

UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

“ESTUDIO DE LAS VELOCIDADES SÍSMICAS DE UN SUELO ARCILLO
LIMOSO, CON DIFERENTES GRADOS DE COMPACTACIÓN Y HUMEDAD
MEDIANTE SISMÓGRAFO”

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVÍL

AUTORES:

PABLO EDUARDO LARRIVA CASTILLO

C.I. 0105763080

SAMUEL ESTEBAN SÁNCHEZ ORDÓÑEZ

C.I. 0105746796

DIRECTOR:

ING. BENIGNO ALFREDO VÁZQUEZ LÓPEZ, M.Sc.

C.I. 0101815892

CUENCA – ECUADOR

2018



Resumen.

Dentro de los métodos sísmicos de la geofísica aplicada se encuentra el de refracción sísmica, que permite conocer varios parámetros del suelo a partir de la medición de sus velocidades de propagación de onda sísmica. Por estas razones, es posible determinar relaciones entre parámetros del suelo con sus velocidades sísmicas. En este trabajo de titulación se analiza la relación de dichas velocidades con dos parámetros de un suelo clasificado como arcillo limoso: peso unitario húmedo y porcentaje de humedad. La investigación partió de buscar lugares cercanos a la ciudad de Cuenca para tomar muestras e identificar un suelo arcillo limoso. Luego de determinar la ubicación de un suelo con estas características dentro de la zona de Cuenca y Azogues, se obtuvo la cantidad suficiente de material para, en laboratorio, realizar el ensayo sísmico, variando tanto la humedad como el grado de compactación. En este método se mide el tiempo de propagación de las ondas elásticas entre un sitio donde se generan dichas ondas y la primera llegada de éstas a diferentes puntos de recepción ubicados a una distancia preestablecida. Se utilizaron geófonos horizontales para el registro de velocidades V_s y geófonos verticales para el registro de velocidades V_p . Con estos resultados fue posible obtener un modelo para determinar el peso unitario húmedo de un suelo arcillo limoso, a partir de las velocidades V_p y V_s . Gracias a estos modelos resultantes, así como a un análisis de la variabilidad de las velocidades sísmicas del suelo en estudio es posible afirmar que mientras mayores sean las velocidades sísmicas del suelo en estudio mayor será su peso unitario.

Palabras Clave:

Geofísica, refracción sísmica, suelo, arcillo limoso, velocidad sísmica, parámetros, densidad, peso unitario, humedad.



Abstract.

Within the seismic methods of applied geophysics is the seismic refraction, which allows knowing several soil parameters from the measurement of their seismic wave propagation velocities. For these reasons, it is possible to determine relationships between soil parameters and their seismic velocities. In this titration work, the relationship of these speeds with two parameters of a soil classified as silty clay is analyzed: wet unit weight and humidity percentage. The investigation started by looking for places near the city of Cuenca to take samples and identify a silty clay. After determining the location of a soil with these characteristics within the area of Cuenca and Azogues, a sufficient amount of material was obtained to carry out the seismic test in the laboratory, varying both the humidity and the degree of compaction. In this method, the propagation time of the elastic waves is measured between a site where said waves are generated and the first arrival of these waves at different reception points located at a pre-established distance. Horizontal geophones were used to record velocities V_s and vertical geophones for the recording of velocities V_p . With these results it was possible to obtain a model to determine the wet unit weight of a silty clay, from the velocities V_p and V_s . Thanks to these resulting models, as well as to an analysis of the variability of the seismic velocities of the soil under study it is possible to affirm that the higher the seismic velocities of the soil in the study, the higher its unit weight.

Keywords:

Geophysics, seismic refraction, soil, silt, clay, seismic velocity, parameters, density, unit weight, humidity.



Contenido

Resumen 2

Abstract..... 3

Índice de tablas 9

Índice de ilustraciones. 12

Índice de ecuaciones..... 15

Agradecimientos..... 21

Dedicatoria..... 22

Dedicatoria..... 23

Capítulo 1 24

Introducción y área de estudio..... 24

 1.1. Introducción..... 24

 1.2. Objetivos..... 25

 1.2.1. Objetivo General..... 25

 1.2.2. Objetivos Unitarios..... 26

 1.3. Ubicación del área de estudio. 27

 1.4. Geología del área de estudio. 28

 1.5. Ubicación definitiva de los sectores de extracción de los suelos..... 29

Capítulo 2: 30

Marco teórico..... 30

 2.1. Análisis mecánico del suelo (Granulometría)..... 30



2.1.1.	Análisis por cribado (Tamizado).....	30
2.1.2.	Curva de distribución granulométrica.	32
2.2.	Límites de Atterberg.	32
2.2.1.	Límite Líquido.....	33
2.2.2.	Límite Plástico.....	33
2.2.3.	Carta de Plasticidad.	33
2.3.	Clasificación de suelos.....	35
2.3.1.	Clasificación basada en la granulometría.	35
2.3.2.	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.).....	36
2.4.	Compactación de suelos.....	36
2.5.	Ondas sísmicas.....	38
2.5.1.	Ondas de compresión o primarias.	38
2.5.2.	Ondas de corte o secundarias.....	40
2.6.	Registro sísmico.....	40
2.6.1.	Principio de Huygens.	41
2.6.2.	Refracción: Ley de Snell.	42
2.6.3.	Práctica del método de refracción sísmica.	43
2.7.	Análisis de regresión entre variables.	45
2.7.1.	Coefficiente de correlación.	45
2.7.2.	Regresión lineal y curvilínea.	45
Capítulo 3:	47
Materiales y métodos.....		47



3.1.	Equipo y Procedimiento para la preparación de muestras a ensayar.	48
3.2.	Ensayo para la determinación del porcentaje de Humedad.....	48
3.3.	Granulometría.	49
3.4.	Límites de Atterberg.	50
3.4.1.	Equipo y procedimiento para el ensayo de Límite Líquido.	50
3.4.2.	Equipo y procedimiento para el ensayo de Límite Plástico	51
3.5.	Clasificación De Suelos.	52
3.6.	Ensayo de compactación Proctor Modificado.	56
3.6.1.	Equipo y procedimiento para el ensayo de Proctor Modificado método A.	56
3.7.	Equipo y procedimiento para la preparación del suelo para la medición de las velocidades sísmicas.	58
3.8.	Ensayo sísmico.	59
3.9.	Equipo y procedimiento para el ensayo sísmico.	59
3.9.1.1.	Correlación entre variables.	63
3.9.2.	Correlación con Excel.	63
3.9.3.	Correlación con IBM SPSS Statistics.....	64
Capítulo 4	69
Resultados y Discusión	69
4.1.	Granulometría.	69
4.1.1.	Curva de distribución granulométrica.	71
4.2.	Límites de Atterberg.	73
4.2.1.	Límite Líquido.....	74
4.2.2.	Límite Plástico.....	77



4.3.	Clasificación de Suelos.....	78
4.4.	Compactación De Suelos.....	80
4.5.	Ensayo sísmico.....	81
4.6.	Correlación entre peso unitario húmedo y velocidades sísmicas usando el software Excel.....	84
4.7.	Correlación entre peso unitario húmedo y velocidades sísmicas usando el software IBM SPSS Statistics.....	85
4.8.	Correlación entre Humedad y Velocidades sísmicas usando el software Excel.	92
4.8.1.	Correlación entre humedad y velocidades sísmicas para muestras con 0 golpes por capa.....	92
4.8.2.	Correlación entre humedad y velocidades sísmicas para muestras con 9 golpes por capa.....	96
4.8.3.	Correlación entre humedad y velocidades sísmicas para muestras con 18 golpes por capa.....	99
4.8.4.	Correlación entre humedad y velocidades sísmicas para muestras con 36 golpes por capa.....	102
4.9.	Correlación entre humedad y velocidades sísmicas usando el software IBM SPSS Statistics.....	106
4.9.1.	Análisis de correlación de Spearman.....	106
4.9.2.	Análisis de regresión lineal múltiple entre humedad y velocidades sísmicas (V_p y V_s).	108
4.9.3.	Análisis de regresión simple entre humedad y V_p	112
4.9.4.	Análisis de regresión simple entre humedad y V_s	114



4.9.5. Análisis de regresión lineal múltiple entre humedad con velocidades sísmicas y peso unitario húmedo.....	118
Capítulo 5	122
Conclusiones y recomendaciones	122
Bibliografía.....	125



Índice de tablas

Tabla 1: Ubicación geográfica del primer sector de extracción de muestra de suelo. ... 29

Tabla 2: Ubicación geográfica del segundo sector de extracción de muestra de suelo.. 29

Tabla 3: Ubicación geográfica del tercer sector de extracción de muestra de suelo. 29

Tabla 4: Número de tamices y su respectiva abertura. 31

Tabla 5: Rangos usuales de variación de la velocidad de compresión en diversos tipos de materiales geológicos..... 39

Tabla 6: Símbolos de grupo para suelos finos. 54

Tabla 7: Especificaciones para la prueba Proctor modificada..... 56

Tabla 8: Granulometría de muestra de suelo sector El Valle. 69

Tabla 9: Granulometría de muestra de suelo sector Santa Ana. 70

Tabla 10: Granulometría de muestra de suelo sector Cojitambo. 70

Tabla 11: Resultados de límite líquido de cada prueba de acuerdo al procedimiento del ensayo de humedad para muestra de suelo sector El Valle. 74

Tabla 12: Resultados para límite líquido de cada prueba de acuerdo al procedimiento del ensayo de humedad para muestra de suelo sector Santa Ana..... 75

Tabla 13: Resultados para límite líquido de cada prueba de acuerdo al procedimiento del ensayo de humedad para muestra de suelo sector Cojitambo. 76

Tabla 14: Resultados para límite plástico de acuerdo al procedimiento del ensayo de humedad de El Valle..... 77

Tabla 15: Resultados para límite plástico de acuerdo al procedimiento del ensayo de humedad de Santa Ana. 78

Tabla 16: Resultados para límite plástico de acuerdo al procedimiento del ensayo de humedad de Cojitambo..... 78



Tabla 17: Resultados clasificación de suelos (suelo sector El Valle).	79
Tabla 18: Resultados clasificación de suelos (suelo sector Santa Ana).	79
Tabla 19: Resultados clasificación de suelos (suelo sector Cojitambo).	79
Tabla 20. Resultados de ensayo Próctor modificado para muestra de suelo sector Santa Ana.	80
Tabla 21: Resultados de medición de velocidades sísmicas (V_p y V_s).	82
Tabla 22: Resultados de medición de velocidades sísmicas corregidos.	83
Tabla 23: Resumen del modelo entre Velocidad y Peso Unitario (Excel).	85
Tabla 24: Análisis de correlación de Spearman entre las variables: Peso unitario húmedo, velocidad de onda primaria (V_p) y velocidad de onda secundaria (V_s).	86
Tabla 25: Coeficientes del modelo de regresión lineal múltiple entre Peso unitario húmedo, V_s y V	87
Tabla 26: Resumen del modelo de regresión lineal múltiple entre Peso unitario húmedo, V_s y V	87
Tabla 27: Resultados de regresión simple entre peso unitario húmedo y V_p	88
Tabla 28: Resultados de correlación entre peso unitario húmedo y V_s	90
Tabla 29: Humedad vs. Velocidad; 0 golpes.	92
Tabla 30: Resumen del modelo entre Velocidades y Humedad (0 golpes).	93
Tabla 31: Humedad Vs. Velocidad; 9 golpes.	96
Tabla 32: Resumen del modelo entre Velocidad y Humedad (9 golpes).	96
Tabla 33: Humedad Vs. Velocidad; 18 golpes.	99
Tabla 34: Resumen del modelo entre Velocidades y Humedad (18 golpes).	100
Tabla 35: Humedad Vs. Velocidad; 36 golpes.	103
Tabla 36: Resumen del modelo entre Velocidades y Humedad (36 golpes).	103



Tabla 37: Resultados del análisis de correlación de Spearman entre las variables humedad, Vp y Vs, para los ensayos de 0 golpes / capa. 106

Tabla 38: Resultados del análisis de correlación de Spearman entre las variables humedad, Vp y Vs, para los ensayos de 9 golpes / capa. 107

Tabla 39: Resultados del análisis de correlación de Spearman entre las variables humedad, Vp y Vs, para los ensayos de 18 golpes / capa. 107

Tabla 40: Resultados del análisis de correlación de Spearman entre las variables humedad, Vp y Vs, para los ensayos de 36 golpes / capa. 108

Tabla 41: Coeficientes del modelo de regresión lineal múltiple entre humedad, Vp y Vs para 0 golpes / capa. 109

Tabla 42: Resultados del modelo de regresión lineal múltiple entre humedad, Vp y Vs para 0 golpes / capa. 110

Tabla 43: Modelos de regresión lineal múltiple para cada grupo de golpes / capa. 110

Tabla 44: Resultados del modelo de regresión lineal múltiple entre humedad, Vp y Vs para cada grupo de golpes / capa. 111

Tabla 45: Resultados del modelo de regresión simple entre humedad y Vp para cada grupo de golpes / capa. 112

Tabla 46: Resultados del modelo de regresión simple entre humedad y Vs para cada grupo de golpes / capa. 115

Tabla 47: Resultados definitivos de modelo de regresión entre humedad y velocidades sísmicas para cada grupo de golpes / capa. 118

Tabla 48: Coeficientes del modelo de regresión lineal múltiple entre humedad con velocidades sísmicas y peso unitario húmedo.....121



Índice de ilustraciones.

Ilustración 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio.	27
Ilustración 2. Formación Biblián (Zonas de afloramiento)	28
Ilustración 3. Serie de tamices para prueba de laboratorio.....	31
Ilustración 4. Estados del suelo y límites de Atterberg.	33
Ilustración 5. Carta de plasticidad propuesta por Casagrande (1932).	34
Ilustración 6. Clasificación de partículas en función de sus tamaños.	35
Ilustración 7. Curva de Compactación.	37
Ilustración 8. Ondas de compresión o primarias.	39
Ilustración 9. Componentes de la velocidad de la onda de corte.....	40
Ilustración 10. Refracción de ondas elásticas al atravesar la superficie de separación. .	42
Ilustración 11. Carta de plasticidad.	54
Ilustración 12. Nombres de grupo de suelos finos inorgánicos.....	55
Ilustración 13. Caja utilizada en el ensayo.	58
Ilustración 14. Equipo utilizado en ensayo sísmico.	60
Ilustración 15. Configuración de geófonos para ensayo sísmico.	61
Ilustración 16. Determinación de tiempos de llegada de onda mediante software SISMO PC.	62
Ilustración 17. Procedimiento Software IBM.....	65
Ilustración 18. Procedimiento Software IBM.....	65
Ilustración 19. Procedimiento Software IBM.....	66
Ilustración 20. Procedimiento Software IBM.....	66
Ilustración 21. Procedimiento Software IBM.....	67
Ilustración 22. Procedimiento Software IBM.....	68



Ilustración 23. Curva Granulométrica Suelo sector El Valle. 72

Ilustración 24. Curva Granulométrica Suelo sector Santa Ana. 72

Ilustración 25. Curva Granulométrica Suelo sector Cojitambo..... 73

Ilustración 26. Gráfico semilogarítmico correspondiente a los puntos obtenidos de las 4 pruebas y su curva de flujo de El Valle. 75

Ilustración 27. Gráfico semilogarítmico correspondiente a los puntos obtenidos de las 4 pruebas y su curva de flujo de Santa Ana..... 76

Ilustración 28. Gráfico semilogarítmico correspondiente a los puntos obtenidos de las 4 pruebas y su curva de flujo de Cojitambo. 77

Ilustración 29. Humedad vs. Peso Unitario. 81

Ilustración 30. Gráfico de modelo de regresión cúbico entre peso unitario húmedo y V_p .
..... 89

Ilustración 31. Gráfico de modelo de regresión cúbico entre peso unitario húmedo y V_s .
..... 91

Ilustración 32. Humedad Vs. V_p (0 golpes). 94

Ilustración 33. Humedad Vs. V_s (0 golpes)..... 95

Ilustración 34. Humedad Vs. V_p (9 golpes). 97

Ilustración 35. Humedad Vs. V_s (9 golpes)..... 98

Ilustración 36. Humedad Vs. V_p (18 golpes). 101

Ilustración 37. Humedad Vs. V_s (18 golpes)..... 102

Ilustración 38. Humedad Vs. V_p (36 golpes). 104

Ilustración 39. Humedad Vs. V_s (36 golpes)..... 105

Ilustración 40. Gráfico de modelo de regresión lineal simple entre humedad y V_p para 0 golpes por capa. 113



Ilustración 41. Gráfico de modelo exponencial entre humedad y V_p para 9 golpes por capa..... 113

Ilustración 42. Gráfico de modelo de regresión lineal simple entre humedad y V_p para 18 golpes por capa. 114

Ilustración 43. Gráfico de modelo exponencial entre humedad y V_p para 36 golpes por capa..... 114

Ilustración 44. Gráfico de modelo de regresión lineal simple entre humedad y V_s para 0 golpes por capa. 116

Ilustración 45. Gráfico de modelo exponencial entre humedad y V_s para 9 golpes por capa..... 116

Ilustración 46. Gráfico de modelo de regresión lineal simple entre humedad y V_s para 18 golpes por capa. 117

Ilustración 47. Gráfico de modelo potencial entre humedad y V_s para 36 golpes por capa..... 117

Ilustración 48. Gráfico de humedad contra peso unitario húmedo para cada grupo de compactación..... 120



Índice de ecuaciones.

Ecuación 1. Relación para Ley de Snell.	42
Ecuación 2. Ley de Snell.	43
Ecuación 3. Relación ángulo de refracción.	43
Ecuación 4. Porcentaje de humedad de la muestra de suelo.	49
Ecuación 5. Peso seco de una muestra de suelo a partir de su humedad y su peso húmedo.	49
Ecuación 6. Porcentaje de material retenido en cada tamiz.	50
Ecuación 7. Porcentaje de material retenido acumulado.	50
Ecuación 8. Porcentaje de material que pasa el tamiz analizado.	50
Ecuación 9. Índice de plasticidad de un suelo.	53
Ecuación 10. Peso unitario húmedo.	57
Ecuación 11. Peso unitario seco.	57
Ecuación 12. Velocidad de onda primaria.	62
Ecuación 13. Velocidad de onda secundaria.	62
Ecuación 14. Ecuación de Kaptan.	63
Ecuación 15. Modelo de ecuación regresión múltiple.	84
Ecuación 16. Correlación entre V_p , V_s y Peso Unitario.	85
Ecuación 17. Modelo de regresión lineal múltiple para peso unitario húmedo a partir de velocidades sísmicas.	87
Ecuación 18. Modelo de regresión cúbico entre peso unitario húmedo y V_p	89
Ecuación 19. Modelo regresión cúbica entre peso unitario húmedo y V_s	90
Ecuación 20. Correlación entre Velocidad y Humedad (0 golpes).	94
Ecuación 21. Correlación entre Velocidad y Humedad (9 golpes).	97



Ecuación 22. Correlación entre Velocidad y Humedad (18 golpes). 100

Ecuación 23. Correlación entre Velocidad y Humedad (36 golpes). 104

Ecuación 24. Modelo de regresión lineal múltiple entre humedad, V_p y V_s para 0 golpes / capa..... 109

Ecuación 25. Modelo de regresión lineal múltiple entre humedad con velocidades sísmicas y peso unitario húmedo..... 119



Yo Pablo Eduardo Larriva Castillo, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación **“ESTUDIO DE LAS VELOCIDADES SÍSMICAS DE UN SUELO ARCILLO LIMOSO, CON DIFERENTES GRADOS DE COMPACTACIÓN Y HUMEDAD MEDIANTE SISMÓGRAFO”**, 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, febrero de 2018

Pablo Eduardo Larriva Castillo

C.I: 0105763080



Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Yo Pablo Eduardo Larriva Castillo, autor del trabajo de titulación **“ESTUDIO DE LAS VELOCIDADES SÍSMICAS DE UN SUELO ARCILLO LIMOSO, CON DIFERENTES GRADOS DE COMPACTACIÓN Y HUMEDAD MEDIANTE SISMÓGRAFO”**, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, febrero de 2018

A handwritten signature in blue ink, reading "Pablo Larriva C.", written over a horizontal line.

Pablo Eduardo Larriva Castillo

C.I: 0105763080



Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Yo Samuel Esteban Sánchez Ordoñez, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación **“ESTUDIO DE LAS VELOCIDADES SÍSMICAS DE UN SUELO ARCILLO LIMOSO, CON DIFERENTES GRADOS DE COMPACTACIÓN Y HUMEDAD MEDIANTE SISMÓGRAFO”**, 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, febrero de 2018

Samuel Sánchez

Samuel Esteban Sánchez Ordoñez

C.I: 0105746796



Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Yo Samuel Esteban Sánchez Ordoñez, autor del trabajo de titulación **“ESTUDIO DE LAS VELOCIDADES SÍSMICAS DE UN SUELO ARCILLO LIMOSO, CON DIFERENTES GRADOS DE COMPACTACIÓN Y HUMEDAD MEDIANTE SISMÓGRAFO”**, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, febrero de 2018

Samuel Sánchez

Samuel Esteban Sánchez Ordoñez

C.I: 0105746796



Agradecimientos.

Nuestros más profundos agradecimientos al Ing. Alfredo Vázquez López, por habernos brindado su confianza, tiempo, motivación, sabiduría y soporte continuo desde el principio y a lo largo del desarrollo de esta investigación.

De igual manera agradecemos a los Ingenieros Karla Santacruz y Enrique Acosta, por el tiempo y guía que nos dieron para culminar este Trabajo de Titulación.

Agradecemos al Laboratorio de Suelos de la Universidad de Cuenca por la prestación de equipos para poder desarrollar este Trabajo de Titulación.



Dedicatoria.

A ti Sebitas, aunque ya no te encuentres físicamente conmigo, sé que en todo momento al desarrollar este trabajo estuviste a mi lado, en mis desvelos, en mis momentos más difíciles, por eso hermanito querido te dedico mi esfuerzo donde te encuentres, aunque mis ojos no te puedan ver, te puedo sentir y sé que estás aquí. Porque algún día nos volveremos a encontrar y celebraremos juntos. Tú me diste la fuerza para poder culminar esta investigación. Seguirás siendo mi estrella favorita.

A la persona más grande que conozco, un ejemplo de inspiración y lucha diaria, mi padre Chato quien fue mi motivación todos estos años de estudio y esfuerzo. Siempre vas a ser mi ídolo hasta el último de mis días. Gracias por la fortaleza y dedicación que me has enseñado siendo mi pilar fundamental al seguir tus pasos.

A mi madre Tania y hermanito David, que fueron muy importantes en este largo camino, quienes con mucho sacrificio y paciencia supieron apoyarme en cada noche para alcanzar esta meta que hoy se hace realidad. Siempre guiado por su ejemplo de honestidad y humildad.

A mi gran amigo Sam, quien me apoyado en todo momento, siendo un ejemplo de lealtad y compañerismo, al igual que María Del Carmen con quien compartí grandes momentos, siendo su ayuda fundamental en este largo proceso.

