10	---	---	---	100
1"	25,40	---	---	---	100
¾"	19,00	---	---	---	100
½"	12,70	---	---	---	100
⅜"	9,53	---	---	---	100
N°4	4,75	---	---	---	100
PASA N°4		0,00			
N°10	2,00	51,30	51,30	10,26	90
N°40	0,43	126,40	177,70	35,54	64
N°200	0,075	148,30	326,00	65,20	35
<b>PASA 200</b>		4,50			
<b>Total Retenido:</b>	326,00				

*Tabla 5.2.* Resultados obtenidos en el ensayo de Granulometría.

<b>PORCENTAJE DE GRANULOMETRIA</b>	
Grava =	0
Arena =	65
Finos =	35

*Tabla 5.3.* Resumen de la Granulometría del suelo.

Los resultados del análisis por cribado se presentan en la gráfica semilogarítmica o curva granulométrica de la figura 5.1, donde los diámetros de las partículas se grafican en escala logarítmica en el eje de las abscisas y el porcentaje que pasa correspondiente a cada tamiz en escala aritmética en el eje de las ordenadas.



*Figura 5.1.* Curva granulométrica del suelo.

## 5.2.2. Resultados de la Consistencia del Suelo

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de los límites de Atterberg y del índice de plasticidad del suelo.

### 5.2.2.1. Límite Líquido

El límite líquido conseguido al evaluar el ajuste lineal (figura 5.2) en el valor de 25 golpes es de 29%. Este valor indica el porcentaje de contenido de agua en donde el suelo pasa de estado plástico a estado líquido. La tabla 5.4 contiene los resultados de las pruebas de laboratorio y colaboran en la construcción de la curva de flujo.

LÍMITE LÍQUIDO						
Nº TARRO	Nº GOLPES	PESO HUMEDO (g)	PESO SECO (g)	PESO TARRO (g)	% DE HUMEDAD	LÍMITE LIQUIDO EN 25 GOLPES
99	29	20,57	18,29	10,26	28,39	29
87	23	20,24	17,92	9,98	29,22	
71	18	21,06	18,47	9,99	30,54	
89	13	19,87	17,54	10,11	31,36	

*Tabla 5.4.* Resultados del ensayo de límite líquido.

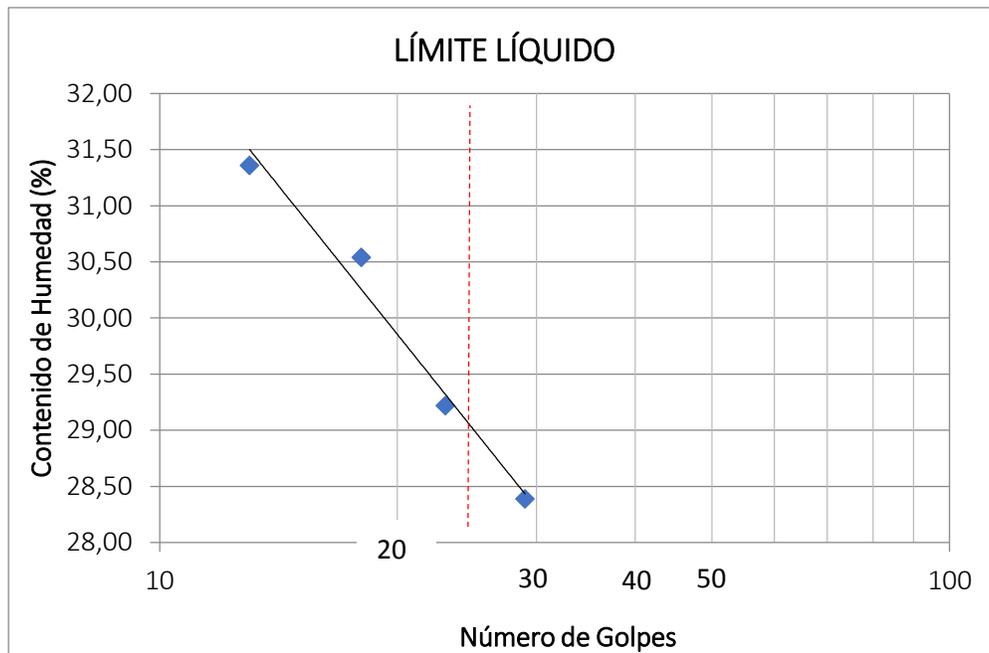


Figura 5.2. Grafica logarítmica de la relación humedad vs número de golpes en el ensayo de límite líquido.

### 5.2.2.2. Límite Plástico

En la tabla 5.5 se presenta el resultado adquirido de límite plástico. Este valor indica el porcentaje de humedad en el cual el suelo pasa de un estado semisólido a un estado plástico.

LÍMITE PLÁSTICO					
Nº TARRO	PESO HUMEDO (g)	PESO SECO (g)	PESO TARRO (g)	% DE HUMEDAD	PROMEDIO
86	10,46	10,39	10,12	25,93	25,47
70	10,15	10,06	9,7	25	

Tabla 5.5. Resultados del ensayo de límite plástico.

### 5.2.2.3. Índice de Plasticidad

En la tabla 5.6 se indica el resultado del índice de plasticidad del suelo, este índice define un rango de humedades en el cual el suelo tiene un comportamiento plástico.

ÍNDICE DE PLASTICIDAD		
Límite Líquido	LL =	29,00
Límite Plástico	LP =	25,47
Índice de Plasticidad	IP =	3,54

Tabla 5.6. Resultados de índice de plasticidad.

### 5.2.3. Clasificación del Suelo por el Método SUCS

Los resultados obtenidos en el análisis granulométrico del suelo, conjuntamente con los resultados de límites de Atterberg, indican que el suelo es de tipo arena – limosa; según el método SUCS de clasificación (tabla 5.7).

CLASIFICACION DE SUELOS	
SUCS:	SM - Arena Limosa

**Tabla 5.7.** Clasificación del suelo ensayado por el método SUCS.

### 5.3. Compactación del Suelo

El análisis y los resultados del ensayo proctor modificado se presentan a continuación. La humedad óptima adquirida en esta prueba se establece como un punto de referencia para las humedades de ensayo en el estudio dinámico del suelo.

#### 5.3.1. Resultados de Ensayo Proctor Modificado

La tabla 5.8 proporciona información previa para llevar a cabo el ensayo proctor modificado.

ENSAYO PROCTOR MODIFICADO			
METODO A.	MOLDE # 1	Peso	6076 g.
PROCTOR MODIFICADO	# Capas / Mol = 5	Volumen	945 cm <sup>3</sup>
	# Golpes / Capa = 25	Diámetro	4 Pulg.

**Tabla 5.8.** Datos del ensayo proctor modificado por el método A.

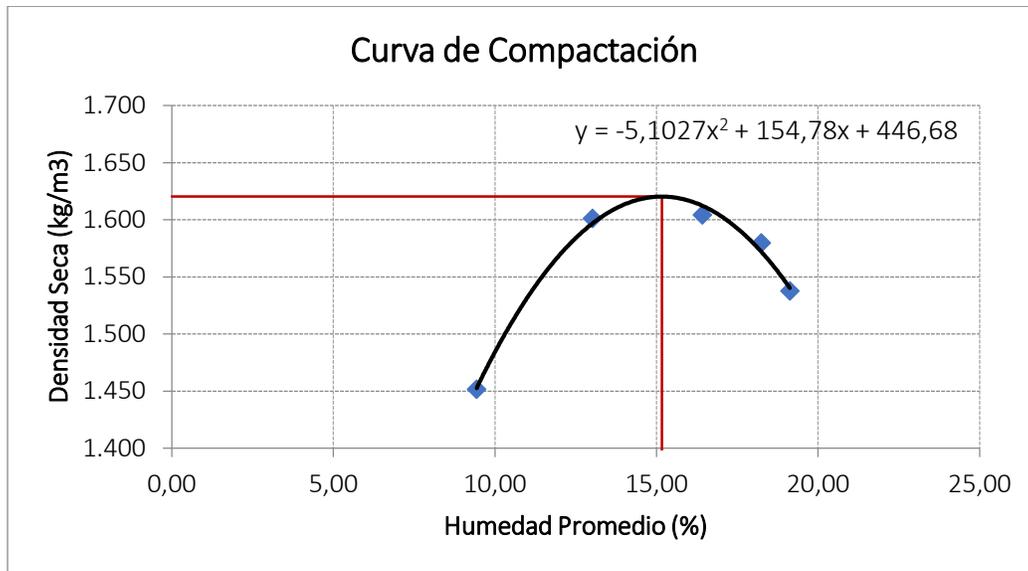
DENSIDAD DE LABORATORIO					
Molde #	1	2	3	4	5
Humedad inicial (%)	115	196	236	291	370
Peso suelo húmedo + Molde	7577	7786	7841	7814	7794
Densidad Húmeda (g/cm <sup>3</sup> )	1,58	1,81	1,86	1,83	1,81
Densidad Seca (kg/m <sup>3</sup> )	1588,4	1809,5	1867,7	1839,2	1818,0

**Tabla 5.9.** Densidad húmeda y densidad seca del suelo compactado.

CONTENIDO DE HUMEDAD										
Molde #	1		2		3		4		5	
Tarro #	43	92	36	25	11	110	86	50	120	38
Peso húmedo + tarro	38,95	39,77	42,19	41,26	40,22	41,58	42,38	40,76	39,80	41,29
Peso seco + tarro	36,44	37,16	38,48	37,64	35,96	37,15	37,32	36,05	35,03	36,28
Peso de tarro	9,71	9,61	9,74	10,07	9,92	10,27	9,74	10,07	9,92	10,27
% de Humedad	9,39	9,47	12,91	13,13	16,36	16,48	18,35	18,13	19,00	19,26
% Promedio humedad	9,43		13,02		16,42		18,24		19,13	

**Tabla 5.10.** Contenido de humedad del suelo ensayado.

Los valores adquiridos en el ensayo proctor modificado se muestran en las tablas 5.9 y 5.10, la humedad óptima y la densidad seca máxima del suelo se obtienen mediante un análisis gráfico de densidad seca versus el porcentaje de humedad contenida en el suelo, figura 5.3. En el gráfico se ubican los cinco valores de las pruebas proctor, seguido de un ajuste polinómico de segundo grado del cual se obtiene la densidad seca máxima y la humedad óptima correspondiente al punto cúspide de la gráfica.



*Figura 5.3.* Curva de Compactación Proctor Modificado.

En la tabla 5.11 se aprecian los resultados obtenidos del ensayo proctor modificado.

<b>RESULTADOS PROCTOR MODIFICADO</b>	
DENSIDAD MÁXIMA	1,620 kg/m <sup>3</sup>
HUMEDAD ÓPTIMA	15,17 %

*Tabla 5.11.* Resultados obtenidos en el ensayo proctor modificado.

#### 5.4. Análisis Dinámico del Suelo

En esta sección del trabajo se da a conocer las velocidades de ondas sísmicas adquiridas en los ensayos de sísmica de refracción; además se realiza un análisis del comportamiento de estas velocidades con respecto al incremento de grado de compactación y contenido de humedad en el suelo.

#### 5.4.1. Resultados Obtenidos en la Preparación del Suelo para el Ensayo Dinámico

Previo a cada ensayo de sísmica de refracción se preparó el suelo entregándole las condiciones físicas de contenido de agua y grado de compactación establecidas.

Como se explicó anteriormente, el punto de referencia para la variación del contenido de humedad fue la humedad óptima de 15,17% obtenida en el ensayo proctor de compactación; analizando entonces cinco porcentajes de prueba, dos por debajo de la humedad óptima que resultaron de 6,10% y 10,63%, otro valor semejante a la humedad óptima siendo de 16,05% y dos cifras por encima de la humedad óptima correspondientes a 21,20% y 27,96%. A estas humedades se las denomina humedades medias de ensayo. Los resultados adquiridos se muestran en la tabla 5.12.

<b>RESULTADOS OBTENIDOS DURANTE LA PREPARACION DEL SUELO PARA EL ENSAYO DINAMICO</b>						
ENSAYO 1						
IDENTIFICACION	# GOLPES POR CAPA	PESO MOLDE+ MATERIAL (Kg)	PESO MATERIAL HUMEDO (kg)	DENSIDAD HUMEDA (kg/m3)	DENSIDAD SECA (kg/m3)	HUMEDAD %
A1	0	37,30	32,70	1135,42	1069,92	6,12
A2	9	39,30	34,70	1204,86	1135,18	6,14
A3	18	40,80	36,20	1256,94	1182,79	6,27
A4	36	42,50	37,90	1315,97	1242,80	5,89
					HUMEDAD PROMEDIO	6,10
ENSAYO 2						
B1	0	37,10	32,50	1128,47	1022,11	10,41
B2	9	42,60	38,00	1319,44	1188,83	10,99
B3	18	44,20	39,60	1375,00	1241,16	10,78
B4	36	45,30	40,70	1413,19	1280,71	10,34
					HUMEDAD PROMEDIO	10,63
ENSAYO 3						
C1	0	36,30	31,70	1100,69	949,35	15,94
C2	9	44,20	39,60	1375,00	1182,55	16,27
C3	18	44,60	40,00	1388,89	1197,01	16,03
C4	36	46,20	41,60	1444,44	1245,80	15,95
					HUMEDAD PROMEDIO	16,05

ENSAYO 4						
D1	0	36,40	31,80	1104,17	913,58	20,86
D2	9	46,90	42,30	1468,75	1208,24	21,56
D3	18	49,60	45,00	1562,50	1290,02	21,12
D4	36	51,60	47,00	1631,94	1345,67	21,27
					HUMEDAD PROMEDIO	21,20
ENSAYO 5						
E1	0	47,40	42,80	1486,11	1151,74	29,03
E2	9	57,30	52,70	1829,86	1435,66	27,46
E3	18	59,60	55,00	1909,72	1490,82	28,10
E4	36	60,60	56,00	1944,44	1527,84	27,27
					HUMEDAD PROMEDIO	27,96

**Tabla 5.12.** Resultados obtenidos durante la preparación del suelo para el ensayo dinámico.

Analizando los resultados de las densidades húmedas obtenidas en este ensayo, se observa que cuando el suelo ingresa al molde de madera con 0 golpes de compactación, los valores van disminuyendo a partir del ensayo 1 hasta el ensayo 3, pues a humedades relativamente bajas las partículas del suelo se adhieren entre sí, creando espacios vacíos dentro del cajón. Mientras tanto en los ensayos 4 y 5 estos valores aumentan, dado que a mayor contenido de humedad existe un asentamiento del suelo y por ende un menor porcentaje de vacíos dentro del molde. Por otro lado, a medida que se aplica compactación al suelo la densidad aumenta por una reducción controlada de vacíos en el suelo.

En cuanto a los resultados de densidades secas obtenidas, se observa que cuando el material se encuentra suelto, las densidades disminuyen gradualmente en los ensayos 1, 2, 3 y 4 como producto del contenido de vacíos y la reducción del peso del agua; mientras que en el ensayo 5 aumenta considerablemente debido a un acomodamiento del suelo produciendo que una mayor cantidad de material entre en el molde. Por otra parte, cuando se aplica compactación al suelo las densidades secas presentan un comportamiento variable debido a un efecto de esponjamiento e hidrocompactación que sufre el suelo durante las pruebas de compactación. La hidrocompactación causa asentamientos en suelos de grano fino y poroso como lo es el material usado en este proyecto; este proceso se da al elevarse el contenido de humedad en el material, pues la presencia de agua provoca la disolución de los enlaces entre partículas o pérdida de las tensiones capilares que soportan las partículas del suelo para conservar su estructura (Tomás, Herrera, Delgado & Peña, 2009).

Durante el ensayo 5 en donde el contenido de humedad promedio en el suelo es de 27,96%, la manipulación de la muestra fue dificultosa, pues al estar cercano este porcentaje de humedad al límite líquido (con una diferencia del 1%), la consistencia del suelo fue más o menos líquida, es decir el suelo se presentaba de forma lodosa y espesa.

El valor límite de densidad seca lograda en esta sección es  $1527,8 \frac{Kg}{m^3}$  aproximadamente; siendo este valor distante al resultado de densidad seca máxima dada en el ensayo proctor modificado.

Una vez preparado el suelo con las condiciones físicas del caso, se continua con las pruebas de sísmica de refracción.

La energía de compactación evaluada en la caja para cada uno de los impactos impartidos sobre la cubierta de madera se presenta en la tabla 5.13.

RESULTADOS DE LA ENERGÍA DE COMPACTACIÓN					
NÚMERO DE GOLPES	NÚMERO DE CAPAS	PESO DEL PISTON (N)	ALTURA DE CAIDA DEL PISTÓN (m)	VOLUMEN DEL MOLDE (m <sup>3</sup> )	ENERGÍA DE COMPACTACIÓN (kN-m/m <sup>3</sup> )
0	6	44,5	0,457	0,0288	0
9					38,13
18					76,26
36					152,52

*Tabla 5.13.* Resultados obtenidos de la energía de compactación en el molde.

La energía de compactación evaluada en el molde es muy baja en relación con la energía de compactación proctor modificado la cual es de  $2696 \frac{kN-m}{m^3}$ . Para alcanzar un esfuerzo de compactación proctor modificado semejante, sería necesario aumenta el número de golpes a 636; lo cual desde el punto de vista del experimento es poco viable. Es por ello que no se puede evaluar las velocidades sísmicas en torno a la humedad óptima y densidad seca máxima del ensayo proctor modificado como parte del objetivo planteado en este trabajo, ya que la energía de compactación no es igual.

#### 5.4.2. Resultados Obtenidos en el Ensayo de Sísmica de Refracción

Para determinar la velocidad de las ondas sísmicas se realiza un promedio entre los valores de velocidades calculados, puesto que se utilizaron dos geófonos para evaluar la propagación de las ondas P y dos geófonos para evaluar la propagación de las ondas S en el registro de cada prueba. Las velocidades calculadas en cada ensayo se observan en las tablas siguientes: 5.14 con humedad

promedio en el suelo de 6,10%, 5.15 con humedad promedio en el suelo de 10,63%, 5.16 con humedad promedio en el suelo de 16,05%, 5.17 con humedad promedio en el suelo de 21,20 y 5.18 con humedad promedio en el suelo de 27,96. En cada tabla se especifica el número de geófono que realizó el registro, repitiéndose por dos ocasiones los geófonos 10 y 9 debido a los dos impactos horizontales que se efectuó sobre el geófono estándar como se indicó en el capítulo de materiales y métodos.

<b>RESULTADOS DE VELOCIDADES DE ONDA MEDIANTE SISMICA DE REFRACCION</b>						
<b>ENSAYO 1</b>			<b>HUMEDAD</b>		<b>6,10</b>	
# GEOFONO	DISTANCIA GEOFONO (cm)	TIEMPO (ms)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	PROMEDIO (m/s)	PROMEDIO (Km/s)
<b>MATERIAL SIN COMPACTAR</b>						
12	17,00	1,4	121,43		119,46	0,1195
11	23,50	2,0	117,50			
10	22,00	6,6		33,33	31,37	0,0314
9	15,00	5,1		29,41		
10	22,00	6,6		33,33		
9	15,00	5,1		29,41		
<b>9 GOLPES</b>						
12	19,00	1,3	146,15		148,08	0,1481
11	24,00	1,6	150,00			
10	26,00	4,5		57,78	50,62	0,0506
9	18,50	4,3		43,02		
10	26,00	5,7		45,61		
9	18,50	3,3		56,06		
<b>18 GOLPES</b>						
12	20,00	1,2	166,67		161,46	0,1615
11	25,00	1,6	156,25			
10	26,00	4,5		57,78	59,02	0,0590
9	19,00	3,4		55,88		
10	26,00	4,4		59,09		
9	19,00	3,0		63,33		
<b>36 GOLPES</b>						
12	22,00	1,1	200,00		194,64	0,1946
11	26,50	1,4	189,29			
10	27,00	3,9		69,23	68,09	0,0681
9	19,50	2,9		67,24		
10	27,00	3,7		72,97		
9	19,50	3,1		62,90		

**Tabla 5.14.** Resultados de velocidades de onda, ensayo 1.

ENSAYO 2			HUMEDAD		10,63	
# GEOFONO	DISTANCIA GEOFONO (cm)	TIEMPO	V <sub>p</sub>	V <sub>s</sub>	PROMEDIO	PROMEDIO
		(ms)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(Km/s)
<b>MATERIAL SIN COMPACTAR</b>						
12	21,50	1,2	179,17		182,44	0,1824
11	26,00	1,4	185,71			
10	28,00	7,8		35,90	35,37	0,0354
9	23,00	6,6		34,85		
10	28,00	7,8		35,90		
9	23,00	6,6		34,85		
<b>9 GOLPES</b>						
12	21,00	0,9	233,33		218,59	0,2186
11	26,50	1,3	203,85			
10	27,00	2		135,00	132,71	0,1327
9	21,50	1,6		134,38		
10	27,00	2		135,00		
9	21,50	1,7		126,47		
<b>18 GOLPES</b>						
12	22,50	0,7	321,43		329,46	0,3295
11	27,00	0,8	337,50			
10	28,50	1,2		237,50	208,61	0,2086
9	23,00	1		230,00		
10	28,50	1,5		190,00		
9	23,00	1,3		176,92		
<b>36 GOLPES</b>						
12	20,00	0,5	400,00		412,50	0,4125
11	25,50	0,6	425,00			
10	28,00	1,1		254,55	236,17	0,2362
9	23,50	0,9		261,11		
10	28,00	1,3		215,38		
9	23,50	1,1		213,64		

**Tabla 5.15.** Resultados de velocidades de onda, ensayo 2.

ENSAYO 3			HUMEDAD		16,05	
# GEOFONO	DISTANCIA GEOFONO (cm)	TIEMPO	V <sub>p</sub>	V <sub>s</sub>	PROMEDIO	PROMEDIO
		(ms)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(Km/s)
<b>MATERIAL SIN COMPACTAR</b>						
12	22,00	1,2	183,33		186,31	0,1863
11	26,50	1,4	189,29			
10	27,50	4,9		56,12	58,32	0,0583
9	23,00	3,8		60,53		
10	27,50	4,9		56,12		
9	23,00	3,8		60,53		
<b>9 GOLPES</b>						
12	20,50	0,8	256,25		236,46	0,2365
11	26,00	1,2	216,67			
10	27,50	2,3		119,57	107,49	0,1075
9	22,50	1,9		118,42		
10	27,50	2,8		98,21		
9	22,50	2,4		93,75		
<b>18 GOLPES</b>						
12	20,50	0,6	341,67		360,12	0,3601
11	26,50	0,7	378,57			
10	27,00	1,9		142,11	134,29	0,1343
9	21,50	1,7		126,47		
10	27,00	1,9		142,11		
9	21,50	1,7		126,47		
<b>36 GOLPES</b>						
12	22,00	0,5	440,00		420,00	0,4200
11	28,00	0,7	400,00			
10	28,50	1,7		167,65	169,89	0,1699
9	22,50	1,4		160,71		
10	28,50	1,6		178,13		
9	22,50	1,3		173,08		