PABLO



Dedicatoria.

A mi Padre querido quien desde siempre ha sido un ejemplo de superación y trabajo duro para mí. A mi Madre, quien siempre me dio las fuerzas y comprensión en los momentos más duros de mi carrera. A mis hermanos María José, Sebastián y Juan que me brindaron su apoyo incondicional durante toda mi carrera. A mi gran amigo Chicho, que siempre estuvo presente en los momentos más difíciles de esta carrera.

SAMUEL



Capítulo 1

Introducción y área de estudio.

1.1. Introducción.

Todo proyecto de ingeniería civil requiere de un adecuado estudio de los suelos que servirán de asiento a la estructura. Parte importante de cada proyecto, es la geotecnia, que comprende el análisis de las características de los suelos de fundación. Lastimosamente muchas veces resulta muy complejo y costoso realizar una exploración geotécnica destructiva en los sitios de interés por lo que la geofísica es una alternativa viable. De esta forma es posible correlacionar características físicas y mecánicas del suelo, con los resultados obtenidos de ensayos geofísicos.

El presente estudio propone determinar la relación entre el peso unitario húmedo de un suelo arcillo limoso de la provincia del Azuay y sus velocidades de propagación de onda sísmica o velocidades sísmicas, tanto primaria o longitudinal como secundaria o transversal (V_p y V_s respectivamente) obtenidas mediante un registro sísmico. Además, se obtendrá una relación entre la variación de la humedad del suelo arcillo limoso y sus velocidades sísmicas.

La determinación de estas relaciones permitirá al ingeniero geotécnico reducir los ensayos destructivos en la masa de suelo y con los resultados de un ensayo geofísico, optimizar la determinación del peso unitario húmedo del suelo con el que está trabajando. Además, sería posible determinar la variación del peso unitario húmedo con respecto a la profundidad hasta donde cuente con resultados de ensayos geofísicos. Este procedimiento ahorraría tiempo y dinero dentro del estudio geotécnico de cualquier obra civil.



El presente trabajo utiliza una muestra de suelo de la parroquia Santa Ana clasificado como arcillo limoso perteneciente a la formación geológica Biblián. Con este suelo se realiza el ensayo de compactación Proctor modificado, con el objetivo de obtener la humedad óptima del material, es decir la humedad a la cual se obtiene la densidad seca máxima. Una vez obtenida esta humedad óptima se plantean 5 humedades, en torno a esta, para realizar el ensayo sísmico. Se realizan 4 ensayos por humedad variando el número de golpes por capa utilizados en la compactación, es decir variando su densidad, y mediante la relación de tiempo y distancia ($d=e/t$) se determinan las velocidades sísmicas del suelo. Posteriormente, se compara tanto el peso unitario húmedo como la humedad con las velocidades sísmicas encontradas y se llega a una relación para cada una (peso unitario húmedo y humedad). Con este proceso se ha determinado una relación válida para comparar tanto el peso unitario húmedo como la humedad del suelo arcillo limoso con las velocidades de propagación de onda sísmica.

En el capítulo 2 se describen detalladamente los conceptos teóricos detrás de los ensayos realizados para comprender de mejor manera los resultados obtenidos. El capítulo 3 corresponde a los métodos y normas utilizadas para realizar los ensayos descritos. En el capítulo 4 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos realizados y en el capítulo 5 se escriben algunas conclusiones basadas en la observación de esta investigación.

1.2. Objetivos.

1.2.1. Objetivo General.

Análisis de la variabilidad de las velocidades de propagación de onda sísmica (primarias y secundarias) en un suelo arcillo limoso con respecto a dos de sus propiedades: peso unitario húmedo y humedad.



1.2.2. Objetivos Específicos.

- Encontrar un suelo natural de la zona perteneciente a las provincias de Azuay y Cañar que sea clasificado como arcillo limoso de baja compresibilidad (CL-ML), según el criterio del sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS).
- Realizar un ensayo Proctor Modificado para determinar la humedad óptima y el peso unitario seco máximo del suelo arcillo limoso con el propósito de definir un rango de humedades para realizar el ensayo de medición de las velocidades sísmicas.
- Medir las velocidades de propagación de onda sísmica longitudinal y transversal en el suelo arcillo limoso variando el peso unitario mediante 4 compactaciones con un diferente número de golpes por capa mientras se mantiene constante el porcentaje de humedad. Se realiza este ensayo con 5 porcentajes de humedad, es decir en total se realizan 20 ensayos.
- Obtener una correlación entre el peso unitario húmedo del suelo arcillo limoso y sus velocidades de propagación de onda sísmica (primaria y secundaria).
- Obtener una correlación entre la humedad del suelo arcillo limoso y sus velocidades de propagación de onda sísmica (primaria y secundaria).



1.3. Ubicación del área de estudio.

El presente estudio requiere de un suelo arcillo limoso ubicado en los alrededores de la ciudad de Cuenca o Azogues. Se ha delimitado una zona donde posiblemente se puede conseguir el tipo de suelo buscado, que comprende la zona alrededor de las ciudades de Cuenca y Azogues. La zonificación realizada se fundamenta en la presencia de la formación Biblián, de donde resulta más probable encontrar un suelo arcillo limoso. Se han escogido 3 puntos dentro de la zona antes mencionada donde aflora la formación Biblián.

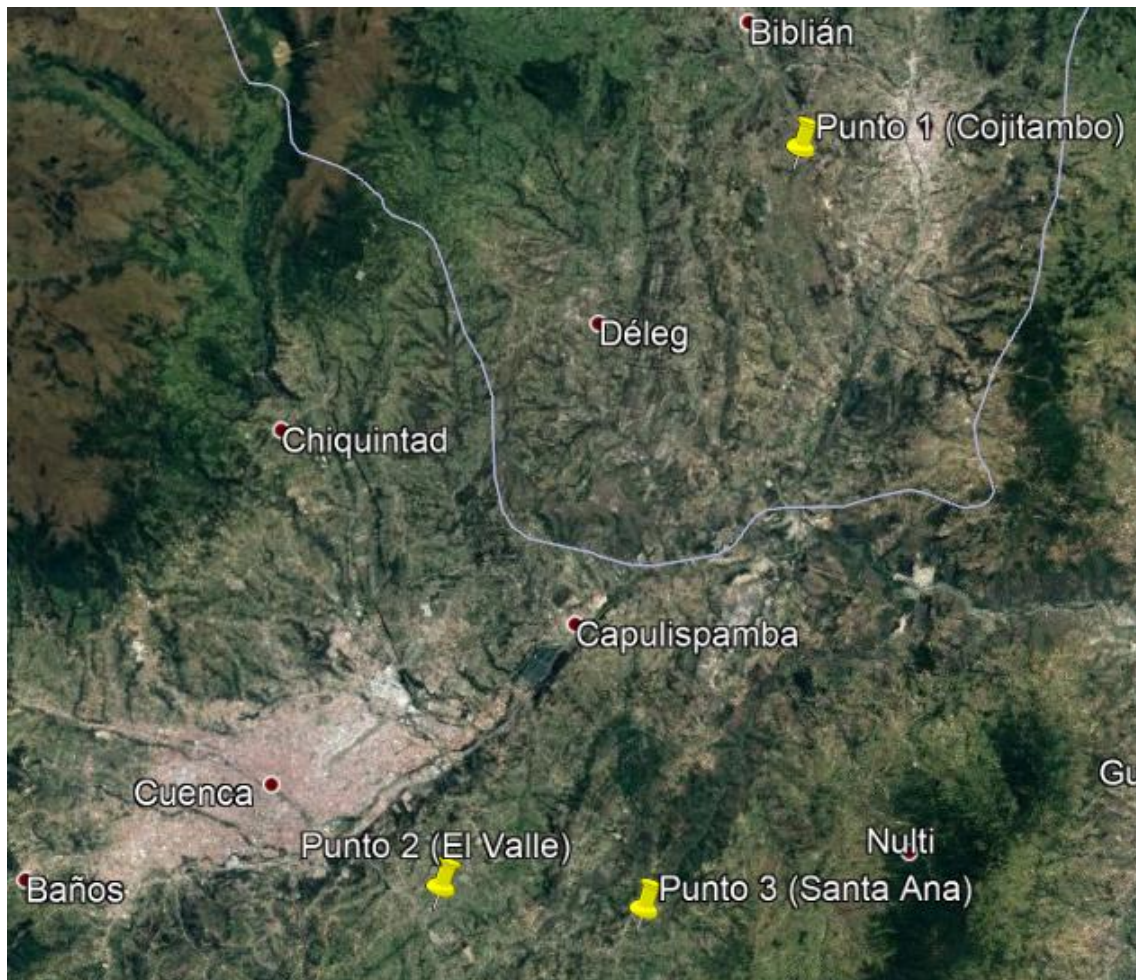


Ilustración 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio.

1.4. Geología del área de estudio.

La hoja geológica 73 del INIGEMM (Instituto Nacional de Investigación Geológica Minero Metalúrgica) correspondiente a la zona de Azogues sirvió como referencia para determinar los 3 puntos escogidos en donde aflora la formación Biblián como se puede verificar en la Ilustración 2.

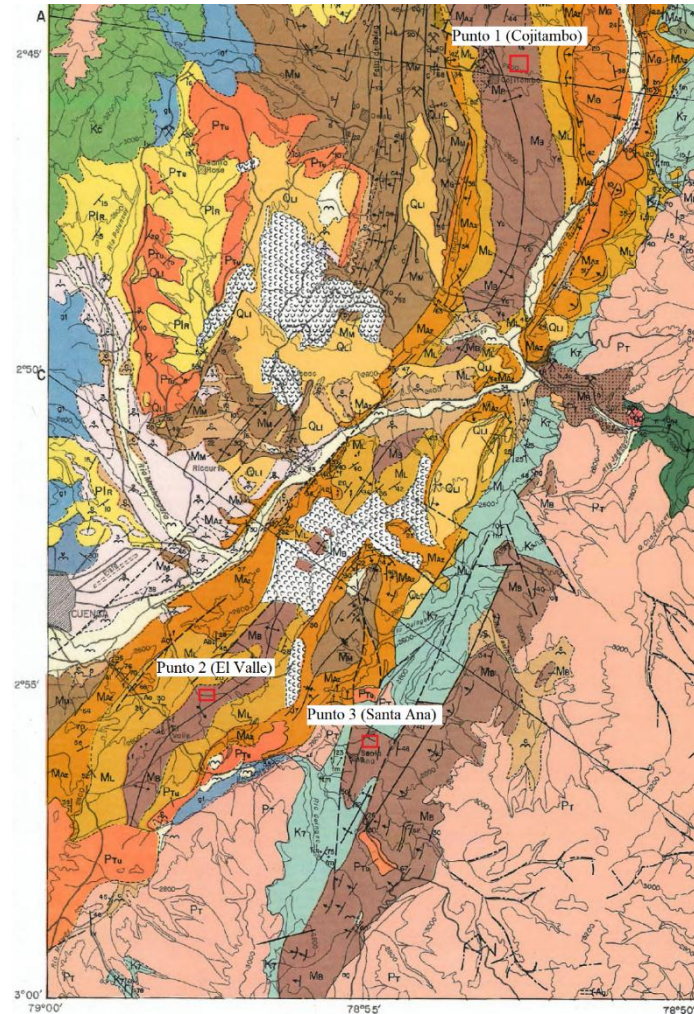


Ilustración 2. Formación Biblián (Zonas de afloramiento)

Fuente: Copyright 1980 por INIGEMM.

Como ya se mencionó, esta zona corresponde a la rural este de Cuenca y la zona de la ciudad de Azogues y sus alrededores. La formación Biblián descansa en discordancia sobre la Formación Yunguilla. El depósito basal es de guijarro grueso, a menudo con



cantos de la Formación Yunguilla. Esta litología se repite en muchos niveles dentro de arcillas limosas, arenosas finas café-rojizas, y areniscas tobáceas gruesas. Aglomerados volcánicos rojos parecen formar la base local de la formación. Se estima que más de 1000m de potencia afloran en el área de Santa Ana (INIGEMM, 1980).

1.5. Ubicación definitiva de los sectores de extracción de los suelos.

Se estimaron las coordenadas geográficas de los 3 puntos de extracción de las muestras de suelo pertenecientes a la Formación Biblián mediante el software Google Earth. En las siguientes tablas se muestran las mismas.

Tabla 1:

Ubicación geográfica del primer sector de extracción de muestra de suelo.

Coordenadas Sector Cojitambo	
Latitud	-2°-44'-59" S
Longitud	-78°-52'-35" W

Tabla 2:

Ubicación geográfica del segundo sector de extracción de muestra de suelo.

Coordenadas Sector El Valle	
Latitud	-2°-55'-50" S
Longitud	-78°-57'-57" W

Tabla 3:

Ubicación geográfica del tercer sector de extracción de muestra de suelo.

Coordenadas Sector Santa Ana	
Latitud	-2°-56'-9" S
Longitud	-78°-54'-54" W



Capítulo 2:

Marco teórico.

2.1. Análisis mecánico del suelo (Granulometría).

El análisis mecánico del suelo hace referencia a su granulometría, es decir, la determinación del rango de tamaños de sus partículas. Estos se expresan como un porcentaje del peso total seco. Se usan generalmente dos métodos para encontrar la distribución del tamaño de las partículas del suelo: 1) análisis por 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, 2013).

2.1.1. Análisis por cribado (Tamizado). El tamizado se puede definir como la técnica de clasificar partículas de una muestra en términos de su capacidad o incapacidad que presentan para pasar a través de un orificio de dimensiones regulares. La técnica consiste en colocar la muestra de polvo en la parte superior de un juego de tamices mostrados en la Tabla 4, uno debajo del otro con una secuencia de reducción sucesiva del tamaño del orificio de la malla. El juego de tamices junto con la muestra se agita y las partículas con las dimensiones adecuadas pasaran a través de las diferentes mallas, reteniéndose sobre aquellas las partículas que no presenten la capacidad de atravesarlas (Irani, 1963). Una representación de esta configuración se presenta en la Ilustración 3.



Tabla 4:

Número de tamices y su respectiva abertura.

Malla No.	Abertura (mm)
4	4,750
6	3,350
8	2,360
10	2,000
16	1,180
20	0,850
30	0,600
40	0,425
50	0,300
60	0,250
80	0,180
100	0,150
140	0,106
170	0,088
200	0,075
270	0,053

Nota. Fuente: Das, B. M. (2013). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (p. 34). Cengage Learning



Ilustración 3. Serie de tamices para prueba de laboratorio.

Fuente: Das, B. M. (2013). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (p. 34). Cengage Learning



Cuando se analizan suelos cohesivos, resulta difícil disgregar los grumos en partículas individuales. En tal caso, el suelo se mezcla con agua para formar una lechada que luego se lava a través de las mallas. Las porciones retenidas en cada malla se recogen por separado y se secan en el horno antes de que la masa retenida en cada malla sea determinada (Das, 2013).

2.1.2. Curva de distribución granulométrica. Los resultados del análisis mecánico (análisis por cribado o tamizado) se presentan generalmente en gráficas semilogarítmicas como curvas de distribución granulométrica (o de tamaño de grano). Los diámetros de las partículas se grafican en escala logarítmica y el porcentaje correspondiente de finos en escala aritmética (Das, 2013).

2.2. Límites de Atterberg.

Cuando los minerales de arcilla están presentes en el suelo de grano fino, el suelo se puede remover en presencia de algo de humedad sin que se desmorone. Esta naturaleza cohesiva se debe al agua adsorbida que rodea a las partículas de arcilla. En 1900, un científico sueco llamado Albert Mauritz Atterberg desarrolló un método para describir la consistencia de los suelos de grano fino con diferentes contenidos de humedad. Con un contenido de humedad muy bajo, el suelo se comporta más como un sólido quebradizo. Cuando el contenido de humedad es muy alto, el suelo y el agua pueden fluir como un líquido. Por lo tanto, sobre una base arbitraria, dependiendo del contenido de humedad, la naturaleza del comportamiento del suelo puede ser dividido en cuatro estados básicos: sólido, semisólido, plástico y líquido (Das, 2013) como se muestra en la Ilustración 4.

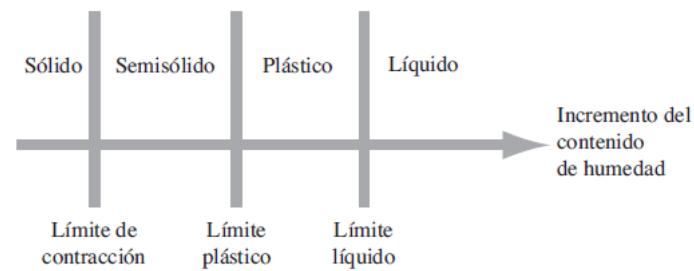


Ilustración 4. Estados del suelo y límites de Atterberg.

Fuente: Das, B. M. (2013). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (p. 64). Cengage Learning.

2.2.1. Límite Líquido. Es el contenido de humedad, en el cual hay una transición entre el estado plástico y el líquido. De acuerdo a la definición, los suelos plásticos tienen en el límite líquido una resistencia muy pequeña al esfuerzo de corte, que es de 25 g/cm² (según Atterberg) la cohesión de un suelo en límite líquido es prácticamente nula. Además, podría definirse como el porcentaje de agua requerido para cerrar una ranura de 12.7 mm. con 25 golpes de la copa de Casagrande (Terzaghi & Peck, 1955).

2.2.2. Límite Plástico. El límite plástico se define como el contenido de humedad, en porcentaje, en el que el suelo al enrollarse en hilos de 3.2 mm de diámetro se desmorona. El límite plástico es el límite inferior del escenario plástico del suelo. El índice de plasticidad (PI) es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo (Das, 2013).

2.2.3. Carta de Plasticidad. Los límites líquido y plástico se determinan por pruebas de laboratorio relativamente sencillas que proporcionan información sobre la naturaleza de los suelos cohesivos. Las pruebas han sido utilizadas ampliamente por los ingenieros para correlacionar varios parámetros físicos del suelo, así como para la identificación del mismo. Casagrande (1932) estudió la razón del índice de plasticidad con el límite líquido de una amplia variedad de suelos naturales. Sobre la base de los resultados de la prueba, se propuso una carta de plasticidad. La característica importante de este cuadro



es la línea A empírica que está dada por la ecuación $PI = 0.73 (LL - 20)$. La línea A separa las arcillas inorgánicas de los limos inorgánicos. Las gráficas de los índices de plasticidad contra límites líquidos de arcillas inorgánicas se encuentran por encima de la línea A, y las de limos inorgánicos se encuentran por debajo de esta línea. Los limos orgánicos se grafican en la misma región (por debajo de la línea A y con LL que va de 30 a 50), como los limos inorgánicos de compresibilidad media. Las arcillas orgánicas parcela se grafican en la misma región que los limos inorgánicos de alta compresibilidad (por debajo de la línea A y LL mayor de 50). La información proporcionada en la carta de plasticidad es de gran valor y es la base para la clasificación de los suelos de grano fino en el Sistema de Clasificación Unificado de Suelos. Considere que una línea llamada U se encuentra por encima de la línea A. La línea U es de aproximadamente el límite superior de la relación del índice de plasticidad al límite de líquido para cualquier suelo encontrado hasta ahora. La ecuación de la línea U se puede dar como $PI = 0.9(LL - 8)$ (Das, 2013). La carta de plasticidad propuesta por Casagrande se muestra en la Ilustración 5.

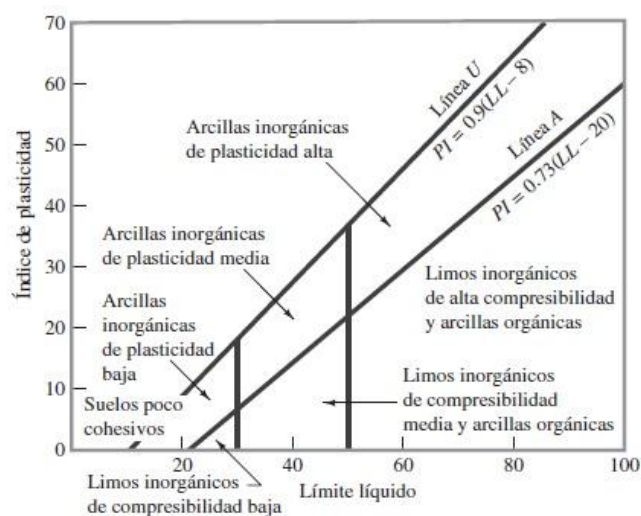


Ilustración 5. Carta de plasticidad propuesta por Casagrande (1932).

Fuente: Das, B. M. (2013). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (p. 74). Cengage Learning.

2.3. Clasificación de suelos.

2.3.1. Clasificación basada en la granulometría. A pesar de sus limitaciones, las clasificaciones de suelos basadas en las características granulométricas tienen amplio uso, especialmente para descripciones generales o preliminares. En estos tipos de clasificación se acostumbra a asignarles nombres de suelos, tal como “limo” o “arcilla”, a las diferentes fracciones granulométricas. Las convenciones más ampliamente aceptadas se muestran en la Ilustración 6.

Tamaño de la partícula D	Milímetros (mm)			Micrones, $1\mu = 10^{-3} \text{ mm}$			Milimicrones, $1\mu\mu = 10^{-6} \text{ mm}$								
	100	10	1	1000	100	10	1000	100	10						
Bureau of Soils 1890-35	Grava			Arena			Limo			Arcilla ⁴					
	1			0,05			0,005 mm								
Atterberg 1905	Grava			Arena gruesa			Arenafina (No)			Limo			Arcilla		
	2,0			0,2			0,02			0,002 mm					
M. I. T. 1934 (recomendado)	Grava			Arena			Limo			Arcilla					
	2,0			0,06			0,002 mm								
Descripción	Macroscópica						Microscópica			Submicrosc.					
	Muy grueso		Grueso		Fino		Muy fino		Coloidal						
Log D (mm)	-	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9				

Dispersión molecular
Molécula de agua, diám. 0,0003 $\mu\mu$

Ilustración 6. Clasificación de partículas en función de sus tamaños.

Fuente: Terzaghi, K., Peck, R. (1955). *Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica* (p. 37). Nueva York: John Wiley & Sons.

Todo sistema de clasificación basado solamente en la granulometría puede conducir a errores, pues las propiedades físicas de la fracción más fina de los suelos dependen de otros factores ajenos al tamaño de los granos (Terzaghi & Peck, 1955). Esto nos quiere decir que, por ejemplo, un suelo que esté formado por partículas de cuarzo de tamaño coloidal según cualquiera de las convenciones que se presentan en la Ilustración 6, el suelo se clasificaría como una arcilla, pero en realidad no tiene nada de parecido con el cuarzo.



Por eso si los términos “limo” o “arcilla” son utilizados para indicar tamaños de partículas deben ir acompañados de la palabra “tamaño” en expresiones tales como “partículas de tamaño de arcilla” (Terzaghi & Peck, 1955).

2.3.2. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.). La forma original de este sistema fue propuesto por Casagrande en 1948 para su uso en los trabajos de construcción del aeródromo realizado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército durante la Segunda Guerra Mundial. En colaboración con el U.S. Bureau of Reclamation, este sistema fue revisado en 1952. En la actualidad, es ampliamente utilizado por los ingenieros (Norma ASTM D-2487). El Sistema Unificado de Clasificación clasifica los suelos en dos grandes categorías:

- Suelos de grano grueso que son de grava y arena en estado natural con menos de 50% que pasa a través del tamiz núm. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo de G o S. G es para el suelo de grava o grava, y S para la arena o suelo arenoso.
- Suelos de grano fino con 50% o más que pasa por el tamiz núm. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo de M, que es sinónimo de limo inorgánico, C para la arcilla inorgánica y O para limos orgánicos y arcillas. El símbolo Pt se utiliza para la turba, lodo y otros suelos altamente orgánicos (Das, 2013).

2.4. Compactación de suelos.

Reducción del índice de poros, e , por medios mecánicos, con lo cual se incrementa el peso unitario seco. Se asemeja a la consolidación por reducir el índice de poros, e , pero se diferencia en que la consolidación es un proceso natural, que es función del tiempo que se aplica la carga y se provoca por la expulsión de aire y agua de los poros del suelo. En el caso de suelos con contenido de finos (material más fino que el tamiz N°



200) siempre queda aire ocluido en los poros, por lo que no se logra la saturación y menos aún, la expulsión de agua de los poros (Armas Novoa, 2004).

De la gráfica realizada, con una misma energía de compactación Proctor, se obtiene la denomina “curva de compactación”: Se observa, que en la medida que la humedad aumenta se obtienen pesos unitarios secos mayores, debido a que el agua en los poros de suelo lubrica las partículas, provocando un mejor reacomodo de éstas, hasta un valor máximo, a partir del cual el aumento de humedad impide, con el espacio ocupado por el agua, que las partículas se unan. El agua de los poros absorbe la energía de compactación aplicada y por tanto el peso unitario seco disminuye. La rama de aumento del peso unitario seco se denomina rama seca y la de descenso, rama húmeda (Armas Novoa, 2004). Una representación de la curva de compactación se muestra en la Ilustración 7.

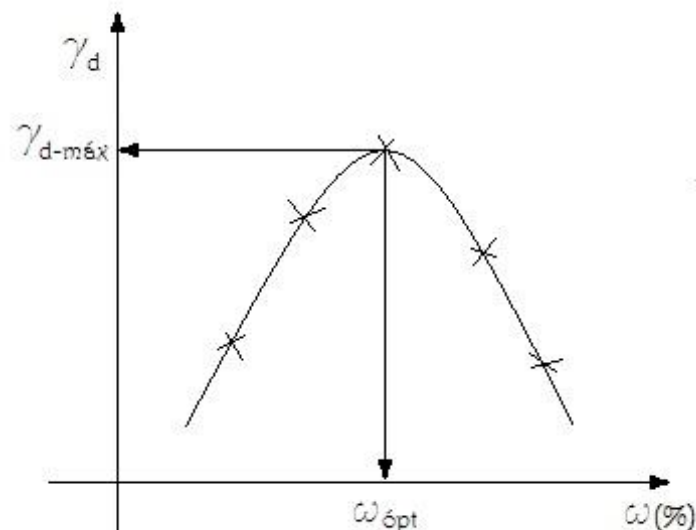


Ilustración 7. Curva de Compactación.

Fuente: Armas, R. (2004). *Compactación de Suelos* (p.2).

Evidentemente, el interés de Proctor era compactar de la forma más económica, por lo que la definición de humedad óptima tiene un carácter puramente económico, ya que es



la humedad con la que se obtiene el peso unitario seco máximo con un mismo costo de compactación, o sea con una misma energía (Armas Novoa, 2004).

La compactación de suelos no es un fin en sí mismo, sino un medio para lograr un fin. El fin es precisamente el objetivo por el cuál compactamos, que no es más que mejorar las propiedades mecánicas de los suelos: resistencia a la compresión y al cortante, permeabilidad y flexibilidad. La única propiedad mecánica que no se mejora con la compactación es la expansión.

Es por ello que también se define la compactación como un método de mejoramiento de suelos; el más antiguo y económico.

Aunque la compactación de campo: de carreteras, aeropuertos, explanaciones, presas, etc., utilizan los mismos procedimientos y equipos, los objetivos de la compactación de éstas difieren. Por ejemplo, el objetivo por el que se compacta una carretera o la explanación de un aeropuerto es alcanzar alta resistencia a la deformación y al cortante, mientras que el objetivo por el que se compacta una presa de tierra es alcanzar alta flexibilidad y baja permeabilidad (Armas Novoa, 2004).

2.5. Ondas sísmicas.

Cuando un medio homogéneo se somete a un esfuerzo en "s", se generan tres pulsos elásticos que viajan en todas direcciones a diferente velocidad; dos de ellos son las "ondas de cuerpo", que se propagan en forma de frentes esféricos, mientras que el tercero son las ondas de superficie confinadas en la parte somera y cuya amplitud decae rápidamente en el cuerpo y a profundidad. Las ondas de cuerpo se dividen en las de compresión o primarias, y las transversales o de corte (Manilla, 2003).

2.5.1. Ondas de compresión o primarias. Las ondas de compresión se propagan en la superficie y subsuelo, retornando por reflexión y refracción; poseen las velocidades más



altas y arriban antes que ninguna otra; se denotan con “Vp”. La velocidad de propagación en los materiales geológicos varía de acuerdo con: grado de acidez de la roca; grado de saturación de cualquier fluido; consolidación, consistencia y compactación; cantidad de agua retenida en los poros; fracturamiento; alteración; densidad, vejez; profundidad (Manilla, 2003). Un gráfico donde se explica la propagación de las ondas de compresión o primarias se muestra a continuación.

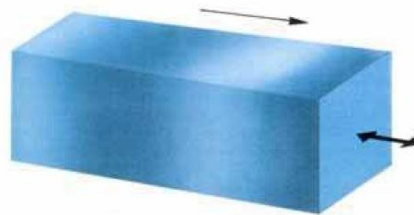


Ilustración 8. Ondas de compresión o primarias.

Fuente: Manilla, A. (2003). *Geofísica Aplicada en los Proyectos de Ingeniería Civil* (p. 21). Sanfandila: Instituto Mexicano del Transporte.

Las velocidades de las ondas de compresión varían entre 300 m/s y 7000 m/s, según las investigaciones de Jakovsky (1950) (Manilla, 2003). Valores de velocidades de ondas de compresión se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5:

Rangos usuales de variación de la velocidad de compresión en diversos tipos de materiales geológicos.

Tipo de Material	Velocidad de onda de compresión (m/s)	
Material superficial (capa de alteración de suelos y rocas)	305	610
Grava, arena y arcillas (secas y húmedas)	468	915
Arena húmeda	610	1830
Areniscas y lutitas	1830	4270
Caliza	2140	6100
Granito	4580	5800
Rocas metamórficas	3050	7020

Fuente: Manilla, A. (2003). *Geofísica Aplicada en los Proyectos de Ingeniería Civil* (p. 36). Sanfandila: Instituto Mexicano del Transporte.



2.5.2. Ondas de corte o secundarias. Las ondas de corte “ V_s ” son también ondas de cuerpo pero se propagan en trayectorias perpendiculares a las “ V_p ”. Presenta dos componentes, si se tienen los tres ejes de referencia: “ x ”, “ y ” y “ z ”, siendo el eje “ x ” la dirección de movimiento, las componentes horizontales de las ondas de corte serán: “ V_{sy} ” y “ V_{sz} ”, mucho más lentas que las de compresión. Las ondas de corte no se propagan en ningún fluido (Manilla, 2003).

Un esquema de las componentes de la velocidad de la onda de corte se muestra en la Ilustración 9.

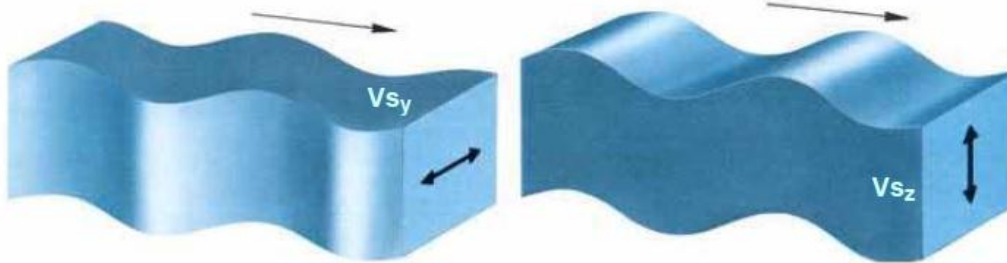


Ilustración 9. Componentes de la velocidad de la onda de corte.

Fuente: Manilla, A. (2003). *Geofísica Aplicada en los Proyectos de Ingeniería Civil (p. 21)*. Sanfandila: Instituto Mexicano del Transporte.

2.6. Registro sísmico.

La exploración sísmica está fundamentada en la propagación de un movimiento ondulatorio generado en la superficie del terreno y se propaga tridimensionalmente por el subsuelo. La sísmica de refracción permite obtener información de las características geológicas estructurales del subsuelo, mediante el uso de receptores (geófonos), colocados en diferentes posiciones del terreno, los cuales registran las vibraciones artificiales generadas en el terreno a través de una explosión o un impacto. Es posible caracterizar la estructura del subsuelo, puesto que las vibraciones artificiales generadas se transmiten al terreno y la perturbación elástica es reflejada, refractada y difractada,



cuando la onda incide en la frontera entre materiales con propiedades físicas diferentes. Como principio se establece, que el subsuelo está compuesto por un medio Elástico (deformaciones retornan a forma inicial al eliminar el esfuerzo), Homogéneo (No existen variaciones del material de un punto a otro) e Isótropo (comportamiento elástico es independiente de la dirección). El principio de Huygens supone, que cada punto del frente de ondas primario da origen a una fuente de ondas secundarias que producen ondas esféricas con la misma frecuencia y se propagan en todas las direcciones con similar velocidad, que la onda primaria en cada uno de dichos puntos (Bruce B. Redpath, 1973).

La ley de Refracción o Snell es una fórmula simple utilizada, para calcular el ángulo de refracción de una onda o de la luz al atravesar la superficie de separación entre dos medios de propagación con una propiedad física distinta. La sismica de Refracción consiste en medir el tiempo, que requiere una onda sísmica en viajar desde la fuente sísmica a un receptor (Bruce B. Redpath, 1973).

2.6.1. Principio de Huygens. En un medio homogéneo las ondas emanan de un punto origen en forma de esferas que se expansionan. El principio de Huygens dice que cada punto de un frente de onda es origen de una nueva onda que también se propaga en forma de esfera. Si las ondas esféricas tienen un radio tan grande que pueden ser consideradas como planas, las líneas perpendiculares a los frentes de onda pueden, en muchos casos, representar las ondas de modo más conveniente que los mismos frentes de onda, y estas líneas perpendiculares son denominadas trayectorias de onda o rayos (Dobrin, 1980). El frente de onda es el lugar geométrico de todos los puntos que tienen el mismo estado de vibración, o igual tiempo de viaje; mientras que la trayectoria indica

la dirección y sentido de la propagación del movimiento ondulatorio; la trayectoria siempre será perpendicular al frente de onda (Manilla, 2003).

2.6.2. Refracción: Ley de Snell.

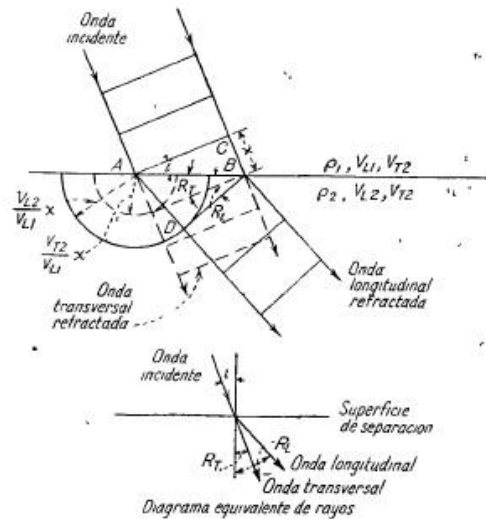


Ilustración 10. Refracción de ondas elásticas al atravesar la superficie de separación.

Fuente: Dobrin, M. (1980). *Introducción a la Prospección Geofísica* (p. 473).

Barcelona: Ediciones Omega.

Cuando un onda incidente choca con una superficie de separación, cada punto de esta se convierte en centro de una onda elástica semiesférica que se propaga en el segundo medio con velocidad V_{L2} en el caso de la onda longitudinal, y V_{T2} en el caso de la onda transversal. En base a la Ilustración 11, se ve que la onda longitudinal recorre en el medio inferior una distancia AD, mientras el frente de onda se desplaza la distancia x, de C a B, en el medio superior. La onda refractada resultante forma un ángulo R_L con la superficie de separación. Ahora bien, según el diagrama:

$$\text{sen } i = \frac{BC}{AB}; \text{sen } R_L = \frac{AD}{AB} = \frac{V_{L2} BC}{V_{L1} AB}$$

Ecuación 1. Relación para Ley de Snell.



De modo que:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } R_L} = \frac{V_{L1}}{V_{L2}}$$

Ecuación 2. Ley de Snell.

Ésta es la ley de Snell. El ángulo de refracción para la onda transversal R_T viene expresado por la relación:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } R_T} = \frac{V_{T1}}{V_{T2}}$$

Ecuación 3. Relación ángulo de refracción.

Cuando $\text{sen } i = V_{L1}/V_{L2}$, $\text{sen } R_L$ se hace igual a la unidad y R_L a 90° . Esto significa que la onda refractada no penetra en el medio, sino que se propaga a lo largo de la superficie de separación. El ángulo $i_c = \text{sen}^{-1} V_{L1}/V_{L2}$ es denominado ángulo crítico de incidencia para la refracción longitudinal. Para cualquier valor de i superior a este ángulo crítico, no hay refracción en el segundo medio y la onda es totalmente reflejada. Este concepto de ángulo crítico es de suma importancia en los trabajos de refracción sísmica, puesto que la onda utilizada realmente es la que choca con la superficie superior de una capa de gran velocidad bajo el ángulo crítico, se desplaza horizontalmente siguiendo esta superficie y finalmente es refractada hacia la superficie del suelo bajo el mismo ángulo (Dobrin, 1980).

2.6.3. Práctica del método de refracción sísmica. Los frentes de onda viajan a velocidades características a través de la masa del medio, desde la fuente de energía (punto golpe de martillo), hasta los sensores (geófonos). El frente de onda arriba a los geófonos, después de un tiempo “ t ” que depende de la distancia “ d ” al martillo, y tanto



de la elasticidad como de la densidad del medio. Los arribos de las ondas producen vibraciones en el geófono que son amplificadas por el sismógrafo y visualizadas en la pantalla del mismo. Una vez establecidos los objetivos de la exploración sísmica y seleccionado el sitio para la práctica del sondeo sísmico, se fijan los intervalos de medida, registrando el tiempo de arribo en cada geófono, se forman las gráficas tiempo distancia, conocidas como “Curvas Domocrónicas” en las que el inverso de la pendiente “m” de cada una de las rectas, representa la velocidad del estrato. El cálculo de los espesores de cada estrato se determina de manera analítica. El éxito de la aplicación del método de refracción sísmica depende de la calidad de las ondas generadas (Manilla, 2003).

Las ondas “P” y “S” son las más socorridas en los estudios de ingeniería, las ondas “Vp” se producen mediante explosivos, pistola, fuente martillo semi-hidráulico, peso dejado caer, y de manera usual con un martillo. Las ondas “S” son las más difíciles de producir, se emplean en ingeniería para determinar los módulos elásticos dinámicos, períodos fundamentales de vibración, estabilidad de cortes para la construcción de bordos, presas, túneles, estabilidad de masas rocosas, construcción de plantas nucleares y edificios, entre otros. En el sismograma se tiene la dificultad de seleccionar la onda de corte en medio de una complicada señal que contiene las provenientes de todas direcciones, refracciones, reflexiones, ondas Rayleigh, Love, y hasta ruido. Existen cuatro maneras de medir las ondas de corte “Vs”, ellas son: crosshole, downhole, uphole, y refracción. Esta última es la manera más común, mediante geófonos de componentes horizontal (Manilla, 2003).

En los últimos tiempos se han desarrollado otros métodos para la obtención de las velocidades de corte Vs, como son MASW, ReMi, ESAC, entre otros, los cuales



utilizan la información generada por las ondas Rayleigh y geófonos verticales de baja frecuencia.

2.7. Análisis de regresión entre variables.

2.7.1. Coeficiente de correlación. El coeficiente de correlación es un estadístico que proporciona información sobre la relación lineal existente entre dos variables cualesquiera. Es importante notar que el uso del coeficiente de correlación sólo tiene sentido si la relación bivariada a analizar es del tipo lineal. Si ésta no fuera no lineal, el coeficiente de correlación sólo indicaría la ausencia de una relación lineal más no la ausencia de relación alguna. Debido a esto, muchas veces el coeficiente de correlación se define – de manera más general - como un instrumento estadístico que mide el grado de asociación lineal entre dos variables (Lahura, 2003).

El coeficiente de correlación de Spearman muestra una asociación entre variables. A diferencia del coeficiente de Pearson, permite obtener un coeficiente de asociación entre variables que no se comportan normalmente, entre variables ordinales. Se calcula en base a una serie de rangos asignados. Sus valores van de - 1 a 1, siendo 0 el valor que indica no correlación, y los signos indican correlación directa e inversa (Universidad de Chile, 2014).

2.7.2. Regresión lineal y curvilínea. Los métodos de regresión se usan para elegir la mejor relación funcional entre las variables, es decir, la función o ecuación que mejor se ajuste a los datos. (Atlantic International University, 2003)

2.7.2.1. Variable dependiente e independiente. En investigación, se denomina variable independiente a aquella que es manipulada por el investigador en un experimento con el objeto de estudiar cómo incide sobre la expresión de la variable dependiente. El objeto, proceso o característica a estudiar y que modifica su estado con



la modificación de la variable independiente (es decir que depende de ella y que en esa medida es un efecto) se llama variable dependiente. (Atlantic International University, 2003)

2.7.2.2. Ecuación de regresión. Relación existente entre la media de una variable aleatoria y los valores de una o más variables independientes de los cuales depende. Desde luego en algunos casos quizá no exista relación en absoluto o sólo una muy débil, de manera que también nos interesará la medición del alcance o fuerza de la correlación, la relación (asociación o interdependencia) de los valores de dos o más variables cualitativas o cuantitativas (Atlantic International University, 2003).



Capítulo 3:

Materiales y métodos.

Para cumplir con el objetivo propuesto en el presente trabajo, como ya se mencionó, se determinó 3 puntos para la extracción de material. Estos puntos se escogieron luego de un análisis de la geología de la zona de estudio. Se utilizan tres muestras de suelos de las ubicaciones El Valle, Santa Ana y Cojitambo, cuyas coordenadas se presentan en las Tablas 1, 2 y 3 respectivamente.

Con el suelo extraído de estas 3 ubicaciones, se realiza la clasificación de estos según el método SUCS, seleccionando así, el que resulte como arcillo limoso. Posteriormente se realiza el ensayo de compactación Proctor modificado para determinar la humedad óptima y el peso unitario seco máximo del suelo y así poder definir un rango de humedades para la medición de las velocidades sísmicas.

Se utiliza una caja de madera, explicada a continuación, para realizar el ensayo sísmico. Por lo tanto, con el suelo clasificado como arcillo limoso se realiza el ensayo de medición de las velocidades sísmicas primaria y secundaria. Para realizar esta medición en el suelo arcillo limoso, se varía su peso unitario mediante 4 compactaciones con un diferente número de golpes por capa mientras se mantiene constante el porcentaje de humedad. Se realiza este ensayo con 5 porcentajes de humedad, es decir en total se realizan 20 ensayos. Se intenta mantener constante el porcentaje de humedad en cada ensayo, pero existe variación en el mismo por agentes externos como el sol, aire, etc. los mismos que evaporan el agua de las muestras de suelo que se analizan.

Como se puede observar el ensayo sísmico se realiza con variación de humedad y grados de compactación para obtener una correlación entre las velocidades sísmicas del



suelo y dos de sus parámetros: peso unitario húmedo y humedad, respectivamente. Este proceso, de igual, manera, se encuentra detallado a continuación.

3.1. Equipo y Procedimiento para la preparación de muestras a ensayar.

Como se necesita clasificar las muestras de suelo extraídas de los 3 puntos seleccionados, se procede a prepararlas debido a que se necesita que estas sean aptas para realizar los diferentes ensayos. Entre los ensayos necesarios están: granulometría, ensayo para obtener el límite líquido de un suelo, el ensayo para obtener el límite plástico de un suelo, y el ensayo Proctor modificado.

Las muestras de suelo extraídas del campo se deben primero desmenuzar lo más posible con el martillo mecánico, debido a que el material presenta elevada cohesividad y forma terrones.

3.2. Ensayo para la determinación del porcentaje de Humedad.

Para las siguientes pruebas se utilizó la norma ASTM D2216-10. Este método de ensayo determina la cantidad de agua por masa de suelo, roca, y materiales similares donde la reducción de masa por secado es debido a la pérdida de agua. Se utilizó el siguiente equipo:

- Horno controlado a $110^{\circ} \pm 5^{\circ}$ C u hornilla de cocina
- Taras de laboratorio
- Balanza de alta precisión

Básicamente con el secado de material en el horno controlado u hornilla se conoce la masa de agua removida del suelo húmedo. Primero se determina el peso de la muestra húmeda ($W_{húmedo}$), se procede a secarla, ya sea en horno (el secado a horno debe realizarse durante 24 horas) o en hornilla, y se determina el peso de la muestra seco (W_{seco}). Para conocer la humedad se utiliza la siguiente expresión:



$$\omega (\% \text{ humedad}) = \frac{W_{húmedo} - W_{seco}}{W_{seco}} * 100$$

Ecuación 4. Porcentaje de humedad de la muestra de suelo.

También se puede conocer el peso seco de una muestra de suelo cuando ya se conoce su humedad mediante la fórmula:

$$W_{seco} = \frac{W_{húmedo}}{1 + \omega}$$

Ecuación 5. Peso seco de una muestra de suelo a partir de su humedad y su peso húmedo.

3.3. Granulometría.

Se determinó de manera cuantitativa la distribución de tamaños de las partículas en las 3 muestras de suelo extraídas correspondientes a suelos finos utilizando la norma ASTM D-422. Se utilizaron los siguientes implementos:

- Balanzas de alta precisión
- Aparatos de agitación
- Mallas: N°10, N°20, N°40, N°50, N°100, N°200
- Dispositivo de sincronización: Reloj o Cronómetro

Primeramente, se separa una cantidad determinada de muestra de cada suelo y se registra su peso. Luego se determina la humedad de cada muestra mediante el método descrito anteriormente.