**Tabla 5.16.** Resultados de velocidades de onda, ensayo 3.

ENSAYO 4			HUMEDAD		21,20	
# GEOFONO	DISTANCIA GEOFONO (cm)	TIEMPO	Vp	Vs	PROMEDIO	PROMEDIO
		(ms)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(Km/s)
<b>MATERIAL SIN COMPACTAR</b>						
12	23,00	1,8	127,78		133,63	0,1336
11	26,50	1,9	139,47			
10	27,00	7,6		35,53	41,51	0,0415
9	19,00	7,1		26,76		
10	27,00	4,8		56,25		
9	19,00	4,0		47,50		
<b>9 GOLPES</b>						
12	20,00	0,9	222,22		217,36	0,2174
11	25,50	1,2	212,50			
10	27,00	2,2		122,73	121,41	0,1214
9	21,00	1,8		116,67		
10	27,00	2,2		122,73		
9	21,00	1,7		123,53		
<b>18 GOLPES</b>						
12	22,00	0,5	440,00		440,83	0,4408
11	26,50	0,6	441,67			
10	27,00	1,9		142,11	143,80	0,1438
9	20,50	1,5		136,67		
10	27,00	1,8		150,00		
9	20,50	1,4		146,43		
<b>36 GOLPES</b>						
12	23,00	0,4	575,00		557,50	0,5575
11	27,00	0,5	540,00			
10	28,00	2,1		133,33	137,85	0,1378
9	21,00	1,6		131,25		
10	28,00	1,8		155,56		
9	21,00	1,6		131,25		

**Tabla 5.17.** Resultados de velocidades de onda, ensayo 4.

ENSAYO 5			HUMEDAD		27,96	
# GEOFONO	DISTANCIA GEOFONO (cm)	TIEMPO	V <sub>p</sub>	V <sub>s</sub>	PROMEDIO	PROMEDIO
		(ms)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(Km/s)
<b>MATERIAL SIN COMPACTAR</b>						
12	22,00	1,4	157,14		159,82	0,1598
11	26,00	1,6	162,50			
10	26,00	4,7		55,32	48,54	0,0485
9	19,00	4,5		42,22		
10	26,00	4,7		55,32		
9	19,00	4,6		41,30		
<b>9 GOLPES</b>						
12	18,00	1	180,00		180,38	0,1804
11	23,50	1,3	180,77			
10	24,00	4,1		58,54	68,45	0,0685
9	20,00	3,8		52,63		
10	24,00	2,8		85,71		
9	20,00	2,6		76,92		
<b>18 GOLPES</b>						
12	23,50	0,9	261,11		255,56	0,2556
11	27,50	1,1	250,00			
10	27,50	1,9		144,74	147,37	0,1474
9	24,00	1,6		150,00		
10	27,50	1,9		144,74		
9	24,00	1,6		150,00		
<b>36 GOLPES</b>						
12	22,00	1,1	200,00		201,92	0,2019
11	26,50	1,3	203,85			
10	27,00	3,9		69,23	63,64	0,0636
9	20,00	3,5		57,14		
10	27,00	3,8		71,05		
9	20,00	3,5		57,14		

**Tabla 5.18.** Resultados de velocidades de onda, ensayo 5.

Los resultados obtenidos se encuentran dentro de un margen de error del 3%, esta valoración se determina considerando la corrección en las velocidades, la lectura de tiempos de viaje de las ondas sísmicas.

### 5.4.3. Resumen de Resultados del Ensayo Dinámico del Suelo Considerando Humedades Medias

La tabla 5.19 mostrada a continuación es un resumen de resultados de las velocidades de ondas sísmicas a diferentes grados de compactación, considerando como factor principal el porcentaje de humedad promedio de cada uno de los cinco ensayos realizados, en ella se muestran los valores de grado de compactación, densidad húmeda, densidad seca y humedad promedio del suelo, además de las velocidades P y S obtenidas del ensayo de sísmica de refracción.

RESULTADOS DEL ENSAYO DINÁMICO DEL SUELO CONSIDERANDO HUMEDADES MEDIAS.					
GRADO DE COMPACTACION	DENSIDAD HUMEDA kg/m <sup>3</sup>	DENSIDAD SECA kg/m <sup>3</sup>	HUMEDAD %	V <sub>p</sub> m/s	V <sub>s</sub> m/s
0	1135,42	1069,92	6,10%	119,46	31,37
9	1204,86	1135,18		148,08	50,62
18	1256,94	1182,79		161,46	59,02
36	1315,97	1242,80		194,64	68,09
0	1128,47	1022,11	10,63%	182,44	35,37
9	1319,44	1188,83		218,59	132,71
18	1375,00	1241,16		329,46	208,61
36	1413,19	1280,71		412,5	236,17
0	1100,69	949,35	16,05%	186,31	58,32
9	1375,00	1182,55		236,46	107,49
18	1388,89	1197,01		360,12	134,29
36	1444,44	1245,80		420	169,89
0	1104,17	913,58	21,20%	133,63	41,51
9	1468,75	1208,24		217,36	121,41
18	1562,50	1290,02		440,83	143,8
36	1631,94	1345,67		557,5	137,85
0	1486,11	1151,74	27,96%	159,82	48,54
9	1829,86	1435,66		180,38	68,45
18	1909,72	1490,82		255,56	147,37
36	1944,44	1527,84		201,92	63,64

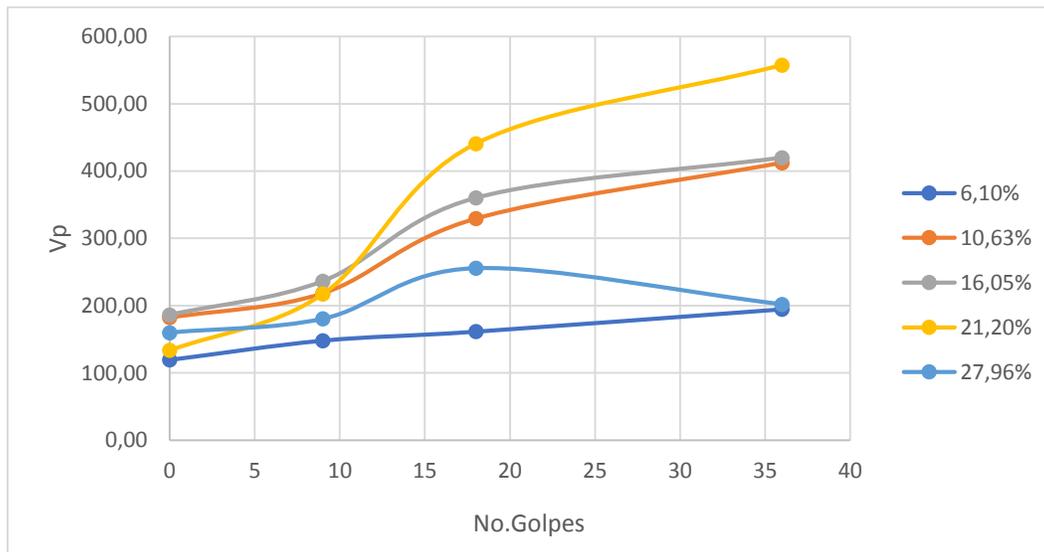
**Tabla 5.19.** Resultados del Ensayo Dinámico del Suelo Considerando Humedades Medias.

Los resultados muestran que a medida que el grado de compactación aumenta considerando en el suelo las humedades medias de 6,10 %, 10,63 %, 16,05 % y 21,20 % menores al límite plástico (25,47%), las velocidades de ondas P y S aumentan gradualmente. A 36 golpes de compactación en el ensayo realizado con humedad media de 21,20% la velocidad de onda S disminuye con relación a la prueba de 18 golpes, esto puede suceder por una mala manipulación durante el ensayo

dinámico del suelo o por un dato mal interpretado al momento de precisar el tiempo de propagación de la onda.

En las pruebas realizadas en el suelo con una humedad media de 27,96 % a 18 y 36 impactos de compactación y tanto para  $V_p$  y  $V_s$  las velocidades cambian, esto se debe al aumento del contenido de agua; ya que la velocidad de onda depende de la densidad del material por el que se propaga siendo esta humedad media representativa para que exista una alteración en las mediciones, además de que las  $V_s$  no se transmiten en el agua.

Los resultados de la tabla 5.19 se exponen de manera gráfica en la figura 5.4 y en la figura 5.5 en un sistema de ejes donde  $x$  es el número de golpes y  $y$  son las  $V_p$  y  $V_s$  respectivamente.



**Figura 5.4.** Comportamiento de las  $V_p$  con relación al grado de compactación del suelo, tomando constante la humedad promedio de ensayo.

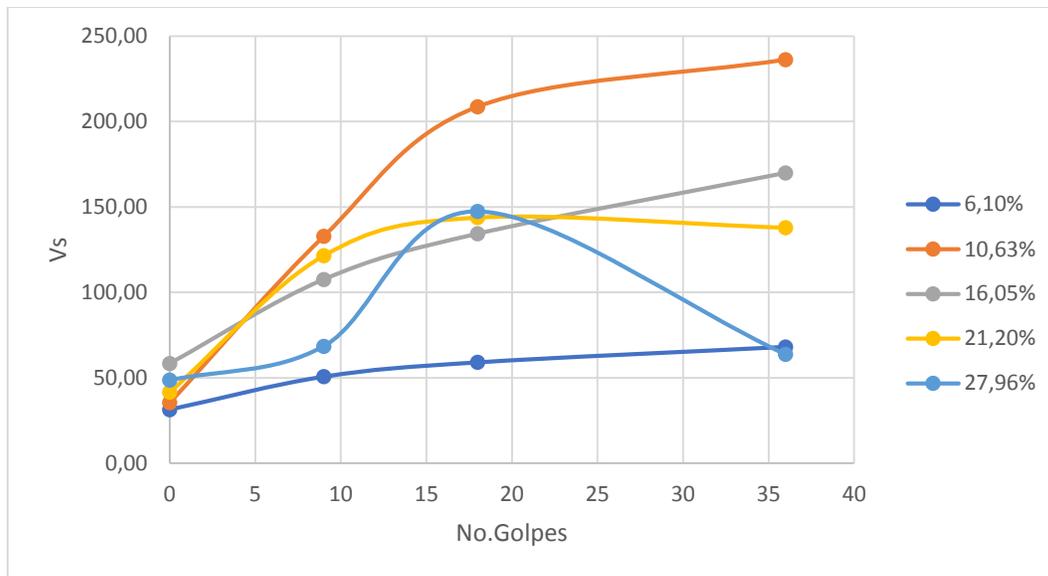


Figura 5.5. Comportamiento de las Vs con relación al grado de compactación del suelo, tomando constante la humedad promedio de ensayo.

La figura 5.4 muestra que a velocidad de onda Vp mayor en todos los ensayos se da a la humedad de 21.20% y una compactación de 36 golpes. Por otro lado, la figura 5.5 demuestra que la velocidad de onda Vs mayor de todos los ensayos se da a la humedad del 10.63% y una compactación de 36 golpes.

#### 5.4.4. Resumen de Resultados del Ensayo Dinámico del Suelo Considerando el Grado de Compactación

La tabla 5.20 mostrada a continuación es un resumen de las velocidades de ondas sísmicas y su relación con el porcentaje de humedad en el suelo, considerando como factor principal el grado de compactación de cada uno de los cinco ensayos realizados.

RESULTADOS DEL ENSAYO DINÁMICO DEL SUELO CONSIDERANDO EL GRADO DE COMPACTACIÓN.					
GRADO DE COMPACTACION	DENSIDAD HUMEDA Kg/m3	DENSIDAD SECA Kg/m3	HUMEDAD %	Vp m/s	Vs m/s
0	1135,42	1069,92	6,10%	119,46	31,37
	1128,47	1022,11	10,63%	182,44	35,37
	1100,69	949,35	16,05%	186,31	58,32
	1104,17	913,58	21,20%	133,63	41,51
	1486,11	1151,74	27,96%	159,82	48,54

9	1204,86	1135,18	6,10%	148,08	50,62
	1319,44	1188,83	10,63%	218,59	132,71
	1375,00	1182,55	16,05%	236,46	107,49
	1468,75	1208,24	21,20%	217,36	121,41
	1829,86	1435,66	27,96%	180,38	68,45
18	1256,94	1182,79	6,10%	161,46	59,02
	1375,00	1241,16	10,63%	329,46	208,61
	1388,89	1197,01	16,05%	360,12	134,29
	1562,50	1290,02	21,20%	440,83	143,8
	1909,72	1490,82	27,96%	255,56	147,37
36	1315,97	1242,80	6,10%	194,64	68,09
	1413,19	1280,71	10,63%	412,5	236,17
	1444,44	1245,80	16,05%	420	169,89
	1631,94	1345,67	21,20%	557,5	137,85
	1944,44	1527,84	27,96%	201,92	63,64

**Tabla 5.20.** Resultados del Ensayo Dinámico del Suelo Considerando el Grado de Compactación.

Los resultados obtenidos en la tabla 5.20 muestran que en las pruebas dinámicas a 0 y 9 golpes de compactación mientras la humedad en el suelo se mantenga menor a la humedad óptima, las velocidades  $V_p$  y  $V_s$  aumentan paulatinamente, pero al sobrepasar esta humedad las velocidades de ondas presentan una disminución. Esta variación se debe ya que a medida que aumenta el contenido de humedad en el material, el agua ocupa los espacios vacíos y a su vez dificulta la propagación de las ondas; además de que en estos ensayos la compactación es nula o insignificante para producir una adecuada unión entre las partículas sólidas.

A 18 y 36 golpes el esfuerzo de compactación, dentro de la evaluación es representativa ya que las velocidades  $V_p$  y  $V_s$  aumentan a medida que incrementa la humedad; excepto para el contenido de agua de 27,96 % en donde el líquido mismo interrumpe el registro de los movimientos sísmicos.

Estos valores se exponen de forma gráfica en la figura 5.6 y figura 5.7 presentados a continuación:

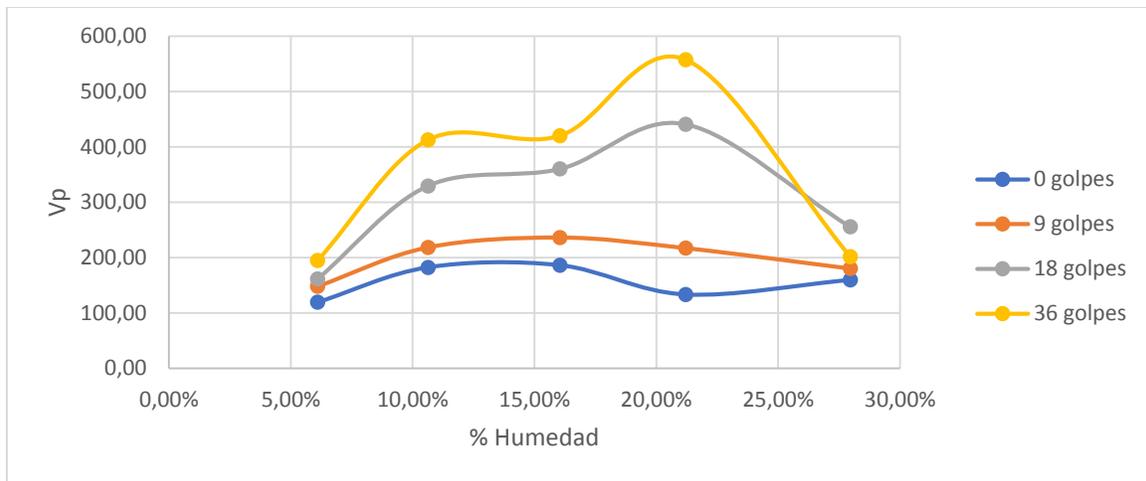


Figura 5.6. Comportamiento de las Vp con relación al porcentaje de humedad en el suelo, tomando constante el grado de compactación.

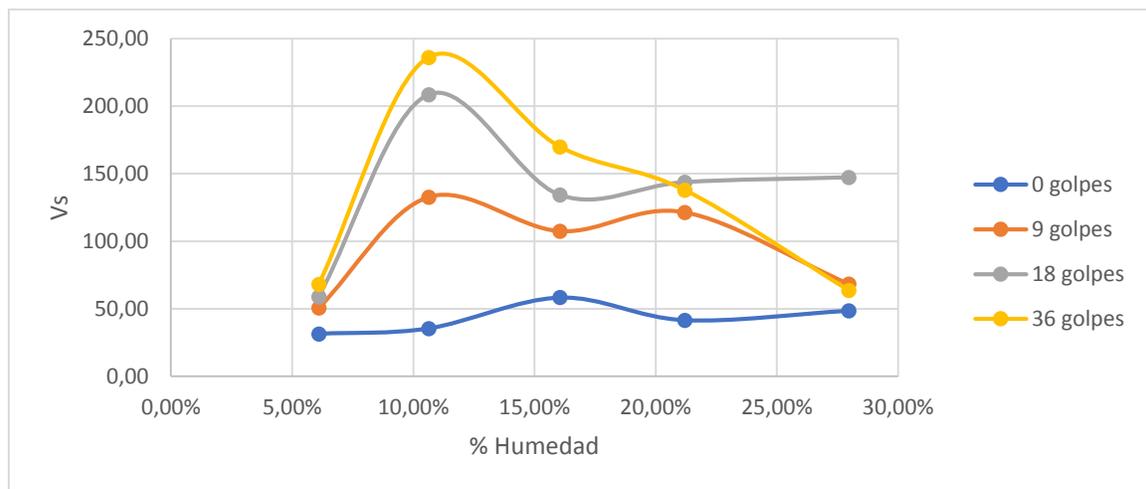


Figura 5.7. Comportamiento de las Vs con relación al porcentaje de humedad en el suelo, tomando constante el grado de compactación.

### 5.5. Análisis de Regresión Lineal

Para el análisis y adquisición de las regresiones lineales tanto múltiples como simples, no se consideran las velocidades de onda sísmica obtenidas en el ensayo dinámico del suelo a humedad promedio de 27,96% ya que este valor de contenido de agua además de superar el límite plástico del suelo de 25,47 %, ser muy cercano al valor de límite líquido de 29 % (con una diferencia de 1% de humedad), produce una correlación entre variables poco confiables, pues como se dijo durante el desarrollo de los resultados, el suelo en este punto llegó a un estado lodoso; siendo el aumento de agua el principal factor para que las velocidades de ondas presenten resultados poco fiables.



Para cumplir con los objetivos planteados en un comienzo, el análisis de regresión lineal se realiza por medio de la función “regresión” de Excel, que proporciona los valores estadísticos de correlación en cada una de los numerales que se presentan a continuación:

### 5.5.1. Correlaciones Múltiples

A continuación, se presentan las correlaciones múltiples obtenidas en cada uno de los análisis llevados a cabo como parte de la finalidad de este proyecto.

#### 5.5.1.1. Correlación entre Velocidades de Onda Sísmica $V_p$ y $V_s$ y Densidad Húmeda del Suelo

En la tabla 5.21 se presentan los resultados del modelo estadístico de regresión lineal múltiple entre  $V_p$ ,  $V_s$  y la densidad húmeda del suelo. Para realizar este análisis se tomaron los valores de la tabla 5.19.

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,86
Coefficiente de determinación $R^2$	0,74
Error típico	87,25
Observaciones	16

**Tabla 5.21.** Análisis estadístico de regresión entre Velocidades de Onda  $V_p$ ,  $V_s$  y la densidad húmeda del suelo.

El valor del coeficiente de determinación  $R^2$  es 0,75. Este coeficiente al ser el principal indicador de la fuerza de relación entre las variables consideradas, manifiesta que el modelo de regresión lineal múltiple conseguido (ecuación 5.1), es confiable para realizar predicciones y estimaciones de valores de densidad húmeda del suelo arenoso limoso, en base a observaciones de velocidades de ondas sísmicas (P y S).

$$y = 1036,95 + 0,9206 x_1 + 0,3792x_2$$

**Ecuación 5.1.** Correlación Lineal múltiple entre velocidades de onda sísmica  $V_p$ ,  $V_s$  y la densidad húmeda del suelo.

Donde:

$y$  = Densidad húmeda del suelo.

$x_1$  = Velocidades de ondas sísmicas principales ( $V_p$ ).

$x_2$  = Velocidades de ondas sísmicas secundarias ( $V_s$ ).

### 5.5.1.2. Correlación entre Velocidades de Onda Sísmicas $V_p$ y $V_s$ y Humedad a Diferentes Grados de Compactación

El estudio de correlación entre velocidades de onda sísmica  $V_p$ ,  $V_s$  y la humedad del suelo se ha clasificado en cuatro secciones considerando el grado de compactación del material. El grado de compactación establece la distribución de las partículas del suelo con respecto al contenido de vacíos, a la vez que obliga a las partículas a un contacto más íntimo entre sí. A partir de la tabla 5.20 se obtuvieron estos resultados.

#### ▪ 0 Golpes de Compactación (material suelto)

En la tabla 5.22 se presentan los resultados del modelo de regresión estadística múltiple entre  $V_p$ ,  $V_s$  y el porcentaje de humedad en el suelo; tomando en consideración 0 golpes de compactación o material suelto.

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,62
Coefficiente de determinación $R^2$	0,39
Error típico	0,08
Observaciones	4

**Tabla 5.22.** Resumen del modelo de regresión lineal múltiple entre velocidades de onda sísmica y humedad a 0 golpes de compactación.

El valor del coeficiente de determinación  $R^2$  es 0,39. Este coeficiente al sostener una cantidad baja, describe que la fuerza de relación entre las variables analizadas en esta sección es limitada; por lo que no se puede considerar como una referencia clave para realizar predicciones. Esto sucede debido a que, al colocar el material suelto dentro del molde de madera para los ensayos dinámicos, se crean espacios o vacíos de aire entre las partículas del suelo, lo cual no permite que las ondas sísmicas se transfieran de forma efectiva de partícula a partícula, obteniéndose por tanto datos poco confiables.

El modelo de regresión entre velocidades de onda sísmica  $V_p$ ,  $V_s$  y humedad del suelo a 0 impactos de compactación, está representada por la ecuación 5.2.

$$y = 0,0510 - 0,0005x_1 + 0,0042x_2$$

**Ecuación 5.2.** Correlación entre  $V_p$ ,  $V_s$  y humedad a 0 golpes de compactación.

Donde:

$y$  = Humedad del suelo.

$x_1$  = Velocidades de ondas sísmicas principales ( $V_p$ ).

$x_2$  = Velocidades de ondas sísmicas secundarias ( $V_s$ ).