Al material utilizado para cada granulometría se procede a lavarlo por el tamiz #200, ya que presenta elevada cohesividad y no es posible desmenuzarlo en partículas. Posterior al lavado, el material restante se seca al horno durante 24 horas, y se realizó la granulometría con él mismo. Posterior a tamizar el material por 5 minutos, según la norma, se procede a pesar el material retenido en cada tamiz (W retenido). Para



determinar cada uno de los valores presentados en las tablas de granulometría correspondientes, se utilizaron las siguientes expresiones:

$$\% \text{ retenido} = \frac{W_{\text{retenido}}}{W_{\text{total muestra}}} * 100$$

Ecuación 6. Porcentaje de material retenido en cada tamiz.

$$\% \text{ retenido acumulado} = \% \text{ retenido anterior} + \% \text{ retenido actual}$$

Ecuación 7. Porcentaje de material retenido acumulado.

$$\% \text{ que pasa} = 100 - \% \text{ retenido acumulado}$$

Ecuación 8. Porcentaje de material que pasa el tamiz analizado.

3.4. Límites de Atterberg.

Como el método SUCS requiere conocer los valores tanto de límite líquido como plástico es necesario realizar estos ensayos. Se utilizó la norma INEN 0691 para la determinación del límite líquido de cada una de las 3 muestras de suelo y la INEN 0692 para límite plástico de las 3 muestras de suelo.

3.4.1. Equipo y procedimiento para el ensayo de Límite Líquido.

Equipos:

- Aparato de límite líquido (cuchara de Casagrande), el cual consiste en una taza o cuchara de bronce, montada en un dispositivo mecánico.
- Acanalador calibrado (Casagrande o ASTM).
- Fuente de mezclado con espátula.
- Equipo para determinar contenido de agua.
- Calibrador.
- Balanza de precisión.
- Herramientas como placa de vidrio, malla No. 40 ASTM, probeta.



- 1) Utilizando la espátula se mezcla con agua una cantidad aproximada de 250g de muestra de suelo que pase la malla No. 40 hasta obtener una pasta moldeable y homogénea.
- 2) Se coloca y enrasa una porción de esta pasta en la cuchara de Casagrande hasta 1cm de altura.
- 3) Una vez enrasado se realiza un canal en la muestra con el acanalador adecuado de manera que la pasta de suelo colocada quede dividida en dos partes iguales.
- 4) Se gira la manivela del aparato con una frecuencia de 2 revoluciones por segundo.
- 5) Contar los golpes necesarios para que las dos mitades de la muestra se unan en una distancia continua de alrededor de 10 mm. Los golpes necesarios para que ocurra esto, en el primer ensayo debe ser de 35 a 45, de lo contrario añadir más agua o secar la muestra al aire.
- 6) Del lugar donde se juntan los bordes tomar una muestra de suelo de aproximadamente 10g para determinar la humedad.
- 7) Se realiza el mismo procedimiento 4 veces, variando la humedad y mezclándolo por 5 minutos, de tal manera que el número de golpes para cerrar el canal este entre 5 y 45 golpes de modo que 2 ensayos estén debajo de los 25 golpes, y 2 ensayos por encima de los 25 golpes.

3.4.2. Equipo y procedimiento para el ensayo de Límite Plástico

Esta prueba es muy subjetiva ya que depende del operador y de la manera en la que realiza los movimientos con el suelo mezclado con agua hasta que llegue al punto de resquebrajarse y presentar el diámetro especificado.

- Fuente de mezclado
- Espátula



- Placa de vidrio para el rolado
- Varilla de calibración (3 mm)
- Equipo para determinar el contenido de agua
- Herramientas como: Malla No. 40 ASTM, probeta.

1) Se tomó una muestra de aproximadamente 100g de material que pase el tamiz No.40 y se le añade agua hasta que forme una pasta de suelo homogénea y plástica, en cantidad suficiente como para ser moldeada por los dedos como una esfera.

2) A continuación, se toma aproximadamente 10 g de este material y se forma una esfera para rotar esta entre las puntas de los dedos y la placa de vidrio con presión suficiente para formar del suelo un rollo de 3 mm de diámetro en 5 a 15 movimientos completos (hacia adelante y hacia atrás) de la mano.

3) Si el suelo se desmenuza antes de los 3mm de diámetro, añadir agua a toda la masa de suelo, mezclar hasta obtener una masa homogénea y repetir el proceso. Si el rollo de suelo llega a los 3mm sin presentar signos de desmenuzamiento o fisuras recoger el rollo y moldearlo nuevamente entre los dedos y repetir el proceso de rolado.

4) Una vez que el rollo de suelo presente fisuras y signos de desmenuzamiento quiere decir que su humedad representa su límite líquido, por lo que se toma este rollo y se obtiene su humedad con el proceso descrito anteriormente.

5) Se realiza este procedimiento con 3 muestras de suelo para obtener el límite plástico mediante un promedio de estos resultados.

3.5. Clasificación De Suelos.

Una vez obtenidos los valores de límite líquido, límite plástico y de la granulometría de cada suelo, se clasifican los mismos de acuerdo con el método SUCS.



1) Como primer paso se determina el porcentaje o fracción de la muestra total del suelo que pasa el tamiz #200. Como se trata de suelos finos, se espera que en los 3 suelos más del 50% de la muestra total pase el tamiz #200 para que puedan ser clasificados como suelos finos.

2) A continuación, con los valores de límite líquido y límite plástico obtenidos de cada suelo, y mediante las ilustraciones 12 y 13 se obtiene el símbolo de grupo, y con la Ilustración 14 el nombre de grupo. El índice de plasticidad se calcula mediante la ecuación:

$$PI = LL - LP$$

Ecuación 9. Índice de plasticidad de un suelo.

En donde:

PI: Índice de plasticidad

LL: Límite líquido

LP: Límite plástico



Tabla 6:

Símbolos de grupo para suelos finos.

Símbolo de grupo	Criterios
CL	Inorgánico; $LL < 50$; $PI > 7$; se grafica sobre o arriba de la línea A (véase zona CL en la Ilustración 12)
ML	Inorgánico; $LL < 50$; $PI < 4$; o se grafica debajo de la línea A (véase la zona ML en la Ilustración 12)
OL	Orgánico; $(LL - \text{seco en horno}) / (LL - \text{sin secar}) < 0.75$; $LL < 50$ (véase zona OL en la Ilustración 12)
CH	Inorgánico; $LL \geq 50$; PI se grafica sobre o arriba de la línea A (véase la CH en la Ilustración 12)
MH	Inorgánico; $LL \geq 50$; PI se grafica debajo de la línea A (véase la zona MH en la Ilustración 1)
OH	Orgánico; $(LL - \text{seco en horno}) / (LL - \text{sin secar}) < 0.75$; $LL \geq 50$ (véase zona OH en la Ilustración 12)
CL-ML	Inorgánico; se grafica en la zona sombreada en la Ilustración 12
Pt	Turba, lodos y otros suelos altamente orgánicos

Fuente: Das, B. M. (2013). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (p. 83). Cengage Learning

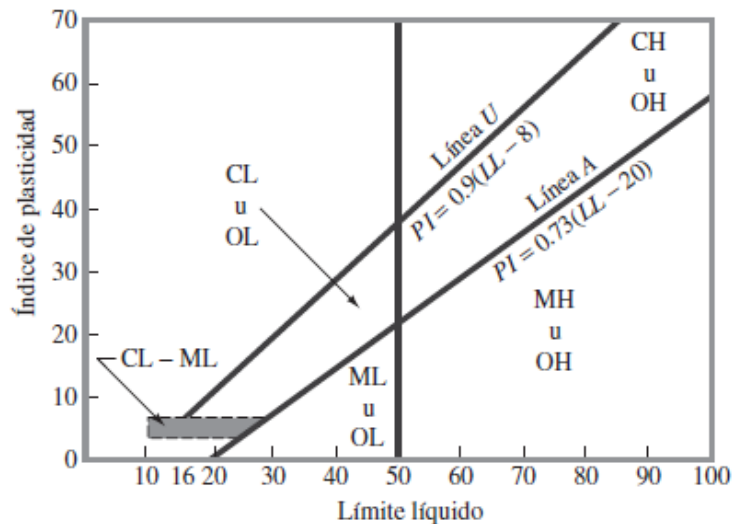


Ilustración 11. Carta de plasticidad.

Fuente: Das, B. M. (2013). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (p. 84). Cengage Learning

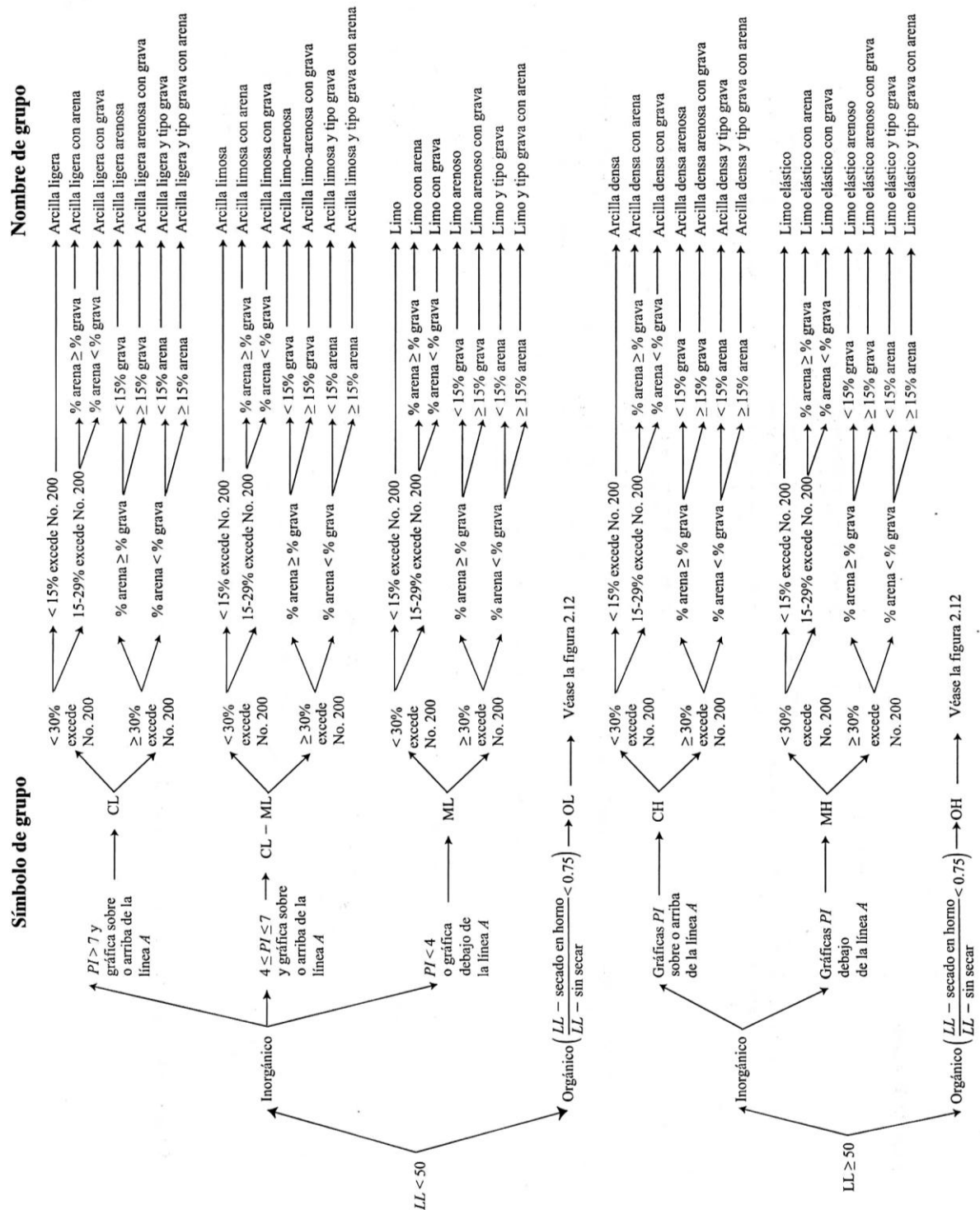


Ilustración 12. Nombres de grupo de suelos finos inorgánicos.

Fuente: Das, B. M. (2013). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (p. 86). Cengage Learning



3.6. Ensayo de compactación Proctor Modificado.

Estos métodos de compactación en el laboratorio determinan la relación entre el contenido de humedad y la densidad de suelos y mezclas de suelo-agregado cuando se compactan en un molde de dimensiones establecidas con un martillo de 4.54 kg (10 lb) soltado de una altura de 457 mm (18 pul.). (American Society for Testing and Materials, 2012).

La norma a utilizar es la ASTM D1557-12 que especifica tres métodos para realizar la compactación. Debido a las características del suelo estudiado el método A es el que corresponde realizar. El método A especifica el uso del mismo molde de la prueba Proctor estándar, con un volumen de 943,3 cm³, donde el suelo se compacta en 5 capas con 25 golpes por capa mediante un pisón de peso 44.5 N cuya distancia de caída es de 457.2 mm (American Society for Testing and Materials, 2012).

3.6.1. Equipo y procedimiento para el ensayo de Proctor Modificado método A.

Tabla 7:

Especificaciones para la prueba Proctor modificada.

Concepto	Método A
Diámetro del Molde	101.6 mm
Volumen del Molde	943.3 cm ³
Peso del Pisón	44.5 N
Altura de caída del Pisón	457.2 mm
Número de golpes del pisón por capa	25
Número de capas	5
Energía de compactación	2696 kN-m/m ³
Suelo a usar	Porción que pasa la malla No. 4

- Pisón o Martillo



- Molde Proctor estándar
 - Balanza
 - Probeta
 - Herramientas varias de mezcla: Pala pequeña
- 1) Primero se registra el peso del molde Proctor estándar sin collarín (W_{molde}) en gramos.
 - 2) A continuación, aplicando el método A, se utiliza el material que pasa el tamiz N°4. Se realiza la compactación en 5 capas con 25 golpes por capa con el martillo o pisón de 44.5 N. Se registra el peso del suelo compactado más el molde ($W_{molde+suelo}$) en gramos.
 - 3) Se repite el paso 2 aumentando el porcentaje de humedad del suelo hasta obtener 5 humedades con sus respectivos pesos registrados para obtener la curva de compactación

El peso unitario húmedo del suelo para cada porcentaje de humedad se puede calcular con la fórmula:

$$\gamma_{húmedo} = \frac{W_{molde+suelo} - W_{molde}}{943.3 \text{ cm}^3} * 1000 \text{ [kN/m}^3\text{]}$$

Ecuación 10. Peso unitario húmedo.

- 4) Se determina la humedad de las 5 muestras de suelo utilizadas en la compactación (ω) en porcentaje mediante el proceso descrito anteriormente. Ahora el peso unitario seco del suelo es determinado por la expresión:

$$\gamma_{seco} = \frac{\gamma_{húmedo}}{1 + \omega}$$

Ecuación 11. Peso unitario seco.



3.7. Equipo y procedimiento para la preparación del suelo para la medición de las velocidades sísmicas.

- Martillo Proctor Modificado
- Caja experimental
- Balanza
- Probeta de 500 cc
- Herramientas varias: Pala, Bandejas, Aspersor de agua

Se utilizó el martillo mencionado y se fabricó una caja de madera cuyas medidas son 30cm x 30cm x 32cm, donde se colocó el material extraído del sector Santa Ana. La caja tiene dos orificios laterales para aplicar el equipo de Ultrasonido como se muestra en la Ilustración 14.



Ilustración 13. Caja utilizada en el ensayo.

Debido a la gran energía de compactación requerida para obtener el peso unitario seco máximo según el ensayo Proctor modificado se opta por dividir el material en 6 capas cada 5 cm, utilizando la tapa de la caja como compactador junto con el martillo del Proctor Modificado, variando la humedad y grado de compactación del material. La



compactación del material varía de tal forma que se comienza una medición con material suelto, luego se realizan 9 golpes por capa de material, posteriormente 18 golpes por capa y por último 36 golpes por capa. De esta manera varía la densidad del material.

3.8. Ensayo sísmico.

Para el ensayo, es necesario instalar geófonos (receptores), conectados a un sismógrafo, el mismo que registra la información generada por la carga sísmica, la cual es producida por un golpe sobre una placa metálica en el suelo. Para determinar la velocidad de ondas primarias se utilizan geófonos verticales y para determinar las ondas de corte se usan geófonos horizontales.

Con la información registrada, se procede a su análisis mediante un software especializado, proporcionando información concerniente al tiempo transcurrido entre la generación de la onda en el suelo y la recepción en los geófonos.

3.9. Equipo y procedimiento para el ensayo sísmico.

- Sismógrafo PASI modelo 16SG24-N (Equipo combinado – sismógrafo y tomógrafo eléctrico).
- 1 cable sísmico.
- 2 geófonos verticales de 10 Hz.
- 2 geófonos horizontales de 4.5 Hz.
- 1 geófono starter.
- Software SISMO PC
- Metro
- Balanza
- Herramientas varias: Pala, tina para mezclar el suelo



Ilustración 14. Equipo utilizado en ensayo sísmico.

3.9.1. Geófonos.

Llamado también detector o sismómetro, transforma las oscilaciones sísmicas del suelo en señales eléctricas. Los instrumentos usados son sensibles a vibraciones entre 5 y 100 ciclos por segundo para trabajos de refracción, donde responde sólo a la componente vertical del movimiento del suelo. Por fines prácticos se considera como si el geófono se moviera formando parte del suelo ya sea enterrado o simplemente depositado. Todos los geófonos requieren amplificación y registro eléctrico (Dobrin, 1980).

- Se utilizaron geófonos por medio del sismógrafo PASI 16SG24-N (Ilustración 17) que mide velocidades primarias y secundarias recibiendo señal de un geófono starter que fue aplicado con el golpe de un marcador con una fuerza relativamente baja.
- En primer lugar, se procedió a llenar la caja de madera con el suelo, colocándolo paulatinamente, hasta llenar la caja. Posteriormente se enraza, se registra el peso y luego se colocan 2 geófonos verticales y 2 horizontales, el geófono starter que registra el inicio del ensayo como se muestra en la Ilustración 18. Luego de medir la distancia



entre el geófono starter y los distintos geófonos horizontales y verticales, finalmente se genera el impacto mediante un golpe sobre el geófono starter en dirección vertical y otro impacto en dirección horizontal y se registran los datos en el sismógrafo.

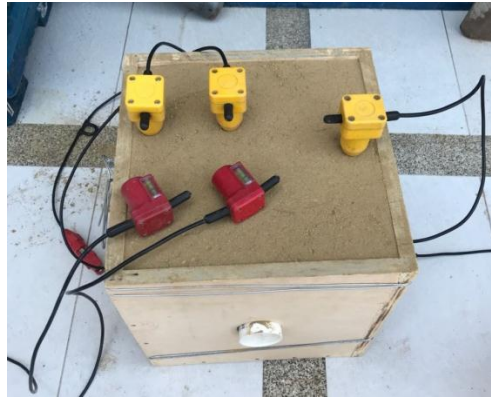


Ilustración 15. Configuración de geófonos para ensayo sísmico.

- El primer ensayo se realizó en estado suelto y con la menor humedad del material. Los siguientes ensayos se realizaron con compactación de 9, 18 y 36 golpes por capa con la humedad existente en el material. Posteriormente, las siguientes fases se realizaron con la incorporación de agua al material para incrementar la humedad. El registro sísmico se llevó a cabo en cada uno de los ensayos realizados.
- Cabe recalcar que se trató de mantener constante la humedad en 5 valores (6, 8, 13, 16, 18) realizando 4 ensayos de compactación por humedad, como ya se mencionó, aumentando el número de golpes por capa en cada uno
- Una vez terminado todos los ensayos de laboratorio, se procedió a tabular los datos resultantes de esta medición, obteniendo así tiempos de las ondas que atravesaron la muestra en las condiciones mencionadas, y mediante este y las distancias medidas del geófono starter a los geófonos horizontales y verticales, es posible obtener la velocidad sísmica correspondiente mediante:

$$V_p = \frac{\text{distancia del geofono starter al geofono vertical}}{\text{tiempo de llegada de onda primaria}}$$

Ecuación 12. Velocidad de onda primaria.

$$V_s = \frac{\text{distancia del geofono starter al geofono horizontal}}{\text{tiempo de llegada de onda secundaria}}$$

Ecuación 13. Velocidad de onda secundaria.

- Los tiempos de llegada de onda se obtienen mediante el software especializado SISMO PC, el cual nos muestra en pantalla la forma de las ondas. De esta manera, es posible determinar el tiempo que demora en llegar la onda a los geófonos (Ilustración 19).

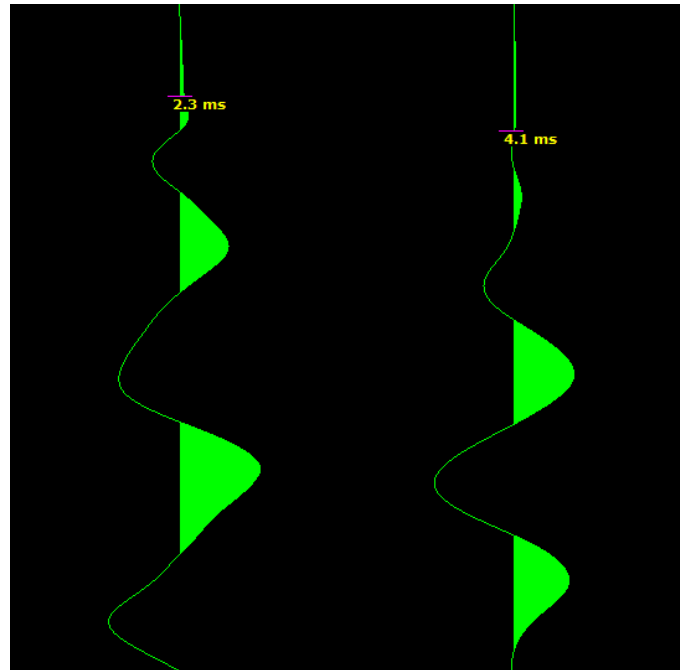


Ilustración 16. Determinación de tiempos de llegada de onda mediante software SISMO PC.

Es importante considerar que la transmisión de ondas generada inicia sobre un geófono que está compuesto por un material rígido, a través del cual se transmite la onda hasta alcanzar el suelo y al sensor del geófono starter. Esta circunstancia hace que el tiempo registrado en el equipo sea relativo, razón por la cual, los valores de V_p y V_s también serán relativos.



Por esta razón se debe aplicar un coeficiente de corrección a las velocidades registradas. Este coeficiente de corrección toma en cuenta el fenómeno indicado anteriormente, mejorando así los resultados de los tiempos registrados en el sismógrafo. Para obtener este coeficiente, se parte de la formulación propuesta por Kaptan (2012) que relaciona las velocidades de transmisión de onda secundarias con el peso unitario húmedo de un material:

$$\gamma_h = 4,3V_{s1}^{0,25}$$

Ecuación 14. Ecuación de Kaptan.

De esta manera fue posible determinar la velocidad secundaria a la que se obtiene el peso unitario obtenido en el ensayo y realizar una comparación entre la velocidad secundaria obtenida con esta fórmula y la registrada en el sismógrafo, obteniendo así un coeficiente de corrección general para velocidades secundarias y primarias.

3.9.1.1. Correlación entre variables.

Para realizar la correlación entre velocidades sísmicas (V_p y V_s) con peso unitario, y la correlación entre velocidades sísmicas (V_p y V_s) con humedad, se procedió a utilizar el programa Excel y el programa estadístico IBM SPSS Statistics.

3.9.2. Correlación con Excel. El complemento a utilizar es una función de Excel llamada Regresión donde se incluyen las 3 variables a analizar en dos casos: Velocidades sísmicas (V_p y V_s) con Peso unitario y Velocidades sísmicas (V_p y V_s) con Humedad.

El análisis de regresión lineal es una técnica estadística utilizada para estudiar la relación entre variables, en nuestro caso las V_p , V_s , con Peso Unitario y con Humedad. Se utiliza para predecir un amplio rango de fenómenos. La función utilizada de Excel es la regresión múltiple ya que involucra 2 o más variables, se va a desarrollar así una



ecuación lineal con fines predictivos. Es decir, se va a hallar un tipo de relación entre dos o más variables, en nuestro caso los parámetros del suelo mencionados. Con este procedimiento se va a encontrar valores estadísticos de la regresión que se muestran en resultados. La regresión múltiple encontró una serie de valores que se muestran en los anexos adjuntos.

3.9.3. Correlación con IBM SPSS Statistics. IBM® SPSS Statistics® ofrece técnicas de recolección de datos y analítica predictiva para solucionar múltiples problemas empresariales y de investigación. Brinda varias técnicas, que incluyen pruebas de hipótesis lo que facilita la gestión de los datos, la selección y la ejecución de análisis y el intercambio de resultados, así como análisis multivariados y de sobrevivencia. Algunas funciones incluyen estadísticas bayesianas, gráficas listas para su publicación y una mejor integración a software de terceros (IBM, 2015).

Con el uso de este software de análisis estadístico fue posible obtener como una segunda alternativa, una correlación entre las variables en cuestión. Como primera aproximación se realizó el análisis de Spearman entre las variables: peso unitario húmedo, humedad, velocidad de onda primaria (V_p) y velocidad de onda secundaria (V_s). Como se observa en la Ilustración 20, para obtener el coeficiente de correlación de Spearman entre las cuatro variables se debe escoger la opción “Bivariadas”.

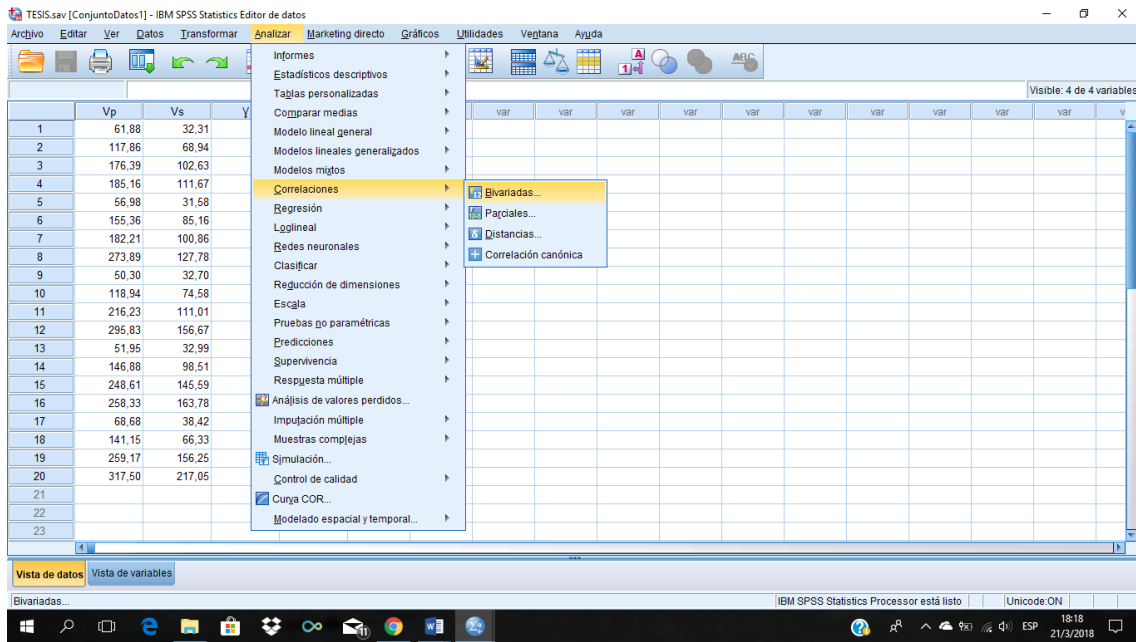


Ilustración 17. Procedimiento Software IBM

Al escoger la opción “Bivariadas” nos aparece el siguiente cuadro de diálogo:

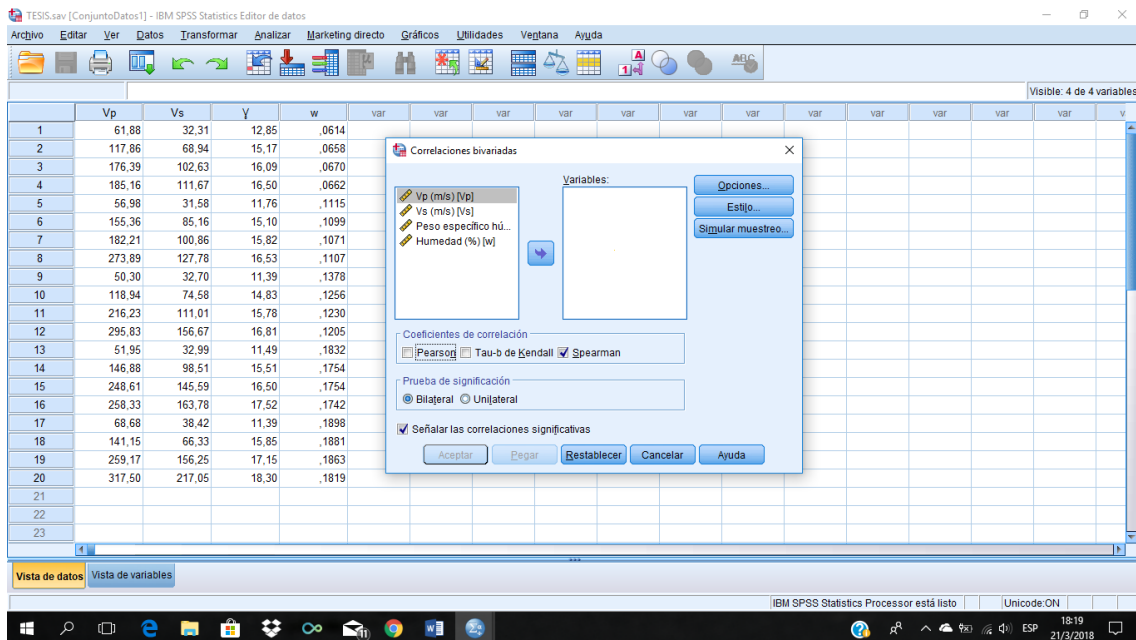


Ilustración 18. Procedimiento Software IBM.

En donde se debe escoger las variables a analizar y el método de Spearman. Los resultados de este análisis se muestran en la sección de Resultados.

Luego de realizado este análisis se procede a realizar una correlación múltiple entre las variables: peso unitario húmedo, velocidad de onda primaria (Vp) y velocidad de onda secundaria (Vs) mediante la herramienta “Linear”:

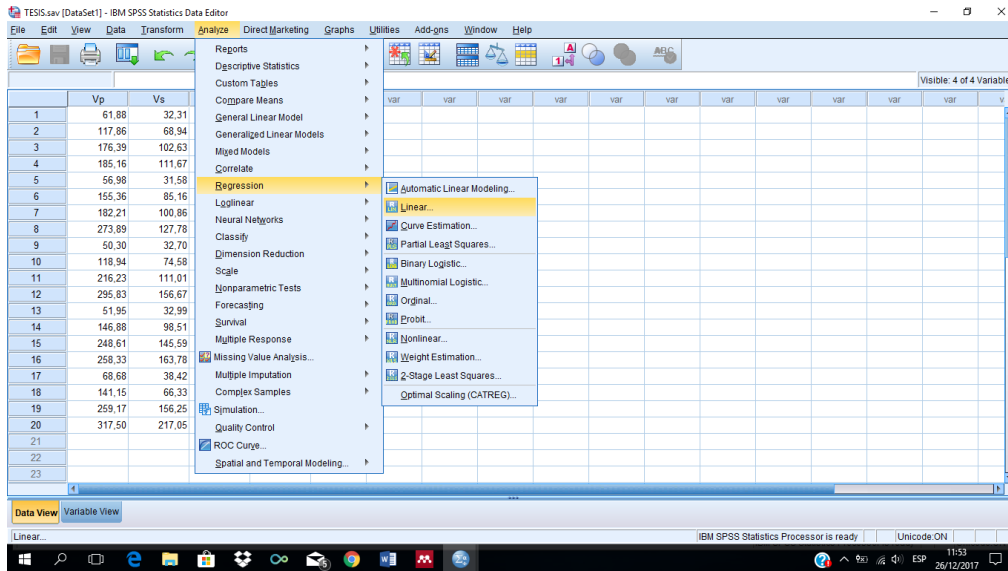


Ilustración 19. Procedimiento Software IBM.

A continuación, en el cuadro de diálogo, se escoge como variable dependiente: peso unitario húmedo; y como variables independientes: Vp y Vs:

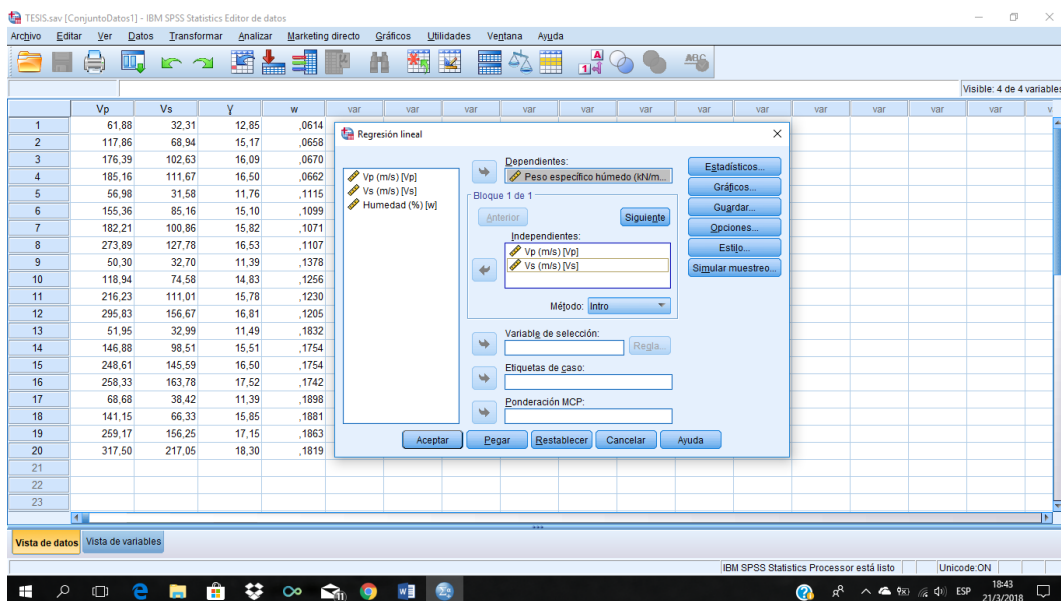


Ilustración 20. Procedimiento Software IBM.



De igual manera, los resultados de este análisis de correlación lineal múltiple se muestran en la sección Resultados. A continuación, se realiza el mismo procedimiento, pero cambiando la variable dependiente: Humedad.

También se realiza una correlación simple entre las variables en estudio. La primera correlación simple se realiza entre el peso unitario húmedo y la velocidad primaria (Vp) escogiendo la opción “Estimación Curvilínea”:

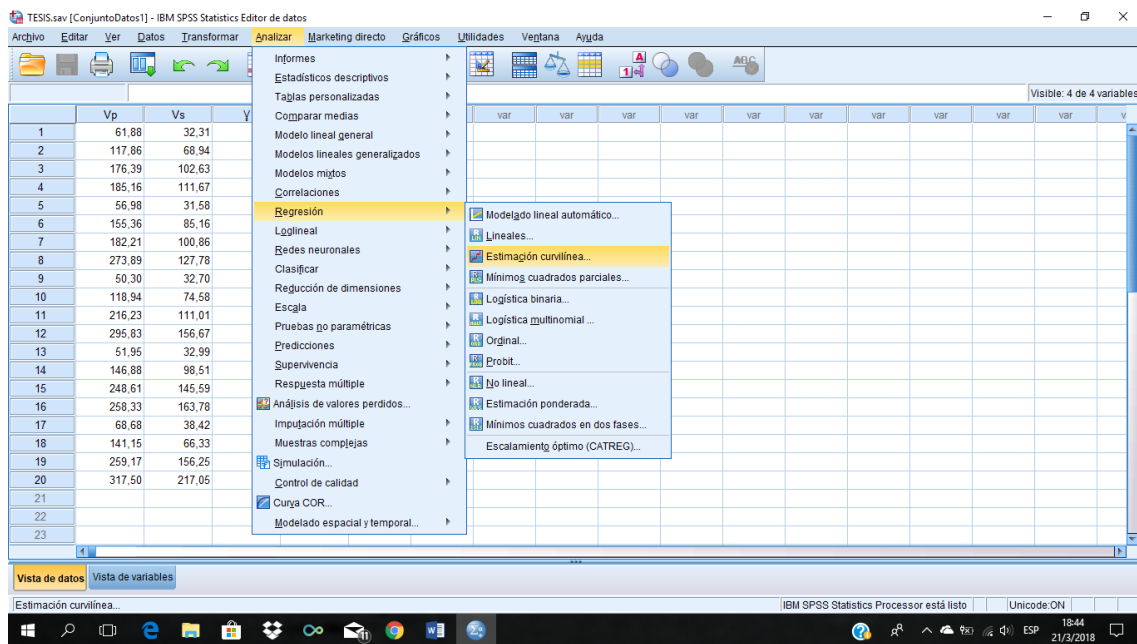


Ilustración 21. Procedimiento Software IBM.

En donde nos aparecerá el siguiente cuadro de dialogo, se debe escoger como variable dependiente Peso unitario húmedo y como variable independiente Vp además de seleccionar el modelo que se requiera, en nuestro caso se proyectaron todos los modelos ofrecidos por el programa para luego escoger el de mejor ajuste:

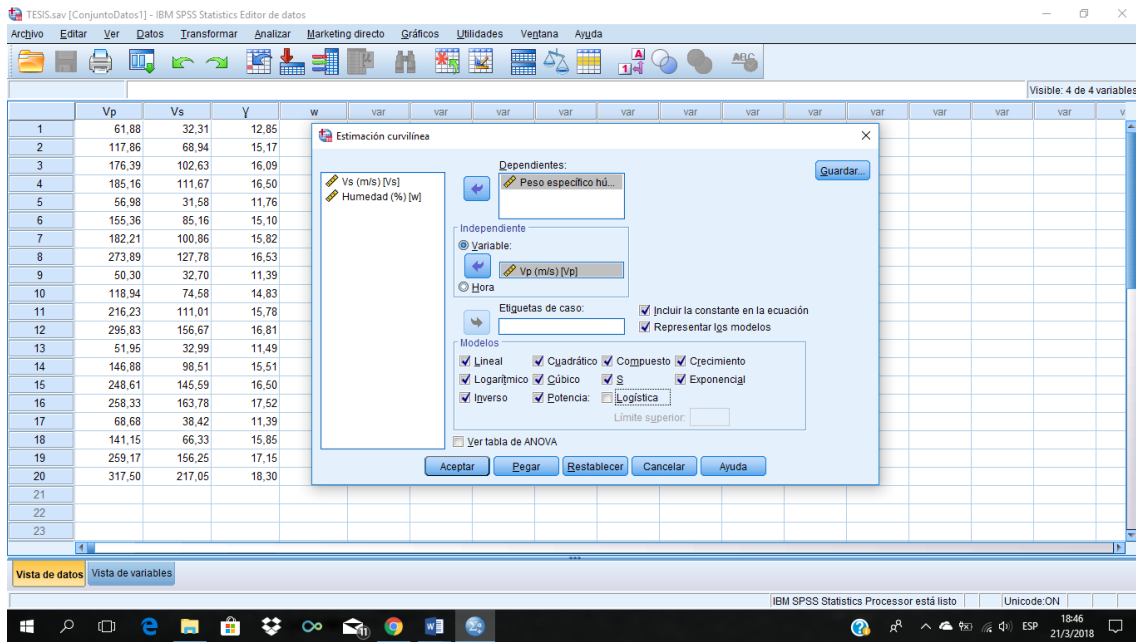


Ilustración 22. Procedimiento Software IBM.

A continuación, se realiza el mismo procedimiento cambiando la variable independiente por la velocidad secundaria Vs.

Además, se realiza una correlación simple entre el porcentaje de humedad y las velocidades sísmicas siguiendo el procedimiento descrito anteriormente, con la diferencia de que el modelo de ajuste debe ser únicamente lineal para reflejar de mejor manera el comportamiento de las velocidades sísmicas con respecto al porcentaje de humedad.



Capítulo 4

Resultados y Discusión

4.1. Granulometría.

En las siguientes tablas se presentan los resultados obtenidos del ensayo de granulometría realizados en el laboratorio de suelos de la Universidad de Cuenca, para cada una de las muestras de los tres suelos en estudio.

Tabla 8:

Granulometría de muestra de suelo sector El Valle.

Muestra de Suelo sector El Valle	
Tamiz #	% que pasa
4	99,09%
8	98,63%
10	98,45%
16	97,28%
30	94,18%
40	92,50%
50	90,40%
100	83,63%
200	78,02%
Fondo	0,00%



Tabla 9:

Granulometría de muestra de suelo sector Santa Ana.

Muestra de Suelo sector Santa Ana	
Tamiz #	% que pasa
4	99,99%
8	99,90%
10	99,88%
16	99,76%
30	99,48%
40	99,31%
50	98,87%
100	91,97%
200	78,89%
Fondo	0,00%

Tabla 10:

Granulometría de muestra de suelo sector Cojitambo.

Muestra de Suelo sector Cojitambo	
Tamiz #	% que pasa
4	99,85%
8	99,82%
10	99,80%
16	99,72%
30	99,54%



40	99,43%
50	99,29%
100	99,00%
200	98,78%
Fondo	0,00%

Independientemente del origen del suelo, los tamaños de las partículas que conforman el mismo varían en un amplio rango donde son llamados grava, arena, limo o arcilla, dependiendo del tamaño que predominan. Los limos consisten en granos muy finos de cuarzo y las arcillas son partículas submicroscópicas en forma de escamas de minerales arcillosos. (Das, 2001)

Como el suelo fue lavado se debe realizar la granulometría con el material restante del lavado más la cantidad de material que fue lavado. Es decir, se debe calcular los pesos retenidos en relación con el peso total de la muestra de suelo seco (Suelo lavado + Suelo restante del lavado).

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede observar que el suelo de Cojitambo es el que está mayormente compuesto de material fino pudiendo ser este limo o arcilla, ya que más del 90% pasa el tamiz No. 200 a diferencia de los otros dos suelos (Santa Ana y El Valle), que parecen estar compuestos por un pequeño porcentaje de arena.

4.1.1. Curva de distribución granulométrica. Los resultados del análisis por cribado se presentan en gráficas semilogarítmicas, donde los diámetros de las partículas se grafican en escala logarítmica y el porcentaje que pasa correspondiente a cada tamiz en escala aritmética, como se muestra a continuación de cada sector extraído.

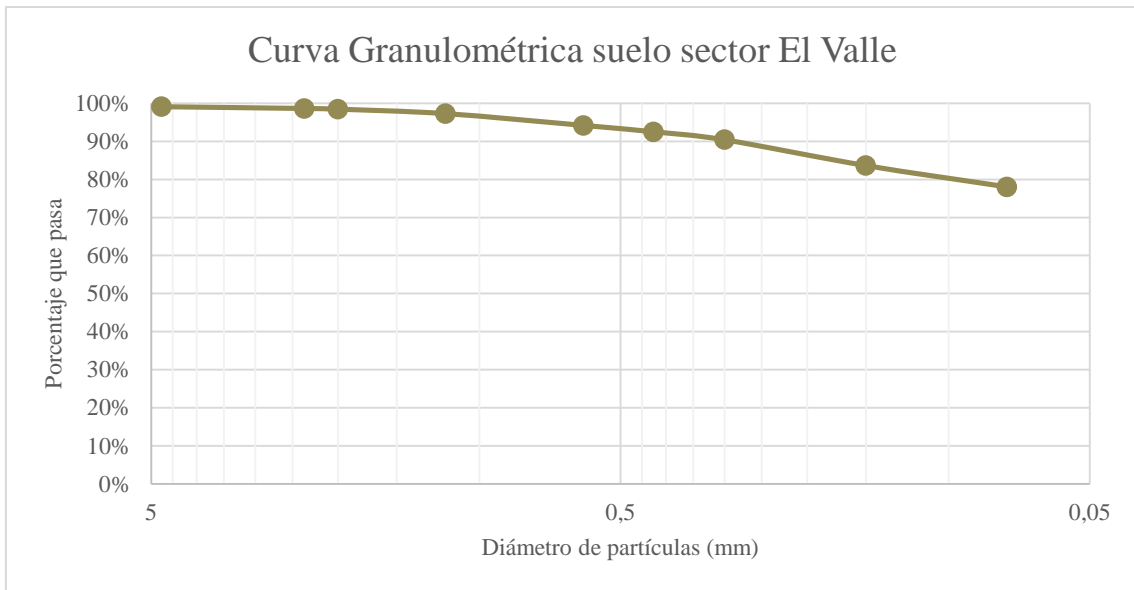


Ilustración 23. Curva Granulométrica Suelo sector El Valle.