### ▪ 9 Golpes de Compactación

En la tabla 5.23 se muestran los resultados del modelo de regresión múltiple entre  $V_p$ ,  $V_s$  y  $y$  el porcentaje de humedad, a 9 golpes de compactación en el suelo.

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,72
Coefficiente de determinación $R^2$	0,52
Error típico	0,07
Observaciones	4

**Tabla 5.23.** Resumen del modelo de regresión entre velocidades de onda sísmica y humedad a 9 golpes de compactación.

El valor del coeficiente de determinación  $R^2$  es 0,53. Este resultado mejora ligeramente con respecto al resultado anterior, en donde el material se encuentra suelto; esto sucede debido a que el suelo al estar sometido a compactación reduce el índice de vacíos entre sus moléculas; permitiendo que las ondas sísmicas se transmitan de mejor manera en el suelo. Luego aumenta la confiabilidad de los resultados.

El modelo de regresión entre velocidades de onda sísmica  $V_p$ ,  $V_s$  y humedad del suelo a 9 golpes de compactación, está representada por la ecuación 5.3.

$$y = -0,1175 + 0,0012x_1 - 0,0003x_2$$

**Ecuación 5.3.** Correlación entre  $V_p$ ,  $V_s$  y humedad a 9 golpes de compactación.

Donde:

$y$  = Humedad del suelo.

$x_1$  = Velocidades de ondas sísmicas principales ( $V_p$ ).

$x_2$  = Velocidades de ondas sísmicas secundarias ( $V_s$ ).

### ▪ 18 Golpes de Compactación

En la tabla 5.24 se exhiben los resultados del modelo de regresión lineal múltiple entre  $V_p$ ,  $V_s$  y el porcentaje de humedad; teniendo como punto principal los 18 golpes de compactación en el material.



Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,99
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,99
Error típico	0,00
Observaciones	4

**Tabla 5.24.** Resumen del modelo de regresión entre velocidades de onda sísmica y humedad a 18 golpes de compactación.

El valor del coeficiente de determinación  $R^2$  es 0,99. El valor de este resultado al ser semejante a 1 hace referencia a una correlación lineal perfecta entre las variables analizadas. En este apartado, el contenido de vacíos en el suelo se reduce a tal punto que las ondas sísmicas se propagan sin verse interrumpidas por el aire; obteniéndose resultados altamente confiables para realizar predicciones y estimaciones estadísticas, pues así lo determina dicho coeficiente.

El modelo de regresión entre velocidades de onda sísmica  $V_p$ ,  $V_s$  y humedad del suelo a 18 impactos de compactación, está representada por la ecuación 5.4.

$$y = -0,0217 + 0,0007x_1 - 0,0005x_2$$

**Ecuación 5.4.** Correlación entre  $V_p$ ,  $V_s$  y humedad a 18 golpes de compactación.

Donde:

$y$  = Humedad del suelo.

$x_1$  = Velocidades de ondas sísmicas principales ( $V_p$ ).

$x_2$  = Velocidades de ondas sísmicas secundarias ( $V_s$ ).

### ▪ 36 Golpes de Compactación

En la tabla 5.25 se señalan los resultados del modelo de regresión lineal múltiple entre  $V_p$ ,  $V_s$  y el porcentaje de humedad en el suelo; valorando como factor primordial 36 golpes de compactación en la muestra.

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,97
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,95
Error típico	0,02
Observaciones	4

**Tabla 5.25.** Resumen del modelo de regresión entre velocidades de onda sísmicas y humedad a 36 golpes de compactación.

El valor del coeficiente de determinación  $R^2$  es 0,96. Este valor determina que la correlación entre las variables estudiadas es altamente confiable y próxima a una relación lineal perfecta. Al igual

DANIEL SANTIAGO MUÑOZ ZEAS

JUAN DIEGO LARRIVA

BECERRA



que en la sección anterior, el grado de compactación otorgado al suelo reduce el porcentaje de vacíos contenidos en el material, lo cual produce que las ondas sísmicas se trasfieran sin impedimentos entre las moléculas del material; resultando por ende una relación altamente confiable para estimaciones estadísticas.

El modelo de regresión entre velocidades de onda sísmica  $V_p$ ,  $V_s$  y humedad del suelo a 36 golpes de compactación, está representada por la ecuación 5.5.

$$y = -0,0076 + 0,0005x_1 - 0,0003x_2$$

**Ecuación 5.5.** Correlación entre  $V_p$ ,  $V_s$  y humedad a 36 golpes de compactación.

Donde:

$y$  = Humedad del suelo.

$x_1$  = Velocidades de ondas sísmicas principales ( $V_p$ ).

$x_2$  = Velocidades de ondas sísmicas secundarias ( $V_s$ ).

### 5.5.2. Correlaciones Simples

En esta sección se da a conocer los resultados obtenidos de las correlaciones simples a partir de los valores de la tabla 5.19 y la tabla 5.20. En este punto se analiza la variación de las velocidades  $V_p$  y  $V_s$  por separado, con relación a la humedad y grado de compactación en el suelo. Los resultados de este análisis se presentan de manera resumida en las tablas 5.26 y 5.27.

TABLA RESUMEN DE REGRESIONES LINEALES SIMPLES		
Variables	Ecuación	$R^2$
$y$ = densidad húmeda; $x_1$ = $V_p$	$y = 1040,83 + 1,059 x_1$	0,740
$y$ = densidad húmeda; $x_1$ = $V_s$	$y = 1125,38 + 1,854 x_1$	0,516

**Tabla 5.26.** Resumen de correlaciones simples entre:  $V_p$  vs. densidad húmeda y  $V_s$  vs. densidad húmeda.

TABLA RESUMEN DE REGRESIONES LINEALES SIMPLES			
Variables	No. Golpes	Ecuación	R <sup>2</sup>
y= humedad; x1= Vp	0	y= 0,090+ 0,0003 x1	0,022
	9	y= - 0,1155+ 0,0012 x1	0,529
	18	y= - 0,035+ 0,0005 x1	0,89
	36	y= - 0,026+ 0,0004 x1	0,869
y= humedad; x1= Vs	0	y= 0,0015+ 0,0032 x1	0,337
	9	y= 0,0171+ 0,0011 x1	0,404
	18	y= 0,0844+ 0,00037 x1	0,119
	36	y= 0,1019+ 0,0002 x1	0,053

**Tabla 5.27.** Resumen de correlaciones simples entre: Vp vs. humedad y Vs vs. Humedad a diferentes grados de compactación.

El coeficiente de determinación  $R^2$  obtenido en cada una de las correlaciones simples es bajo, ello indica que la firmeza con la que las variables se relacionan es deficiente; por lo que desde el punto de vista estadístico emplear estos resultados para pronósticos matemáticos no es recomendable. Esto se produce debido a factores como: 1) el análisis se realiza con un número mucho menor de datos en comparación al estudio múltiple realizado en el apartado anterior, lo cual aumenta la dispersión de los datos (varianza), 2) por cuestiones de tiempo y recursos no se pudo aumentar el número de ensayos lo cual es un factor que influye en una cantidad insuficiente de observaciones. Así mismo, los resultados muestran que las correlaciones simples para Vs en comparación a las correlaciones simples para Vp tiene un coeficiente de relación más bajo cuando se aplica compactación al suelo, esto se ve influenciado principalmente por el contenido de humedad en el suelo, ya que el agua influye en el registro de las velocidades S (las ondas secundarias no se propagan transversalmente).



## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Un aspecto importante a tomar en consideración es el nivel de escala del ensayo realizado ya que la distancia entre el geófono receptor y el estárter y el tamaño del geófono pueden tener una diferencia de alrededor de un 40%, aspecto que afecta significativamente en la determinación de las velocidades reales de las ondas en el suelo.
- A medida que aumenta la energía de compactación y el porcentaje de humedad en el suelo areno limoso, las velocidades de ondas  $V_p$  y  $V_s$  incrementan; este crecimiento se ve contrastado ya que, para un contenido de humedad de 28 %, el registro de velocidades se ve afectado en sus resultados; por tanto, el contenido de agua relativamente alto es un factor de alteración en las mediciones.
- Para contenidos de humedad en el suelo menores a la humedad óptima, las velocidades de onda  $V_s$  aumentan, mientras que las velocidades de ondas  $V_p$  disminuyen; por otro lado, a humedades mayores a la humedad óptima en el suelo, las velocidades de onda  $V_p$  crecen, mientras que las velocidades de ondas  $V_s$  decrecen.
- Particularmente, las velocidades de ondas sísmicas  $V_s$  presentan una variación considerable en los resultados para mayores contenidos de humedad, esto se debe ya que los líquidos no admiten movimientos transversales o de corte.
- Cuando el suelo presenta un alto contenido de vacíos, los resultados obtenidos presentan un porcentaje elevado de error, pues el movimiento y la difusión uniforme de las ondas sísmicas en el suelo se ve afectado, debido a que no existe un contacto intrínseco entre las partículas que conforman el suelo.
- La hipótesis planteada en un inicio se cumple, como se observa en la Tabla 5.18. (Resultados del Ensayo Dinámico del Suelo Considerando Humedades Medias) a medida que aumenta la densidad del suelo en cada ensayo mientras las humedades de las muestras se encuentran por debajo del límite plástico, las velocidades de ondas P y S aumentan



progresivamente; excepto en las pruebas realizadas para  $V_s$  con 18 y 36 golpes de compactación con humedad del 21,20% en las cuales existe una mínima variación posiblemente como consecuencia de una falla ya sea en la lectura del tiempo, medición de la distancia entre geófonos e inclusive la uniformidad del grado de compactación del suelo, esta alteración se considera ínfima ya que se encuentra dentro del margen de error estimado para los resultados aquí presentados

- Si bien es cierto, los índices de confiabilidad de cada una de las relaciones planteadas en este proyecto entregaron valores altos, excepto para la relación de  $V_p$ ,  $V_s$  y humedad del suelo considerando el material suelto (0 golpes de compactación), no se puede generalizar el uso de las relaciones aquí obtenidas para todos los suelos del tipo areno - limosos, ya que las propiedades mecánicas de los suelos son particulares de cada uno.
  
- Dentro de los resultados de densidad seca obtenida en el suelo al momento de acondicionar el material para realizar los ensayos dinámicos, no se logró conseguir una densidad seca igual o semejante a la obtenida en el ensayo de compactación proctor modificado, esto sucede debido a que el volumen del molde (caja de madera reforzada) utilizado para estas pruebas es mucho mayor con respecto al volumen del molde usado en el ensayo proctor modificado. Teóricamente, para lograr en el suelo una energía de compactación igual o mayor a la energía de compactación proctor modificado es necesario realizar alrededor de 636 golpes por capa como se vio en el cálculo de la energía de compactación en el molde, lo cual para el ensayo aquí realizado es poco conveniente y viable, por los recursos mismos con los que se cuenta. Por tanto, se recomienda realizar pruebas similares utilizando un método distinto al planteado en este trabajo de titulación; y de esta forma poder obtener un análisis de correlación y comportamiento entre velocidades de onda sísmica y la humedad óptima del suelo.
  
- Del conjunto de relaciones planteadas en este proyecto, la correlación de velocidades de onda sísmica  $V_p$ ,  $V_s$  y humedad del suelo considerando una compactación de 18 golpes en el material, fue la que mejor resultado entregó. El coeficiente de determinación  $R^2$  para esta relación es 0,99, revelando una correspondencia lineal perfecta entre las variables



analizadas. La mejor correlación se produce a 18 y no a 36 golpes de compactación como se esperaría; la razón de esto es que, en suelos del tipo arenosos, a mayor compactación el material tiende a un comportamiento frágil en términos de su estructuración, ya que se llega a un punto en el que se supera la fricción interna de las partículas del suelo, forzándolas a moverse y a girar unas sobre otras. Este desplazamiento de material provoca una alteración en las partículas de suelo, que se deriva en un cambio de su granulometría.

- Se recomienda la realización de ensayos de sísmica de refracción en el punto de extracción del suelo areno limoso, y de esta manera comparar los resultados obtenidos en campo y los resultados de los ensayos en laboratorio aquí presentados; con el objetivo de obtener una correlación entre estos valores, así como un posterior análisis de su aplicación en la práctica.
- Se recomienda realizar análisis semejantes a los presentados en este trabajo usando equipo ultrasónico de alta capacidad u otro equipo que registre la propagación de las ondas para escala pequeña de ensayo; de esa forma se tendrá directamente resultados comparables con la aplicación real.



## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

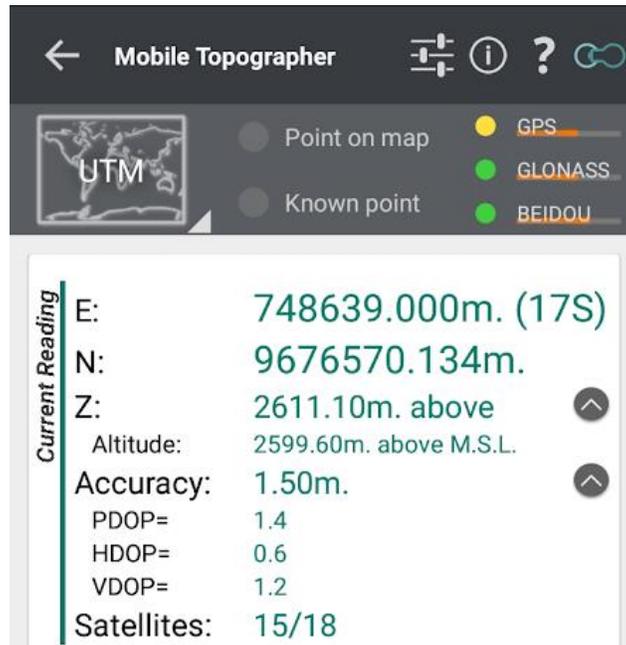
- Armas Novoa, R. (2002). Compactación de Suelos. La Habana, Cuba.
- Cardona, D., González, J., Rivera, M. & Cárdenas, E. (2013). Inferencia Estadística. Módulo de Regresión Lineal simple. Universidad del Rosario, Bogotá, Colombia.
- Carrillo, P. (2008). Influencia del Suelo en la Respuesta Sísmica de Estructuras. Caracas, Venezuela.
- Chammas, R., Abraham, O., Cote, P., Pedersen, H., Semblat, J. (2003). Characterization of Heterogeneous Soils Using Surface Waves. Homogenization and Numerical Modeling. International Journal of Geomechanics, 3(1).
- Chelotti, L., Acosta, N., Foster, M. (2009). Cátedra de Geofísica Aplicada. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Argentina.
- Crespo Villalaz, C. (2004). Mecánica de Suelos y Cimentaciones. México: Limusa, S. A.
- Das, Braja M. (2001). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. Thomson Learning, primera edición.
- González, M. (2001). El Terreno. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña, SL.
- López, J., Mejía, J., Vega, N. (2008). Aplicación del Método de Refracción Sísmica para la Determinación de Velocidades de Ondas P. Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador.
- Millones, J. (2005). Localización de un Sismo utilizando una Estación de tres Componentes. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
- Rico, A., Del Castillo, H. (2005). La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres. México: Limusa.
- Roller, D. E., Blum, R. (1983). Física. Mecánica, Ondas y Termodinámica. Barcelona, España: Reverté S. A., cap. 18.
- Saavedra, O. (2013). Análisis de Ondas Sísmicas en Entorno Matlab. Instituto Politécnico Nacional, México D. F., México.
- Tomás, R., Herrera, G., Delgado, J. & Peña, F. (2009). Subsistencia del Terreno.



- Torres, H. (2006). Manual de Ensayos Normalizados de Mecánica de Suelos I. Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador.
- Villamizar, J. D. J. (2011). Métodos Geofísicos Aplicados a la Caracterización de Suelos. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Warren, F. (1985). Física de Suelos. Manual de laboratorio. San José, Costa Rica: IICA.
- Webster, A. (2000). Estadística Aplicada a los Negocios y la Economía. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.
- ASTM D2216. (2010). Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D422-63. (2007). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4318. (2017). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D2487. (2017). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D1557. (2000). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> - 2,700 kN-m/m<sup>3</sup>). ASTM International, West Conshohocken, PA.

## 8. ANEXOS

### 8.1. Obtención de la muestra de suelo.





DANIEL SANTIAGO MUÑOZ ZEAS  
JUAN DIEGO LARRIVA  
BECERRA

## 8.2. Registro fotográfico de ensayo dinámico





DANIEL SANTIAGO MUÑOZ ZEAS  
JUAN DIEGO LARRIVA  
BECERRA



DANIEL SANTIAGO MUÑOZ ZEAS  
JUAN DIEGO LARRIVA  
BECERRA

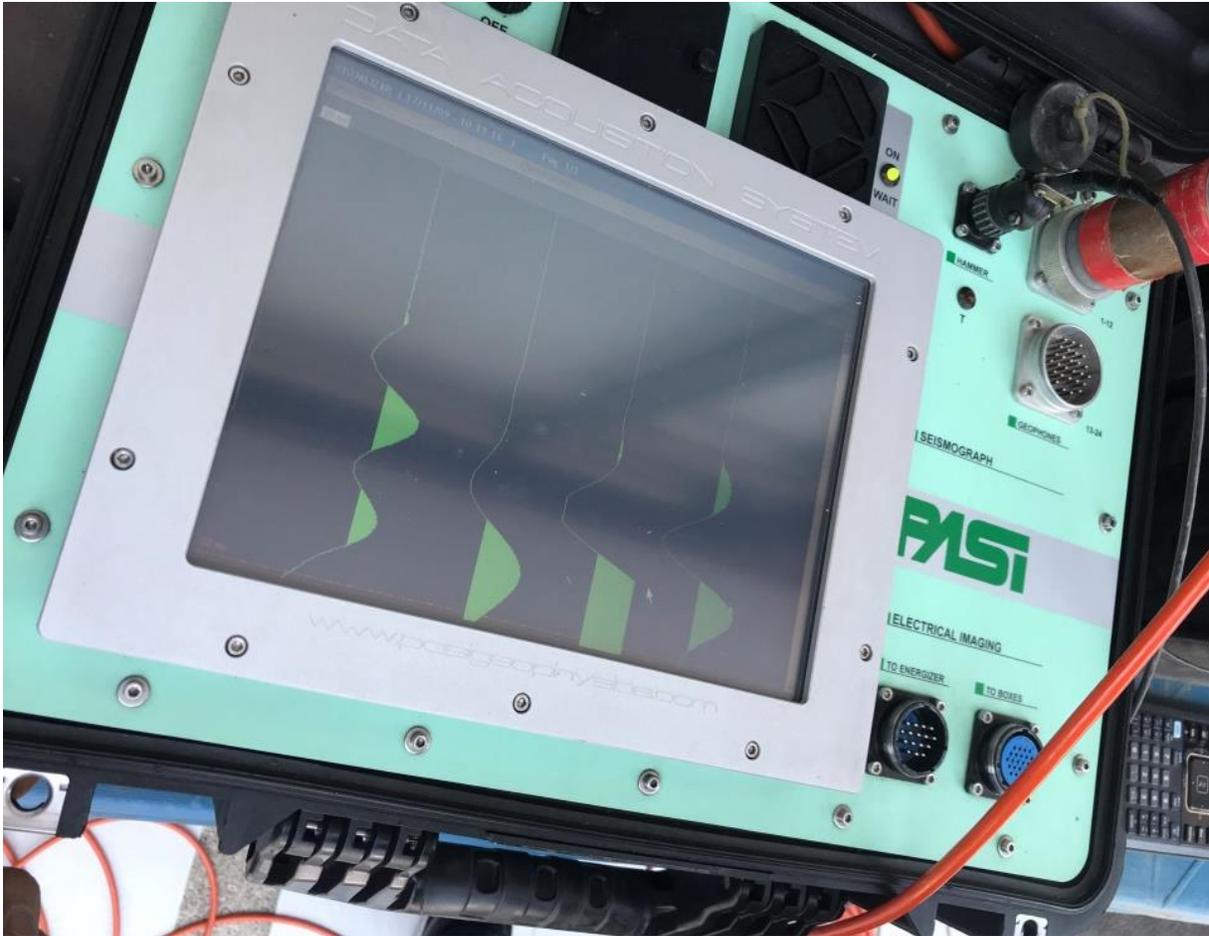




DANIEL SANTIAGO MUÑOZ ZEAS  
JUAN DIEGO LARRIVA  
BECERRA



DANIEL SANTIAGO MUÑOZ ZEAS  
JUAN DIEGO LARRIVA  
BECERRA



DANIEL SANTIAGO MUÑOZ ZEAS  
JUAN DIEGO LARRIVA  
BECERRA

## 8.3. Registro de ensayos dinámicos – Hojas de laboratorio

Juan Diego Larriva B.  
Daniel Santiago Muñoz Zeas.



Hoja 3

HOJA DE LABORATORIO				
ENSAYOS DE HUMEDAD				
<b>ENSAYO 1</b>				
Fecha:				
Identificación	Peso molde	Peso molde + material Hum	Peso molde + material seco	Humedad
A1	42,40	40,83	69,19	6,12
A2	47,04	58,23	57,63	6,14
A3	45,70	59,43	58,62	6,27
A4	39,51	51,56	50,89	5,89
				Prom 6,10%
<b>ENSAYO 2</b>				
Fecha:				
Identificación	Peso Molde	Peso Molde + material Hum	Peso molde + material seco	Humedad
B1	44,60	57,65	56,42	10,41
B2	42,06	61,86	50,90	10,99
B3	40,71	56,12	56,62	10,78
B4	37,72	56,60	54,83	10,34
				Prom 10,63
<b>ENSAYO 3</b>				
Fecha:				
Identificación	Peso Molde	Peso Molde + material Hum	Peso molde + material seco	Humedad
C1	50,36	59,96	58,64	15,94
C2	39,22	52,03	49,42	16,27
C3	40,46	52,91	51,19	16,03
C4	40,86	55,33	53,34	15,95
				Prom 16,05
<b>ENSAYO 4</b>				
Fecha:				
Identificación	Peso Molde	Peso Molde + material Hum	Peso molde + material seco	Humedad
D1	47,43	65,10	62,05	20,86
D2	44,57	59,69	57,00	21,56
D3	29,29	53,11	50,70	24,12
D4	41,60	51,12	49,45	21,27
				Prom 21,20
<b>ENSAYO 5</b>				
Fecha:				
Identificación	Peso Molde	Peso Molde + material Hum	Peso molde + material seco	Humedad
E1	44,57	64,97	60,33	29,03
E2	42,07	65,28	60,28	27,46
E3	40,84	67,19	61,41	29,10
E4	37,69	61,54	56,43	27,27
				Prom 27,96

DANIEL SANTIAGO MUÑOZ ZEAS  
JUAN DIEGO LARRIVA  
BECERRA



Juan Diego Larriva B.  
Daniel Santiago Muñoz Zeas.