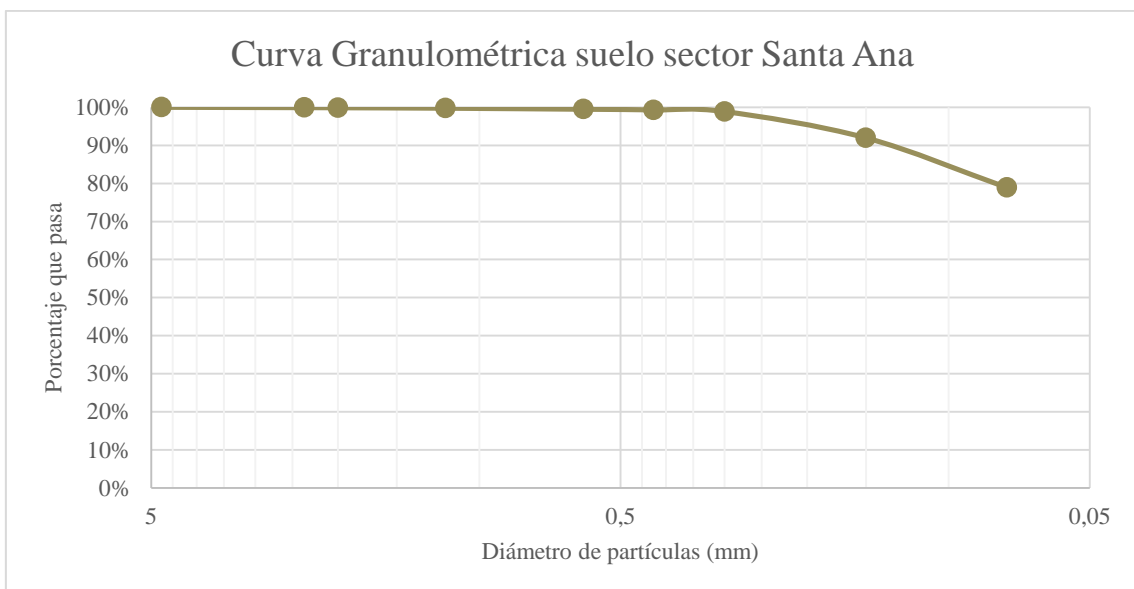


Ilustración 24. Curva Granulométrica Suelo sector Santa Ana.

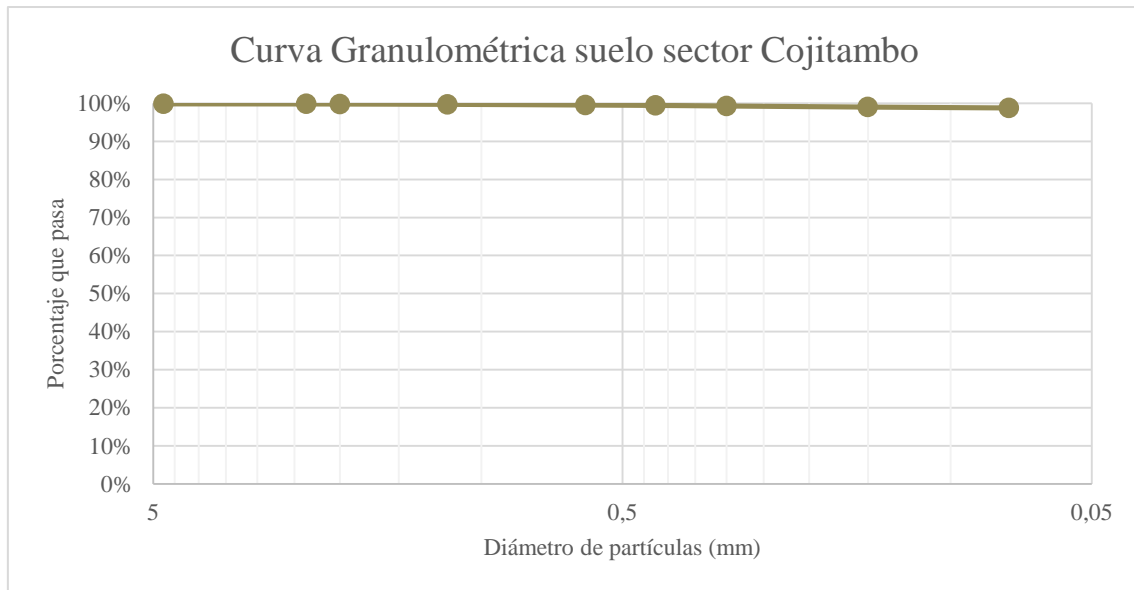


Ilustración 25. Curva Granulométrica Suelo sector Cojitambo.

Se puede observar que, de acuerdo a las curvas granulométricas de los suelos en estudio, todos corresponden a suelos de grano fino. Al conocer los valores de sus límites líquido y plástico, así como su índice de plasticidad, se puede afirmar si se trata de suelos limosos o arcillosos.

4.2. Límites de Atterberg.

A continuación, se exponen los resultados de los ensayos para obtener tanto el límite líquido como plástico de los 3 suelos estudiados. Se adjunta en los anexos el registro fotográfico de laboratorio necesario para hallar los límites de Atterberg.



4.2.1. Límite Líquido.

Tabla 11:

Resultados de límite líquido de cada prueba de acuerdo al procedimiento del ensayo de humedad para muestra de suelo sector El Valle.

Muestra de Suelo sector El Valle				
Muestra #	# de golpes	Humedad (w)	LL Calculado	LL Asumido
1	40	45%	49,64%	
2	12	55%		50%
3	11	59%		
4	24	50%		

El límite líquido se calcula de acuerdo a la recta llamada curva de flujo, la cual consiste en un ajuste logarítmico de la gráfica de número de golpes contra contenido de humedad. El límite líquido de un suelo se obtiene al evaluar esta expresión de ajuste en el valor de 25 golpes, es decir se obtiene un porcentaje de humedad que corresponde al límite líquido. Existen variables que intervienen en el resultado de la prueba como utilizar una mayor porción de suelo que la normada, no cumplir con la frecuencia de golpes descrita en la misma, verificar que la altura de caída de la cuchara se encuentre a 10 mm. así como los agentes externos de temperatura y humedad que intervienen en el laboratorio de suelos de la Universidad de Cuenca.

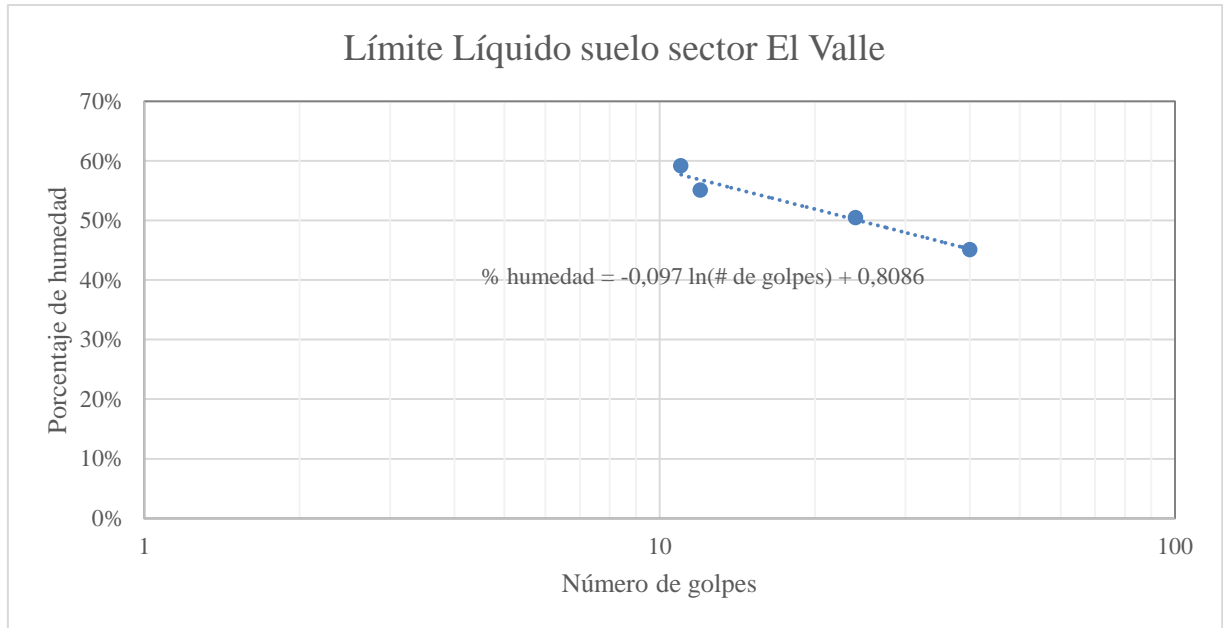


Ilustración 26. Gráfico semilogarítmico correspondiente a los puntos obtenidos de las 4 pruebas y su curva de flujo de El Valle.

Tabla 12:

Resultados para límite líquido de cada prueba de acuerdo al procedimiento del ensayo de humedad para muestra de suelo sector Santa Ana.

Muestra de Suelo sector Santa Ana			
Muestra	Humedad	LL	LL
#	(w)	Calculado	Asumido
1	27%	28,85%	
2	28%		29%
3	28%		
4	31%		

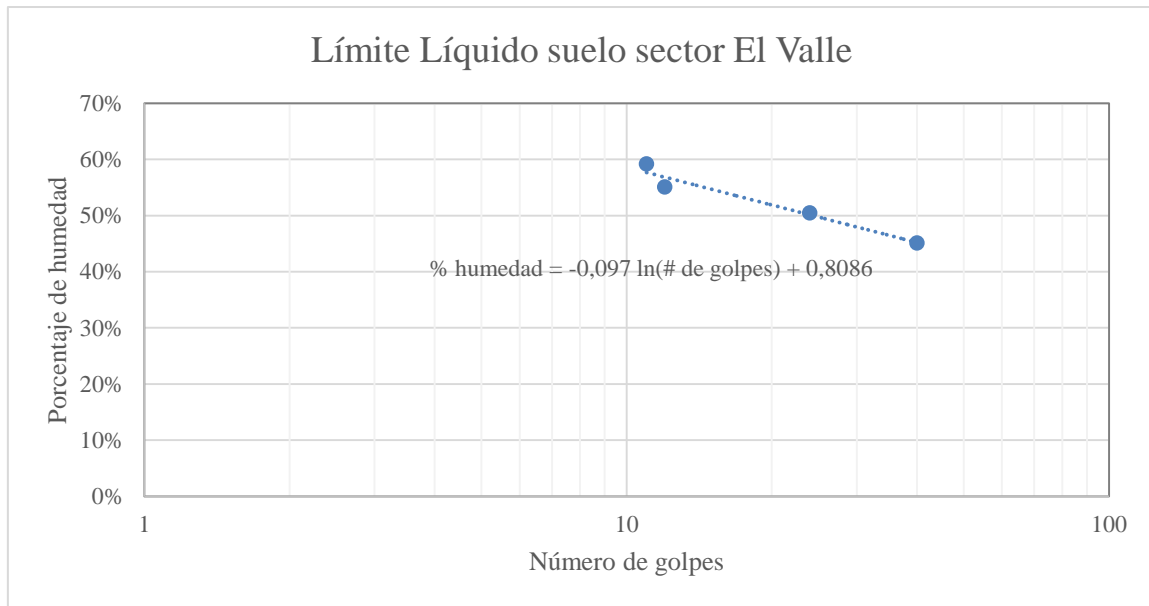


Ilustración 27. Gráfico semilogarítmico correspondiente a los puntos obtenidos de las 4 pruebas y su curva de flujo de Santa Ana.

Tabla 13:

Resultados para límite líquido de cada prueba de acuerdo al procedimiento del ensayo de humedad para muestra de suelo sector Cojitambo.

Muestra de Suelo sector Cojitambo				
Muestra	# de	Humedad	LL	LL
#	golpes	(w)	Calculado	Asumido
1	33	49%	50,04%	
2	28	49%		50%
3	22	51%		
4	14	53%		

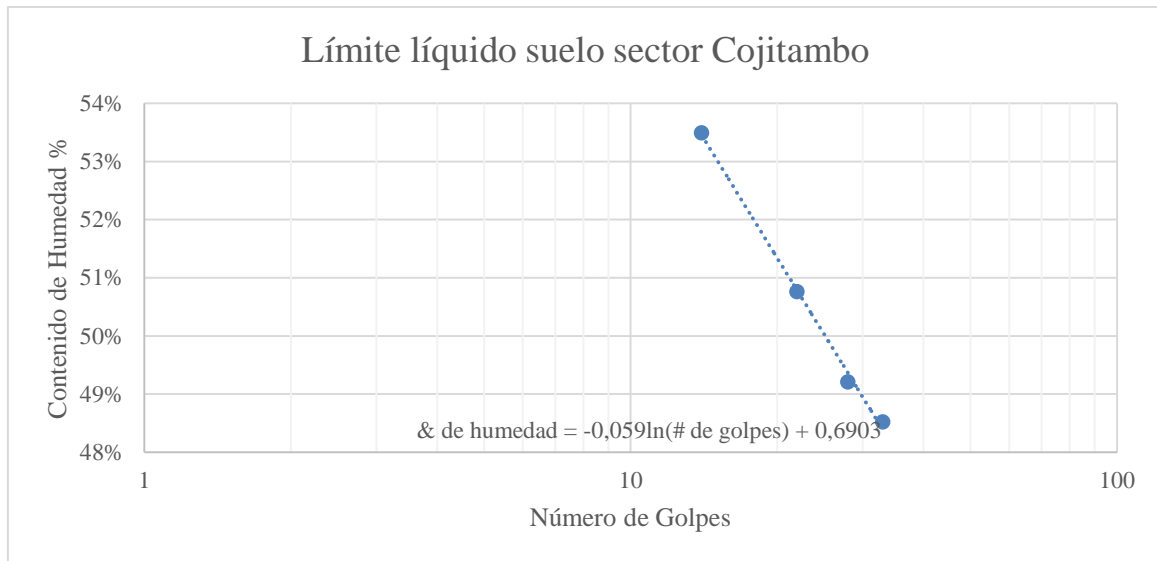


Ilustración 28. Gráfico semilogarítmico correspondiente a los puntos obtenidos de las 4 pruebas y su curva de flujo de Cojitambo.

4.2.2. Límite Plástico. Con el proceso descrito en el apartado correspondiente se obtuvieron los valores tanto de límite plástico como índice de plasticidad para los 3 suelos estudiados. Estos resultados se exhiben en las siguientes tablas.

Tabla 14:

Resultados para límite plástico de acuerdo al procedimiento del ensayo de humedad de El Valle.

Muestra de Suelo sector El Valle			
Muestra #	Humedad (w)	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
1	30%	28,60%	21,03%
2	26%		
3	29%		



Tabla 15:

Resultados para límite plástico de acuerdo al procedimiento del ensayo de humedad de Santa Ana.

Muestra de Suelo sector Santa Ana			
Muestra	Humedad	Límite	Índice de
#	(w)	Plástico	Plasticidad
1	25%	23,46%	5,38%
2	24%		
3	22%		

Tabla 16:

Resultados para límite plástico de acuerdo al procedimiento del ensayo de humedad de Cojitambo.

Muestra de Suelo sector Cojitambo			
Muestra	Humedad	Límite	Índice de
#	(w)	Plástico	Plasticidad
1	30%	29,04%	21,00%
2	27%		
3	30%		

4.3. Clasificación de Suelos.

Con la granulometría y los valores de los límites de Atterberg obtenidos para cada una de las 3 muestras de suelo, se procede a clasificarlos mediante el método unificado de clasificación de suelos (SUCS) obteniendo suelos de las siguientes características:



Tabla 17:

Resultados clasificación de suelos (suelo sector El Valle).

El Valle		
F (% que pasa el 200)	Límite Líquido	Índice de Plasticidad
78%	50%	21%
Clasificación según SUCS		MH
Limo elástico con arena		

Tabla 18:

Resultados clasificación de suelos (suelo sector Santa Ana).

Santa Ana		
F (% que pasa el 200)	Límite Líquido	Índice de Plasticidad
79%	29%	6%
Clasificación según SUCS		ML
Arcilla limosa con arena		

Tabla 19:

Resultados clasificación de suelos (suelo sector Cojitambo).

Cojitambo		
F (% que pasa el 200)	Límite Líquido	Índice de Plasticidad
99%	50%	21%
Clasificación según SUCS		MH
Limo elástico		



Como se puede observar el suelo del sector Santa Ana fue clasificado como arcillo limoso. Los ensayos de compactación y registro sísmico fueron realizados con este suelo.

4.4. Compactación De Suelos.

Con el suelo procedente del sector Santa Ana, se realizó la prueba Proctor Modificado para hallar la humedad óptima, así como la densidad seca máxima para su uso en el ensayo sísmico.

La humedad óptima y la densidad seca máxima del suelo se obtienen mediante un análisis del gráfico de humedad contra peso unitario seco de los 5 puntos obtenidos en el ensayo mostrados en la Tabla 20. El gráfico antes mencionado corresponde a la Ilustración 32 donde se puede observar los 5 puntos graficados así como un ajuste polinómico de segundo grado para obtener de forma analítica la humedad óptima y el peso unitario seco máximo.

Tabla 20.

Resultados de ensayo Próctor modificado para muestra de suelo sector Santa Ana.

Volumen (cm ³)	Peso de suelo húmedo (N)	Peso unitario húmedo (kN/m ³)	Humedad (%)	Peso unitario seco (kN/m ³)
943,3	18,12	19,21	8,9%	17,64
943,3	19,18	20,33	11,2%	18,29
943,3	19,89	21,09	14,2%	18,47
943,3	19,83	21,02	18,9%	17,68
943,3	18,92	20,05	20,5%	16,64

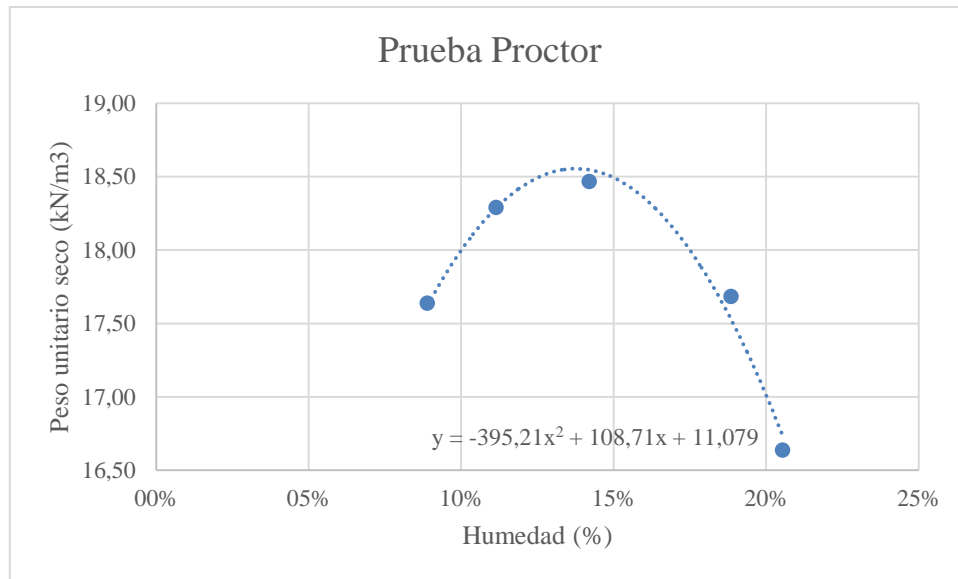


Ilustración 29. Humedad vs. Peso Unitario.

Mediante un análisis de esta curva de segundo grado fue posible determinar la humedad óptima en un valor de 13.75% y su peso unitario seco máximo en 18.55 kN/m³.

4.5. Ensayo sísmico.

Para encontrar las velocidades sísmicas para cada muestra de suelo arcillo limoso se realiza un promedio entre los valores de velocidad que brinda cada geófono, como se utilizaron dos geófonos para cada velocidad sísmica (primaria y secundaria). En la Tabla 21 se muestran las velocidades sísmicas medidas en campo.



Tabla 21:

Resultados de medición de velocidades sísmicas (Vp y Vs).

# Muestra	Humedad (%)	# Golpes/capa	Peso unitario húmedo (kN/m ³)	Peso unitario seco (kN/m ³)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
Muestra 1	6,14%	0	12,85	12,11	61,88	32,31
	6,58%	9	15,17	14,23	117,86	68,94
	6,70%	18	16,09	15,08	176,39	102,63
	6,62%	36	16,50	15,47	185,16	111,67
Muestra 2	11,15%	0	11,76	10,58	56,98	31,58
	10,99%	9	15,10	13,61	155,36	85,16
	10,71%	18	15,82	14,29	182,21	100,86
	11,07%	36	16,53	14,89	273,89	127,78
Muestra 3	13,78%	0	11,39	10,01	50,30	32,70
	12,56%	9	14,83	13,18	118,94	74,58
	12,30%	18	15,78	14,05	216,23	111,01
	12,05%	36	16,81	15,00	295,83	156,67
Muestra 4	18,32%	0	11,49	9,71	51,95	32,99
	17,54%	9	15,51	13,20	146,88	98,51
	17,54%	18	16,50	14,04	248,61	145,59
	17,42%	36	17,52	14,92	258,33	163,78
Muestra 5	18,98%	0	11,39	9,57	68,68	38,42
	18,81%	9	15,85	13,34	141,15	66,33
	19,15%	18	17,15	14,39	259,17	156,25
	18,19%	36	18,30	15,49	317,50	217,05



Como se mencionó en el apartado de Materiales y Métodos, estas velocidades sísmicas son relativas por lo que se les debe aplicar un factor de corrección obtenido mediante el proceso descrito en el mismo apartado. Se obtuvo un coeficiente de corrección para cada velocidad dando como resultados:

Tabla 22:

Resultados de medición de velocidades sísmicas corregidos.

# Muestra	Humedad (%)	Peso unitario		
		húmedo (kN/m ³)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
Muestra 1	6,14%	12,85	137,90	56,91
	6,58%	15,17	262,66	121,40
	6,70%	16,09	393,10	180,73
	6,62%	16,50	412,66	196,64
Muestra 2	11,15%	11,76	126,99	55,62
	10,99%	15,10	346,23	149,97
	10,71%	15,82	406,08	177,61
	11,07%	16,53	610,39	225,01
Muestra 3	13,78%	11,39	112,11	57,58
	12,56%	14,83	265,07	131,34
	12,30%	15,78	481,90	195,49
	12,05%	16,81	659,29	275,88
Muestra 4	18,32%	11,49	115,77	58,09
	17,54%	15,51	327,33	173,48
	17,54%	16,50	554,05	256,38
	17,42%	17,52	575,72	288,41
Muestra 5	18,98%	11,39	153,07	67,66
	18,81%	15,85	314,56	116,81
	19,15%	17,15	577,58	275,15
	18,19%	18,30	707,58	382,21

El coeficiente de corrección obtenido para las velocidades primarias es de 2,23 y para las velocidades secundarias 1,76. Aplicando estos coeficientes de corrección a las velocidades registradas inicialmente se corrige parcialmente el fenómeno descrito en la medición.



Corregidas las velocidades sísmicas medidas en campo se procede a realizar una correlación entre el peso unitario húmedo y las velocidades sísmicas. Los modelos obtenidos son aplicables dentro del rango de velocidades sísmicas estudiado en el ensayo que corresponde entre 110 m/s a 710 m/s para V_p y entre 50 m/s y 390 m/s para V_s .

4.6. Correlación entre peso unitario húmedo y velocidades sísmicas usando el software Excel.

Por medio de la función de Excel los valores más importantes de la regresión entre velocidades primarias, velocidades secundarias y peso unitario halladas son las siguientes. Los demás valores hallados por el programa Excel se adjuntan en Anexos.

Se va a utilizar el modelo de ecuación siguiente:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2$$

Ecuación 15. Modelo de ecuación regresión múltiple.