Hoja 1

HOJA DE LABORATORIO						
ENSAYO DE DENSIDAD						
<b>ENSAYO 1</b>						
Fecha	4/12/17	Volumen Caja	0,0288 m <sup>3</sup>	Peso caja	4,6 Kg	
Ident.	Peso caja + material	Peso material	Densidad Humeda	Humedad	Densidad Seca	kg/m <sup>3</sup>
0 A1	37,30 kg	32,70 kg	1135,42 kg/m <sup>3</sup>	6,12 %	1069,92	
9 A2	39,30	34,70	1204,86	6,14	1135,18	
18 A3	40,80	36,20	1256,94	6,27	1182,79	
36 A4	42,50	37,90	1315,97	5,39	1242,80	
						Prom 6,10
<b>ENSAYO 2</b>						
Fecha	5/12/17	Volumen Caja		Peso caja		
Ident.	Peso caja + material	Peso material	Densidad Humeda	Humedad	Densidad Seca	kg/m <sup>3</sup>
0 B1	37,10	22,50	1123,47	10,41	1022,11	
9 B2	42,60	38,00	1319,44	10,99	1188,83	
18 B3	44,20	39,60	1335,00	10,78	1241,16	
36 B4	45,30	40,70	1413,19	10,34	1280,71	
						Prom 10,63
<b>ENSAYO 3</b>						
Fecha	6/12/17	Volumen Caja		Peso caja		
Ident.	Peso caja + material	Peso material	Densidad Humeda	Humedad	Densidad Seca	kg/m <sup>3</sup>
0 C1	36,30	31,70	1100,69	15,94	949,35	
9 C2	44,20	39,60	1335,00	16,27	1182,55	
18 C3	44,60	40,00	1338,89	16,03	1197,01	
36 C4	46,20	41,60	1424,44	15,95	1245,80	
						Prom 16,05
<b>ENSAYO 4</b>						
Fecha	7/12/17	Volumen Caja		Peso caja		
Ident.	Peso caja + material	Peso material	Densidad Humeda	Humedad	Densidad Seca	kg/m <sup>3</sup>
0 D1	36,40	31,80	1104,17	20,86	913,58	
9 D2	46,90	42,30	1468,75	21,56	1208,24	
18 D3	49,60	45,00	1562,50	21,12	1290,02	
36 D4	51,60	47,00	1631,94	21,27	1345,67	
						Prom 21,20
<b>ENSAYO 5</b>						
Fecha	8/12/17	Volumen Caja		Peso caja		
Ident.	Peso caja + material	Peso material	Densidad Humeda	Humedad	Densidad Seca	kg/m <sup>3</sup>
0 E1	47,40	42,80	1486,11	29,03	1151,74	
9 E2	57,30	52,70	1829,86	27,46	1436,66	
18 E3	59,60	55,00	1909,72	25,10	1490,82	
36 E4	60,60	56,00	1944,44	27,27	1527,84	
						Prom 27,96

Juan Diego Larriva B.  
Daniel Santiago Muñoz Zeas.

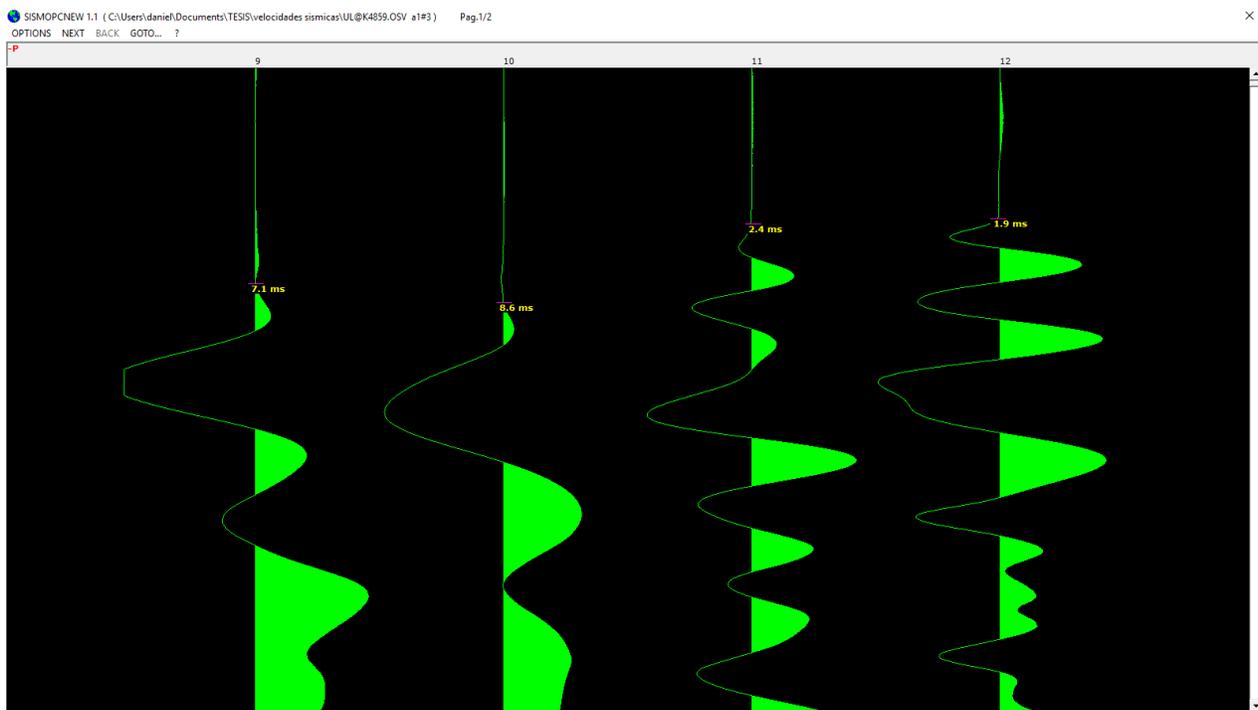
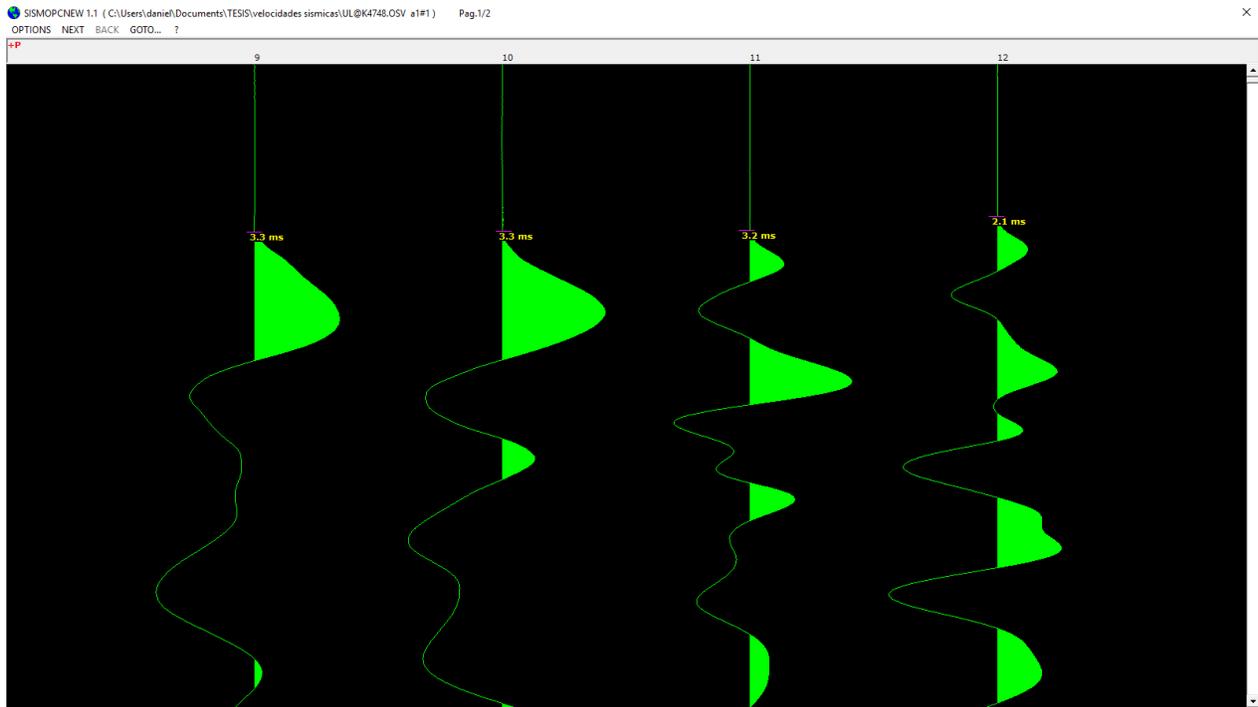


Hoja 2

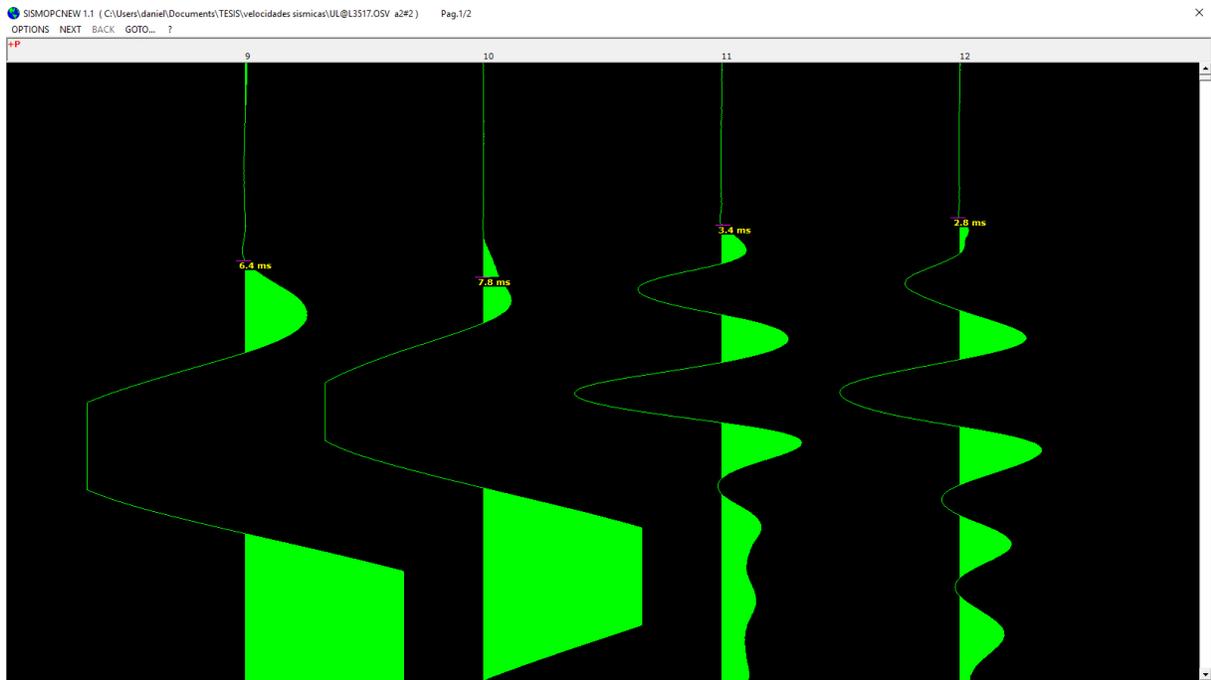
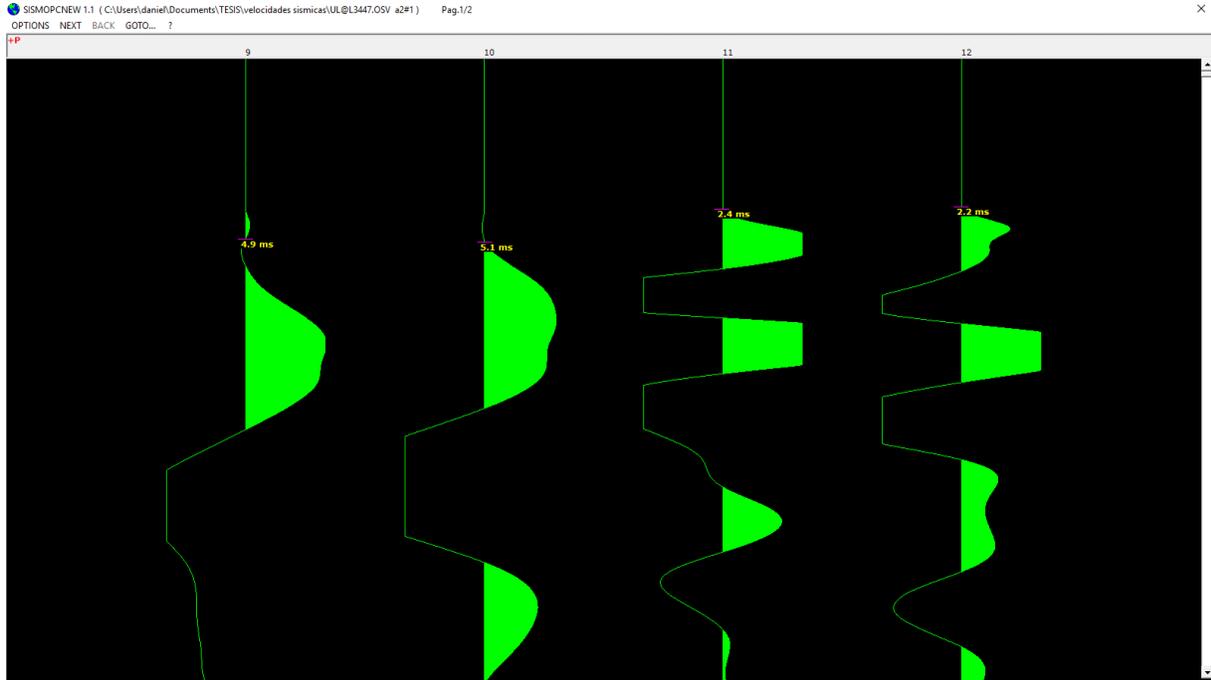
HOJA DE LABORATORIO					
ENSAYOS DINÁMICOS					
ENSAYO 1					
Fecha:					
Identificación	No. Golpes	Dist. Geofono 12	Dist. Geofono 11	Dist. Geofono 10	Dist. Geofono 9
A <sub>1</sub>	0	17 cm	23,50 cm	22 cm	15 cm
A <sub>2</sub>	9	19	24,00	26,00	18,5
A <sub>3</sub>	18	20	25,00	26,00	19,0
A <sub>4</sub>	36	22,00	26,5	27,00	19,5
ENSAYO 2					
Fecha:					
Identificación	No. Golpes	Dist. Geofono 12	Dist. Geofono 11	Dist. Geofono 10	Dist. Geofono 9
B <sub>1</sub>	0	21,5	26,00	26,00	23,00
B <sub>2</sub>	9	21,0	26,5	27,00	21,5
B <sub>3</sub>	18	24,5	27,00	28,5	23,00
B <sub>4</sub>	36	20,00	25,05	28,00	23,05
ENSAYO 3					
Fecha:					
Identificación	No. Golpes	Dist. Geofono 12	Dist. Geofono 11	Dist. Geofono 10	Dist. Geofono 9
C <sub>1</sub>	0	22,00	26,05	27,05	23,00
C <sub>2</sub>	9	20,05	26,00	27,05	22,05
C <sub>3</sub>	18	20,05	26,05	27,00	21,05
C <sub>4</sub>	36	22,00	28,00	28,05	22,05
ENSAYO 4					
Fecha:					
Identificación	No. Golpes	Dist. Geofono 12	Dist. Geofono 11	Dist. Geofono 10	Dist. Geofono 9
D <sub>1</sub>	0	23,00	26,05	27,00	19,00
D <sub>2</sub>	9	20,00	25,05	27,00	21,00
D <sub>3</sub>	18	22,00	26,05	27,00	20,05
D <sub>4</sub>	36	23,00	27,00	28,00	21,00
ENSAYO 5					
Fecha:					
Identificación	No. Golpes	Dist. Geofono 12	Dist. Geofono 11	Dist. Geofono 10	Dist. Geofono 9
E <sub>1</sub>	0	22,00	26,00	26,00	19,00
E <sub>2</sub>	9	18,00	23,05	24,00	20,00
E <sub>3</sub>	18	23,05	27,05	27,05	24,00
E <sub>4</sub>	36	22,00	26,05	27,00	20,00



### 8.4. Registro de tiempos en el equipo sísmico

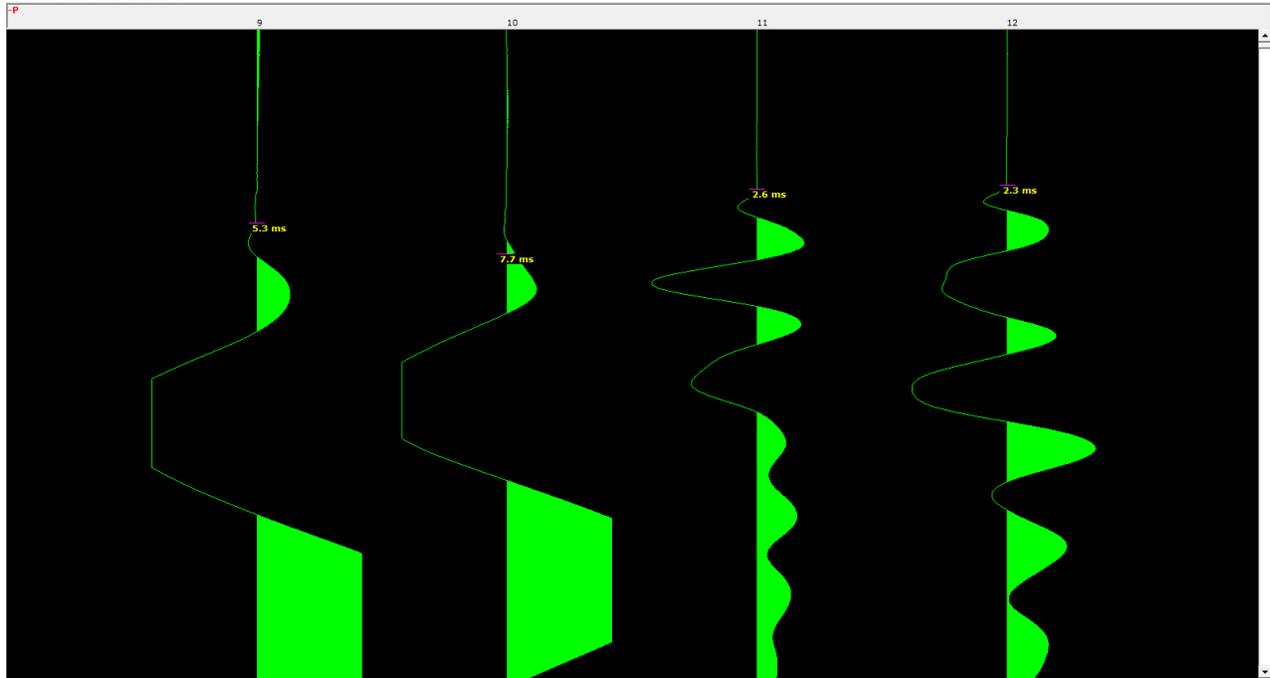


DANIEL SANTIAGO MUÑOZ ZEAS  
JUAN DIEGO LARRIVA  
BECERRA

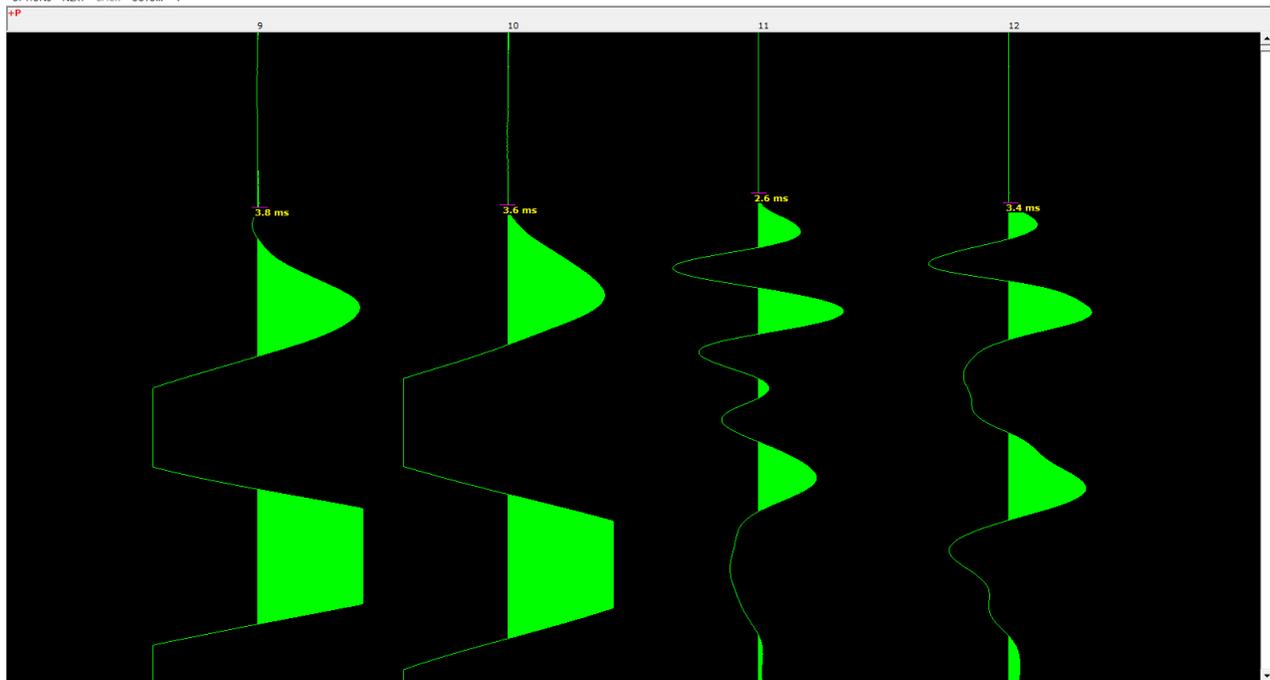




SISMOPCNEW 1.1 ( C:\Users\daniel\Documents\TESIS\velocidades sismicas\UL@L3612.OSV a2#3 ) Pag.1/2  
OPTIONS NEXT BACK GOTO... ?



SISMOPCNEW 1.1 ( C:\Users\daniel\Documents\TESIS\velocidades sismicas\UL@M0604.OSV a3#1 ) Pag.1/2  
OPTIONS NEXT BACK GOTO... ?



DANIEL SANTIAGO MUÑOZ ZEAS  
JUAN DIEGO LARRIVA  
BECERRA