Donde:

y = Peso unitario del suelo (kN/m^3)

x_1 = Velocidad primaria, V_p (m/s)

x_2 = Velocidad secundaria, V_s (m/s)

El resumen de los resultados hallados por Excel se presenta en la Tabla 23.



Tabla 23:

Resumen del modelo entre Velocidad y Peso Unitario (Excel).

Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de correlación	
múltiple	0,839058116
Coeficiente de determinación R ²	
R ² ajustado	0,704018521
Error típico	1,114016156

El cuadrado del coeficiente de correlación múltiple es una medida estandarizada que toma valores entre 0 y 1 (0 cuando las variables son independientes y 1 cuando existe perfecta relación entre ellas). En este caso con un valor del 0,83 el peso unitario depende de las variables de velocidad como Vp y Vs. A pesar de que este modelo presenta un coeficiente de determinación elevado, arroja resultados inconsistentes de peso unitario húmedo para velocidades sísmicas altas, por lo que no resulta confiable emplear este modelo para estimar dicho parámetro a partir de las velocidades sísmicas del suelo.

Sin embargo, la ecuación resultante de esta correlación es la siguiente:

$$y = 10,184 + 0,019x_1 - 0,001x_2$$

Ecuación 16. Correlación entre Vp, Vs y Peso Unitario.

4.7. Correlación entre peso unitario húmedo y velocidades sísmicas usando el software IBM SPSS Statistics.

Como ya se mencionó en el apartado de Materiales y Métodos, se utilizó el software IBM SPSS Statistics como una segunda alternativa para realizar la correlación entre las variables en cuestión.



A continuación, se muestran los resultados del análisis del coeficiente de Spearman entre las variables: peso unitario húmedo, velocidad de onda primaria (V_p) y velocidad de onda secundaria (V_s).

Tabla 24:

Análisis de correlación de Spearman entre las variables: peso unitario húmedo, velocidad de onda primaria (V_p) y velocidad de onda secundaria (V_s).

			Correlaciones		
			V_p (m/s)	V_s (m/s)	Peso unitario húmedo (kN/m ³)
Rho de Spearman	V_p (m/s)	Coeficiente de correlación	1,000	,964**	,935**
		Sig. (bilateral)	.	,000	,000
		N	20	20	20
	V_s (m/s)	Coeficiente de correlación	,964**	1,000	,929**
		Sig. (bilateral)	,000	.	,000
		N	20	20	20
Peso unitario húmedo (kN/m ³)		Coeficiente de correlación	,935**	,929**	1,000
		Sig. (bilateral)	,000	,000	.
		N	20	20	20

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

El coeficiente de Spearman nos indica el nivel de correlación que existe entre las distintas variables. En la Tabla 24 se puede observar que existe una correlación positiva elevada entre peso unitario húmedo, velocidad primaria (V_p) y velocidad secundaria (V_s). Esto quiere decir que se va a obtener un modelo de regresión lineal muy ajustado entre la variable dependiente peso unitario húmedo, y las variables independientes velocidad primaria (V_p) y velocidad secundaria (V_s). Los resultados del modelo de regresión lineal múltiple entre estas tres variables se muestran a continuación.



Tabla 25:

Coefficientes del modelo de regresión lineal múltiple entre peso unitario húmedo, Vs y Vp.

Coefficientes ^a						
Modelo		Coefficients no estandarizados		Coefficients estandarizados	t	Sig.
		B	Error estándar	Beta		
1	(Constante)	11,277	,452		24,969	,000
	Vp (m/s)	,007	,004	,586	1,530	,144
	Vs (m/s)	,008	,009	,339	,886	,388

a. Variable dependiente: Peso unitario húmedo (kN/m³)

Por lo que el modelo corresponde a:

$$\gamma_h = 0,006558 V_p + 0,007947 V_s + 11,276615$$

Ecuación 17. Modelo de regresión lineal múltiple para peso unitario húmedo a partir de velocidades sísmicas.

En donde:

γ_h : Peso unitario húmedo (kN/m³)

Vp: Velocidad de onda primaria (m/s)

Vs: Velocidad de onda secundaria (m/s)

En la Tabla 26 se exhiben los resultados de R, R², R² ajustado del modelo propuesto:

Tabla 26:

Resumen del modelo de regresión lineal múltiple entre Peso unitario húmedo, Vs y Vp.

Resumen del modelo				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	,919 ^a	,844	,826	,90150

a. Predictores: (Constante), Vs (m/s), Vp (m/s)



En donde se puede observar que se tiene un coeficiente de determinación de 0.844. De estos resultados se puede afirmar que el modelo es empleable para el rango de velocidades sísmicas estudiado en el ensayo descrito anteriormente.

Sin embargo, se realiza una correlación simple, es decir entre la variable dependiente o peso unitario húmedo y solo una variable independiente, V_p o V_s para analizar el ajuste de estos modelos. Los resultados de la correlación simple entre peso unitario húmedo y V_p se muestran en la Tabla 27.

Tabla 27:

Resultados de regresión simple entre peso unitario húmedo y V_p .

Resumen de modelo y estimaciones de parámetro

Variable dependiente: Peso unitario húmedo (kN/m³)

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de parámetro			
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1	b2	b3
Lineal	,837	92,500	1	18	,000	11,258	,010		
Logarítmico	,931	243,544	1	18	,000	-4,422	3,384		
Inverso	,924	218,354	1	18	,000	18,181	-814,100		
Cuadrático	,922	100,597	2	17	,000	9,031	,025	-1,954E-5	
Cúbico	,949	98,975	3	16	,000	6,314	,056	,000	7,534E-8
Compuesto	,807	75,325	1	18	,000	11,446	1,001		
Potencia	,922	212,937	1	18	,000	3,789	,238		
S	,935	258,786	1	18	,000	2,923	-57,843		
Crecimiento	,807	75,325	1	18	,000	2,438	,001		
Exponencial	,807	75,325	1	18	,000	11,446	,001		

La variable independiente es V_p (m/s).

Como se puede observar se realizan ajustes con varios modelos con el fin de escoger el que más se ajuste a los datos y menor error presente. En este caso, el modelo apropiado para relacionar el peso unitario húmedo con las velocidades primarias es el modelo cúbico ya que presenta un coeficiente R^2 de 0.949. El modelo es el siguiente:



$$\gamma_h = 0,000000075338 Vp^3 - 0,000109 Vp^2 + 0,055635 Vp + 6,314188$$

Ecuación 18. Modelo de regresión cúbico entre peso unitario húmedo y Vp .

En donde:

γ_h : Peso unitario húmedo (kN/m³)

Vp : Velocidad de onda primaria (m/s)

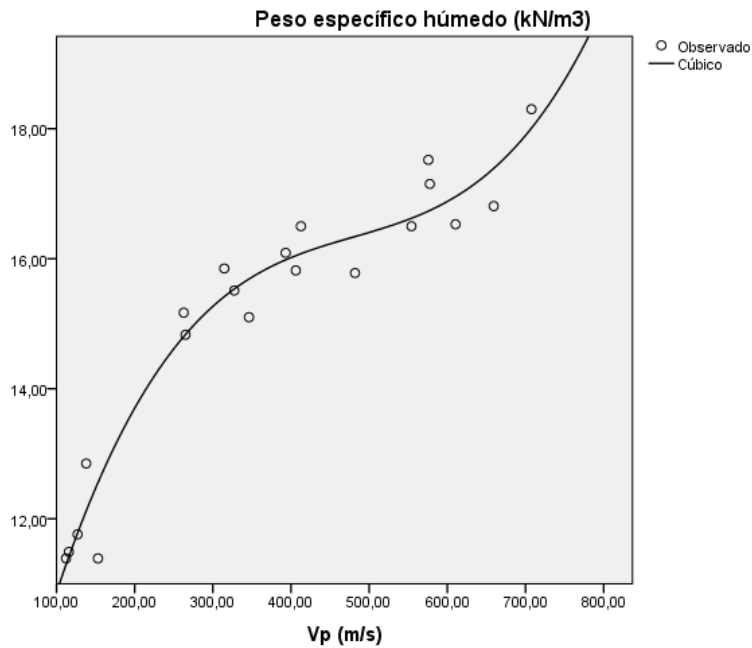


Ilustración 30. Gráfico de modelo de regresión cúbico entre peso unitario húmedo y Vp .

De igual manera se realiza una correlación entre peso unitario húmedo y la velocidad de onda secundaria (Vs). Los resultados de esta correlación se muestran en la Tabla 28.



Tabla 28:

Resultados de correlación entre peso unitario húmedo y Vs.

Resumen de modelo y estimaciones de parámetro

Variable dependiente: Peso unitario húmedo (kN/m3)

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de parámetro			
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1	b2	b3
Lineal	,823	83,607	1	18	,000	11,461	,021		
Logarítmico	,929	237,011	1	18	,000	-1,750	3,382		
Inverso	,920	207,323	1	18	,000	18,259	-381,261		
Cuadrático	,910	85,466	2	17	,000	9,574	,047	-6,708E-5	
Cúbico	,938	81,120	3	16	,000	7,370	,095	,000	4,355E-7
Compuesto	,782	64,467	1	18	,000	11,630	1,001		
Potencia	,912	186,569	1	18	,000	4,596	,237		
S	,925	220,443	1	18	,000	2,928	-26,992		
Crecimiento	,782	64,467	1	18	,000	2,454	,001		
Exponencial	,782	64,467	1	18	,000	11,630	,001		

La variable independiente es Vs (m/s).

Como se puede observar nuevamente el modelo de regresión cubico es el que mejor se ajusta debido a que presenta el coeficiente R² más elevado. El modelo es:

$$\gamma_h = 0,00000043547 Vs^3 - 0,00034 Vs^2 + 0,095292 Vs + 7,369629$$

Ecuación 19. Modelo regresión cúbica entre peso unitario húmedo y Vs.

En dónde:

γ_h : Peso unitario húmedo (kN/m3)

Vs: Velocidad de onda secundaria (m/s)

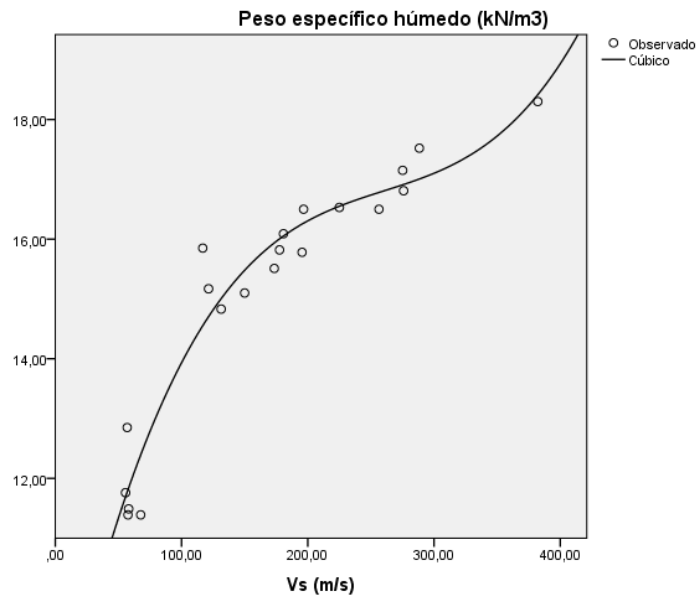


Ilustración 31. Gráfico de modelo de regresión cúbico entre peso unitario húmedo y V_s .

Luego de un análisis de los 3 modelos de regresión obtenidos se puede llegar a la conclusión de que el modelo que más se ajusta a los datos obtenidos en campo es el segundo correspondiente al modelo de regresión cúbico entre peso unitario húmedo y V_p . Sin embargo, el modelo correspondiente a la Ecuación 17 es el más confiable para determinar el peso unitario húmedo de una muestra de suelo arcillo limoso, debido a que refleja de mejor manera el estado del suelo con respecto a su humedad, ya que considera ambas velocidades sísmicas simultáneamente.

De igual manera se realiza una correlación entre el porcentaje de humedad y las velocidades sísmicas. Para obtener una relación confiable entre humedad y velocidades sísmicas del suelo, se procede a clasificar los ensayos por número de golpes para analizar la tendencia de la humedad con respecto a las velocidades sísmicas. Es decir, como existen 5 grupos de ensayos, cada uno con 4 grados de compactación, se procede a agrupar estos ensayos por grado de compactación, pudiendo así, analizar 4 relaciones



entre humedad y velocidades sísmicas, cada una con un rango de peso unitario obtenida mediante compactación por el respectivo número de golpes por capa. Los modelos resultantes son aplicables para el rango de densidades obtenidas y velocidades sísmicas medidas en cada categoría o grado de compactación. Estos rangos de aplicación están detallados en cada categoría.

4.8. Correlación entre Humedad y Velocidades sísmicas usando el software Excel.

Se realizó un análisis de regresión múltiple entre las 3 variables utilizando la función de Excel.

4.8.1. Correlación entre humedad y velocidades sísmicas para muestras con 0 golpes por capa.

Como se indicó los modelos resultantes en este apartado serían aplicables al rango de velocidades sísmicas y peso unitario obtenidos mediante la compactación de 0 golpes / capa, los cuales se indican en la Tabla 29.

Tabla 29:

Humedad, velocidades sísmicas y peso unitario húmedo en muestras con 0 golpes / capa.

Humedad (%)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Peso unitario húmedo (kN/m³)
6,14	137,9	56,91	12,85
11,15	126,99	55,62	11,76
13,78	112,11	57,58	11,39
18,32	115,77	58,09	11,49
18,98	153,07	67,66	11,39



4.8.1.1. Correlación lineal múltiple entre humedad y velocidades sísmicas.

Los valores más importantes de la regresión múltiple entre velocidades primarias, velocidades secundarias y humedad con 0 golpes halladas son las siguientes. Los demás valores encontrados por el programa Excel se adjuntan en Anexos.

De igual manera se va a utilizar el modelo de ecuación siguiente:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2$$

Donde:

y = Humedad del suelo (%)

x₁ = Velocidad primaria, V_p (m/s)

x₂ = Velocidad secundaria, V_s (m/s)

a₀, a₁, a₂ = Coeficientes de regresión

El resumen de los resultados hallados por Excel se presenta en la Tabla 30.

Tabla 30:

Resumen del modelo entre Velocidades y Humedad (0 golpes).

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,9133656
Coefficiente de determinación R ²	0,83423672
R ² ajustado	0,66847345
Error típico	3,05873152

El resultado del coeficiente de relación múltiple según Excel da un valor de 0,83 por lo tanto la humedad agrupada de 0 golpes tiene alto grado de dependencia en la velocidad.

Dado que el coeficiente de correlación es cercano a 1, se considera que el modelo puede ser empleado para realizar pronósticos (valores de humedad) con las variables independientes consideradas (valores de V_p y V_s) siempre y cuando los valores estén dentro del rango de peso unitario y velocidades obtenidas en este ensayo de 0 golpes por



capa. Como el modelo resulta aplicable únicamente para un pequeño rango de densidades y velocidades sísmicas no resulta muy práctico.

La ecuación resultante de esta correlación múltiple es la siguiente:

$$y = -33,34 - 0.29 x_1 + 1,44 x_2$$

Ecuación 20. Correlación entre Velocidad y Humedad (0 golpes).

4.8.1.2. Correlación simple entre humedad y Vp. La línea de tendencia o regresión utilizada fue lineal. Así como se aprecia en la Ilustración 35.

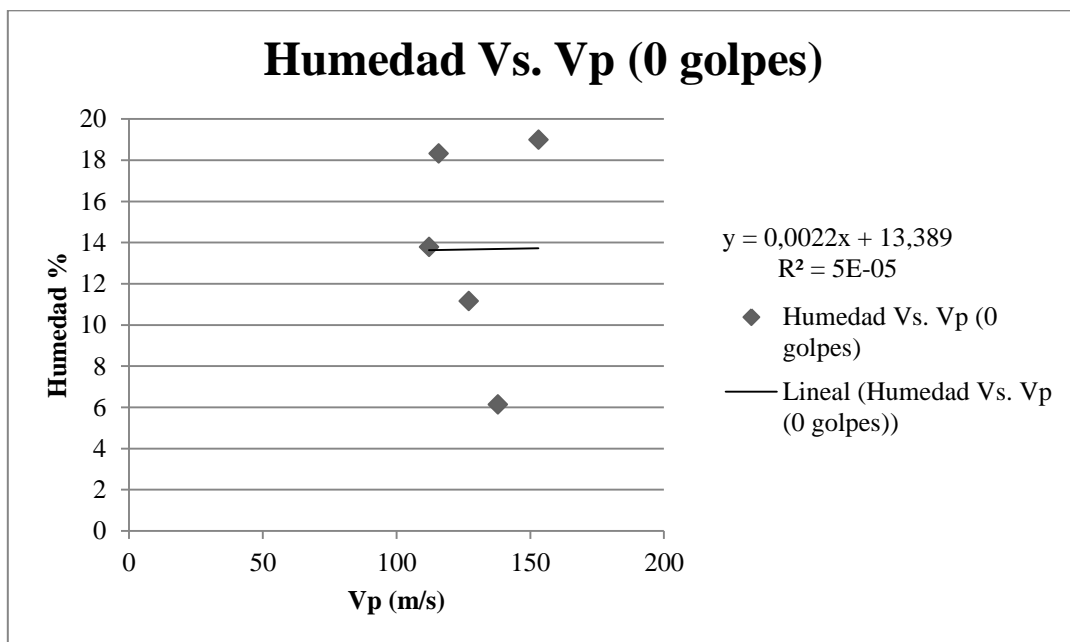


Ilustración 32. Humedad Vs. Vp (0 golpes).

En el análisis gráfico se observa que la línea de tendencia lineal obtiene un R^2 bajo, un valor muy cercano a 0 por lo que se interpreta que no existe un buen ajuste lineal. Por lo tanto, el modelo ajustado para relacionar variables X (Vp) e Y (Humedad) con 0 golpes no es un modelo consistente.



4.8.1.3. Correlación simple entre humedad y Vs.

La línea de tendencia o regresión utilizada fue lineal. Así como se aprecia en la Ilustración 36.

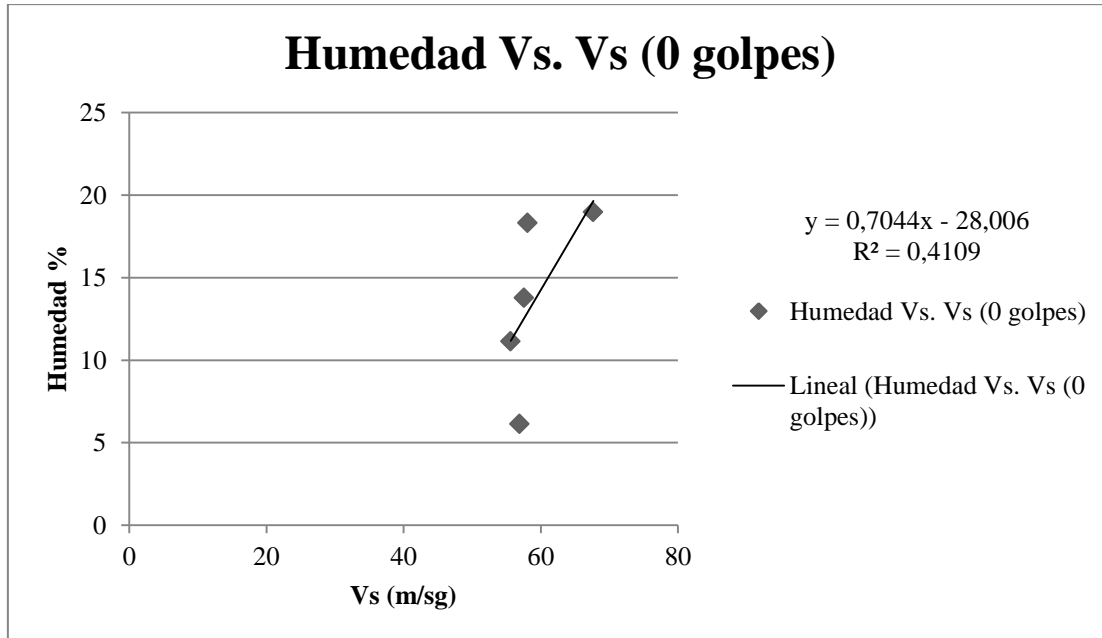


Ilustración 33. Humedad Vs. Vs (0 golpes).

De acuerdo al análisis gráfico se observa que la línea de tendencia lineal obtiene un R^2 de 0,41 que es relativamente bajo, alejado a 1 por lo que se interpreta que no existe un buen ajuste lineal. Finalmente, el modelo ajustado para relacionar variables X (Vs) e Y (Humedad) con 0 golpes no es un modelo consistente.



4.8.2. Correlación entre humedad y velocidades sísmicas para muestras con 9 golpes por capa.

Los modelos resultantes en este apartado serían aplicables al rango de velocidades sísmicas y peso unitario obtenidos mediante la compactación de 9 golpes / capa, los cuales se indican en la Tabla 31.

Tabla 31:

Humedad, velocidades sísmicas y peso unitario húmedo en muestras con 9 golpes / capa.

Humedad (%)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Peso unitario húmedo (kN/m ³)
6,58	262,66	121,4	15,17
10,99	346,23	149,97	15,10
12,56	265,07	131,34	14,83
17,54	327,33	173,48	15,51
18,81	314,56	116,81	15,85

4.8.2.1. Correlación lineal múltiple entre humedad y velocidades sísmicas.

Los valores más importantes de la regresión múltiple entre velocidades primarias, velocidades secundarias y humedad con 9 golpes halladas son los siguientes. Los demás valores encontrados por el programa Excel se adjuntan en Anexos.

El resumen de los resultados hallados por Excel se presenta en la Tabla 32.

Tabla 32:

Resumen del modelo entre Velocidad y Humedad (9 golpes).

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,48900284
Coefficiente de determinación R ²	0,23912377
R ² ajustado	-0,52175245
Error típico	6,14880746



El resultado del coeficiente de relación múltiple da un valor del 0,23 por lo tanto la humedad agrupada de 9 golpes tiene bajo grado de dependencia en la velocidad. Dado que el coeficiente de correlación es cercano a 0, se considera que el modelo no es confiable para realizar pronósticos (valores de humedad) con las variables independientes consideradas (valores de V_p y V_s).

La ecuación resultante de esta correlación múltiple es la siguiente:

$$y = -6,10 + 0.06 x_1 - 0.007 x_2$$

Ecuación 21. Correlación entre Velocidad y Humedad (9 golpes).

Donde:

y = Humedad (%)

x_1 = Velocidad primaria, V_p (m/s)

x_2 = Velocidad secundaria, V_s (m/s)

4.8.2.2. Correlación simple entre humedad y V_p . La línea de tendencia o regresión utilizada fue lineal. Así como se aprecia en la Ilustración 37.

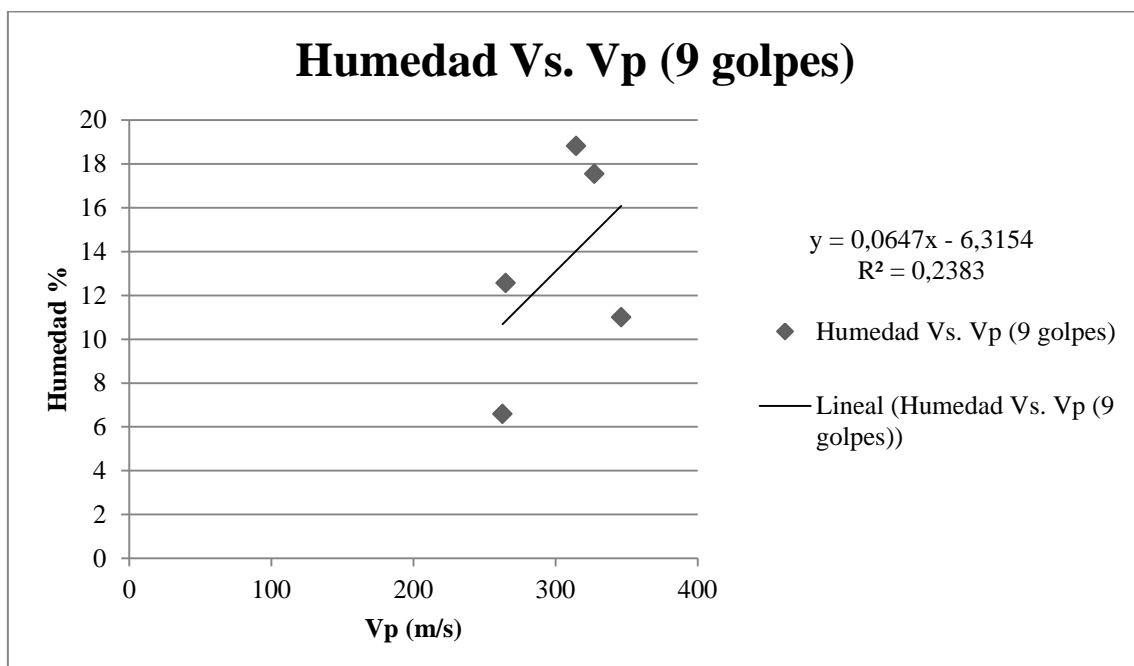


Ilustración 34. Humedad Vs. V_p (9 golpes).



De acuerdo al análisis gráfico se observa que la línea de tendencia lineal obtiene un R^2 de 0,23 que es relativamente bajo, cercano a 0 por lo que se interpreta que no existe un buen ajuste lineal. Finalmente, el modelo ajustado para relacionar variables X (Vp) e Y (Humedad) con 9 golpes no es un modelo consistente.

4.8.2.3. Correlación simple entre humedad y Vs. La línea de tendencia o regresión utilizada fue lineal. Así como se aprecia en la Ilustración 38.

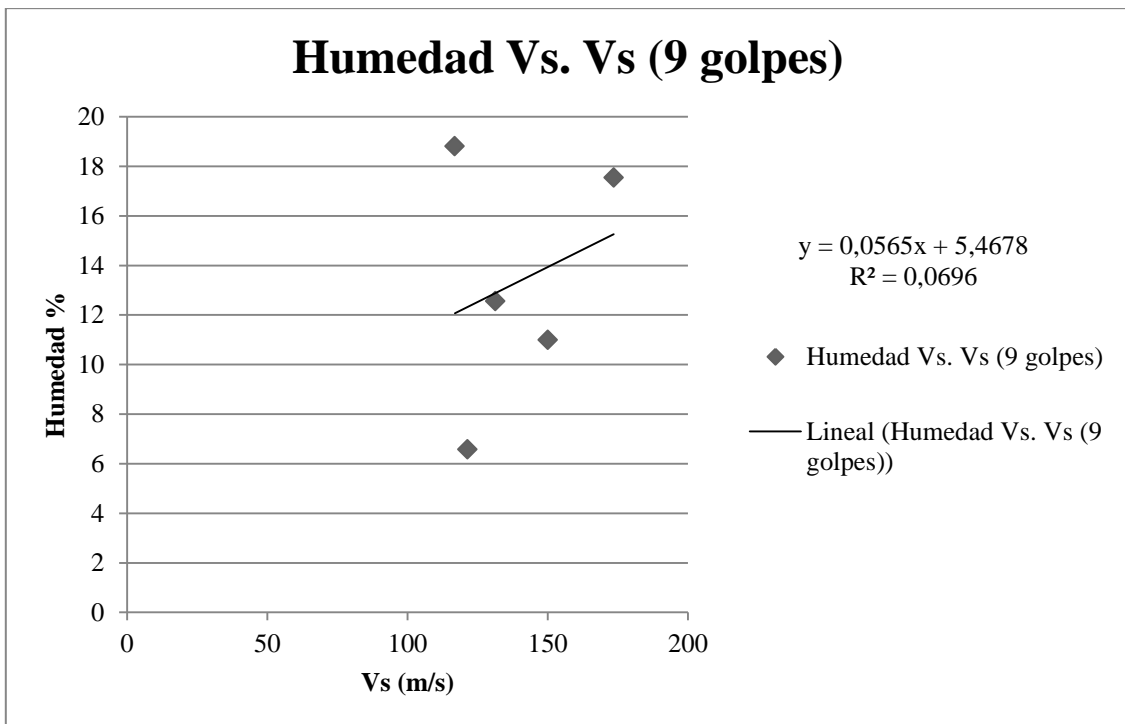


Ilustración 35. Humedad Vs. Vs (9 golpes).

De acuerdo con el análisis gráfico se observa que la línea de tendencia lineal obtiene un R^2 de 0,06 que es bajo, muy cercano a 0 por lo que se interpreta que no existe un buen ajuste lineal. Finalmente, el modelo ajustado para relacionar variables X (Vs) e Y (Humedad) con 9 golpes no es un modelo consistente.



4.8.3. Correlación entre humedad y velocidades sísmicas para muestras con 18 golpes por capa.

Los modelos resultantes en este apartado serían aplicables al rango de velocidades sísmicas y peso unitario obtenidos mediante la compactación de 18 golpes / capa, los cuales se indican en la Tabla 33.

Tabla 33:

Humedad, velocidades sísmicas y peso unitario húmedo en muestras con 18 golpes / capa.

Humedad (%)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Peso unitario húmedo (kN/m³)
6,70%	393,10	180,73	16,09
10,71%	406,08	177,61	15,82
12,30%	481,90	195,49	15,78
17,54%	554,05	256,38	16,50
19,15%	577,58	275,15	17,15

4.8.3.1. *Correlación lineal múltiple entre humedad y velocidades sísmicas.*

Los valores más importantes de la regresión múltiple entre velocidades primarias, velocidades secundarias y humedad con 18 golpes halladas son las siguientes. Los demás valores encontrados por el programa Excel se adjuntan en Anexos.

El resumen de los resultados hallados por Excel se presenta en la Tabla 34.



Tabla 34:

Resumen del modelo entre Velocidades y Humedad (18 golpes).

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,96920131
Coefficiente de determinación R ²	0,93935117
R ² ajustado	0,87870234
Error típico	1,7713136

El resultado del coeficiente de relación múltiple según Excel da un valor de 0,93 por lo tanto la humedad tiene un alto grado de dependencia con las velocidades sísmicas medidas con una densidad semejante a la obtenida con la compactación de 18 golpes por capa. Dado que el coeficiente de correlación es cercano a 1, se considera que el modelo se puede emplear para realizar pronósticos (valores de humedad) con las variables independientes consideradas (valores de Vp y Vs), siempre y cuando los valores estén dentro del rango de peso unitario y velocidades obtenidas en este ensayo de 18 golpes por capa. Como el modelo resulta aplicable únicamente para un pequeño rango de densidades y velocidades sísmicas no resulta muy práctico.

Sin embargo, la ecuación resultante de esta correlación múltiple es la siguiente:

$$y = -14.59 + 0.05 x_1 + 0.015 x_2$$

Ecuación 22. Correlación entre Velocidad y Humedad (18 golpes).

Donde:

y = Humedad (%)

x₁ = Velocidad primaria, Vp (m/s)

x₂ = Velocidad secundaria, Vs (m/s)



4.8.3.2. Correlación simple entre humedad y Vp. La línea de tendencia o regresión utilizada fue lineal. Así como se aprecia en la Ilustración 39.

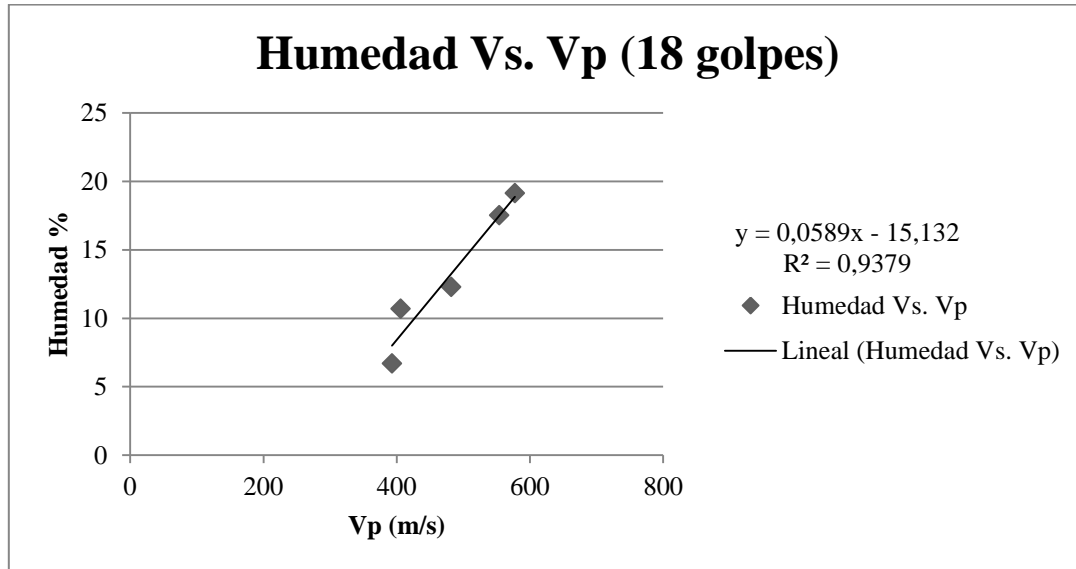


Ilustración 36. Humedad Vs. Vp (18 golpes).

De acuerdo al análisis gráfico se observa que la línea de tendencia lineal obtiene un R^2 de 0,93 que muy cercano a 1 por lo que se interpreta que si existe un buen ajuste lineal. Finalmente, el modelo ajustado para relacionar variables X (Vp) e Y (Humedad) con 18 golpes es el modelo más consistente, siempre y cuando los valores estén dentro del rango de peso unitario y velocidades obtenidas en este ensayo de 18 golpes por capa. Como el modelo resulta aplicable únicamente para un pequeño rango de densidades y velocidades sísmicas no resulta muy práctico.

4.8.3.3. Análisis de relación entre humedad y Vs. La línea de tendencia o regresión utilizada fue lineal. Así como se aprecia en la Ilustración 40.

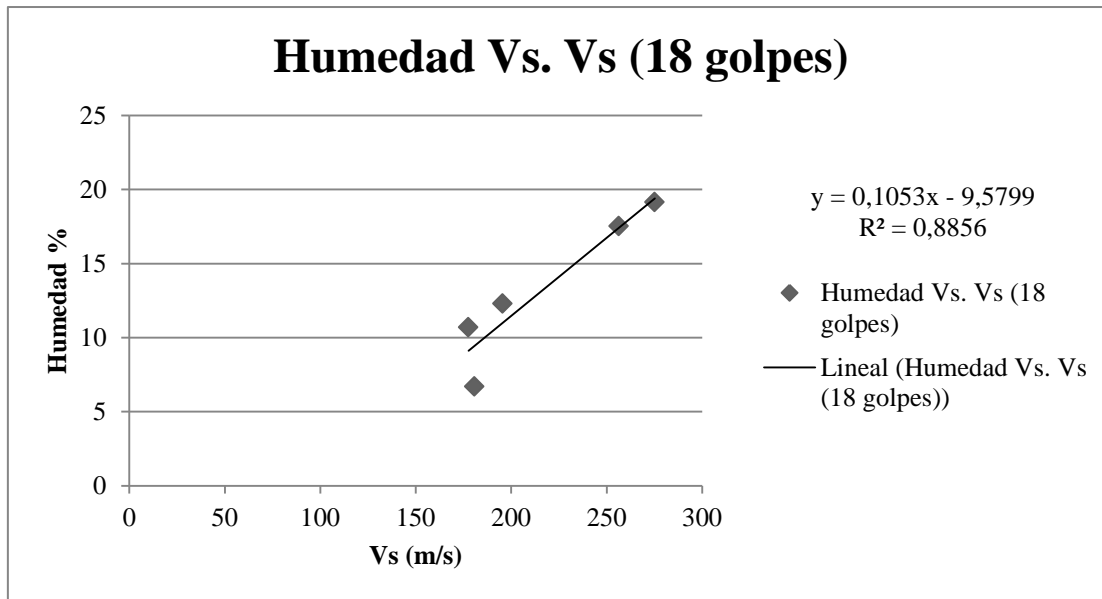


Ilustración 37. Humedad Vs. Vs (18 golpes).

De acuerdo con el análisis gráfico se observa que la línea de tendencia lineal obtiene un R^2 de 0,88 que es cercano a 1 por lo que se interpreta que existe un buen ajuste lineal. Finalmente, el modelo ajustado para relacionar variables X (Vs) e Y (Humedad) con 18 golpes es un modelo consistente. siempre y cuando los valores estén dentro del rango de peso unitario y velocidades obtenidas en este ensayo de 18 golpes por capa. Como el modelo resulta aplicable únicamente para un pequeño rango de densidades y velocidades sísmicas no resulta muy práctico

4.8.4. Correlación entre humedad y velocidades sísmicas para muestras con 36 golpes por capa.

Los modelos resultantes en este apartado serían aplicables al rango de velocidades sísmicas y peso unitario obtenidos mediante la compactación de 36 golpes / capa, los cuales se indican en la Tabla 35.



Tabla 35:

Humedad, velocidades sísmicas y peso unitario húmedo en muestras con 36 golpes / capa.

Humedad (%)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Peso unitario húmedo (kN/m ³)
6,62%	412,66	196,64	16,50
11,07%	610,39	225,01	16,53
12,05%	659,29	275,88	16,81
17,42%	575,72	288,41	17,52
18,19%	707,58	382,21	18,30

4.8.4.1. Correlación lineal múltiple entre humedad y velocidades sísmicas.

Los valores más importantes de la regresión múltiple entre velocidades primarias, velocidades secundarias y humedad con 36 golpes halladas son los siguientes. Los demás valores encontrados por el programa Excel se adjuntan en Anexos.

El resumen de los resultados hallados por Excel se presenta en la Tabla 36.

Tabla 36: **Resumen del modelo entre Velocidades y Humedad (36 golpes).**

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,88874513
Coefficiente de determinación R ²	0,7898679
R ² ajustado	0,5797358
Error típico	3,10530852

El resultado del coeficiente de relación múltiple según Excel da un valor de 0,78 por lo tanto la humedad agrupada de 36 golpes tiene alto grado de dependencia en la velocidad. Dado que el coeficiente de correlación es cercano a 1, se considera que el modelo es empleable para realizar pronósticos (valores de humedad) con las variables independientes consideradas (valores de Vp y Vs), siempre y cuando los valores estén



dentro del rango de peso unitario y velocidades obtenidas en este ensayo de 36 golpes por capa. Como el modelo resulta aplicable únicamente para un pequeño rango de densidades y velocidades sísmicas no resulta muy práctico

Sin embargo, la ecuación resultante de esta correlación múltiple es la siguiente:

$$y = -4,02 - 0,003 x_1 + 0,05 x_2$$

Ecuación 23. Correlación entre Velocidad y Humedad (36 golpes).

Donde:

y = Humedad (%)

x₁ = Velocidad primaria, Vp (m/s)

x₂ = Velocidad secundaria, Vs (m/s)

4.8.4.2. Correlación simple entre humedad y Vp. La línea de tendencia o regresión utilizada fue lineal. Así como se aprecia en la Ilustración 41.

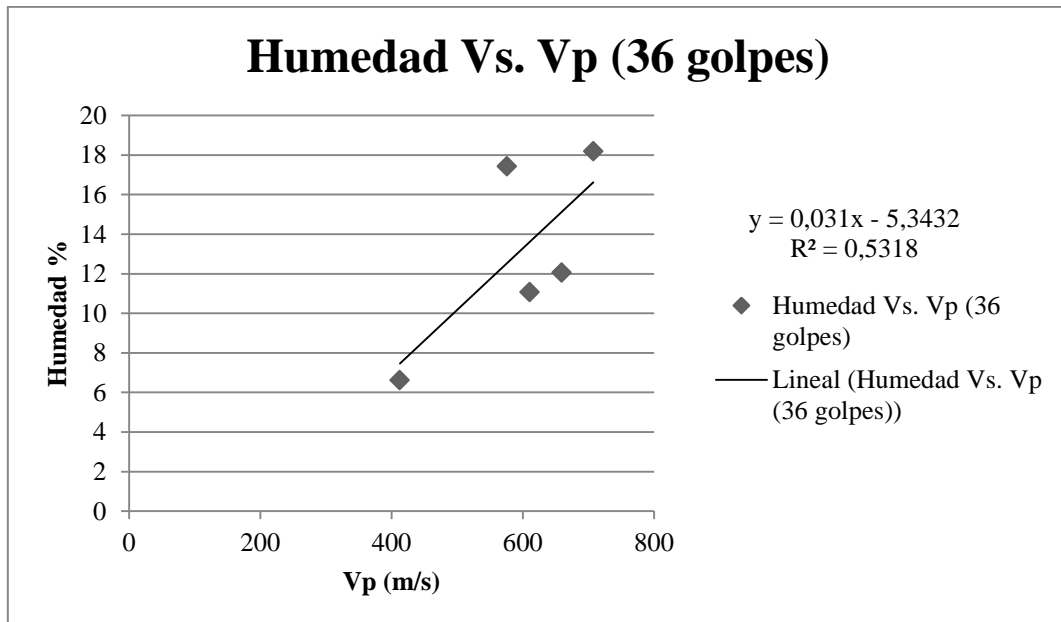


Ilustración 38. Humedad Vs. Vp (36 golpes).



De acuerdo al análisis gráfico se observa que la línea de tendencia lineal obtiene un R^2 de 0,53 que no es cercano a 1 por lo que se interpreta que no existe un buen ajuste lineal. Finalmente, el modelo ajustado para relacionar variables X (Vp) e Y (Humedad) con 36 golpes no es un modelo consistente.

4.8.4.3. Correlación simple entre humedad y Vs. La línea de tendencia o regresión utilizada fue lineal. Así como se aprecia en la Ilustración 42.

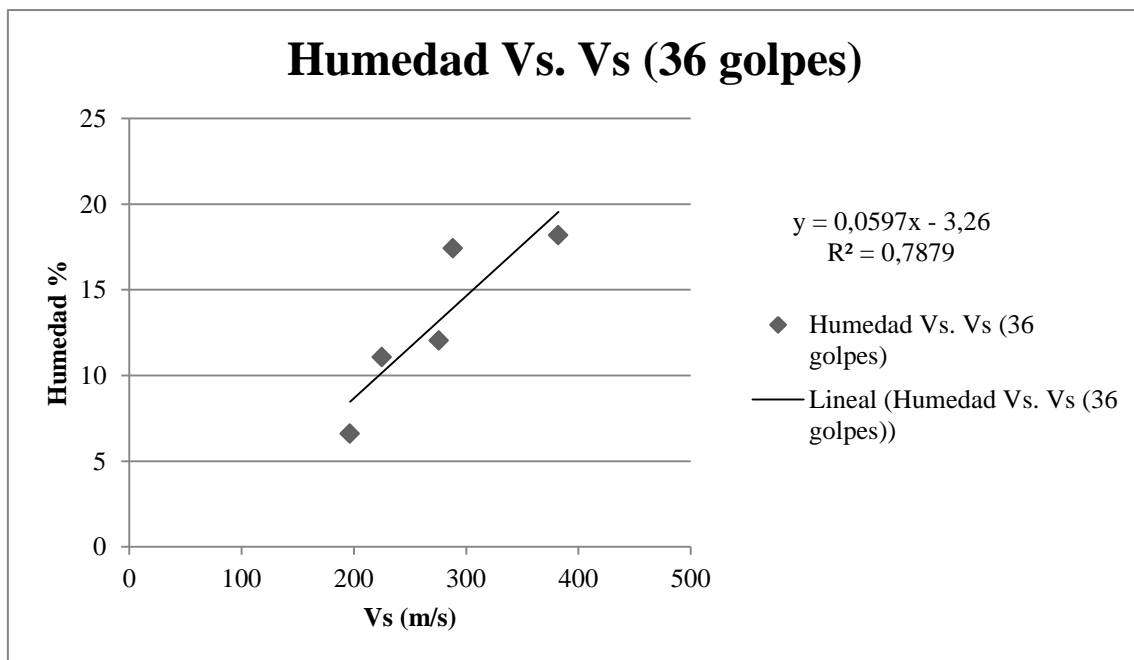


Ilustración 39. Humedad Vs. Vs (36 golpes).

De acuerdo con el análisis gráfico se observa que la línea de tendencia lineal obtiene un R^2 de 0,78 que es cercano a 1 por lo que se interpreta que existe un ajuste lineal aceptable. Finalmente, el modelo ajustado para relacionar variables X (Vs) e Y (Humedad) con 36 golpes es un modelo consistente, siempre y cuando los valores estén dentro del rango de peso unitario y velocidades obtenidas en este ensayo de 36 golpes por capa. Como el modelo resulta aplicable únicamente para un pequeño rango de densidades y velocidades sísmicas no resulta muy práctico



4.9. Correlación entre humedad y velocidades sísmicas usando el software IBM SPSS Statistics.

4.9.1. Análisis de correlación de Spearman. Siguiendo el mismo procedimiento utilizado para analizar la relación entre peso unitario húmedo y velocidades sísmicas, se realiza un análisis de correlación de Spearman entre las variables: humedad, velocidad de propagación de onda primaria (Vp) y velocidad de propagación de onda secundaria (Vs) para cada categoría (# de golpes), obteniendo los siguientes resultados.

4.9.1.1. 0 golpes / capa.

Tabla 37:

Resultados del análisis de correlación de Spearman entre las variables humedad, Vp y Vs, para los ensayos de 0 golpes / capa.

			Correlaciones		
			Vp (m/s)	Vs (m/s)	Humedad (%)
Rho de Spearman	Vp (m/s)	Coeficiente de correlación	1,000	,200	,100
		Sig. (bilateral)	.	,747	,873
		N	5	5	5
	Vs (m/s)	Coeficiente de correlación	,200	1,000	,900*
		Sig. (bilateral)	,747	.	,037
		N	5	5	5
	Humedad (%)	Coeficiente de correlación	,100	,900*	1,000
		Sig. (bilateral)	,873	,037	.
		N	5	5	5

*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).



4.9.1.2. 9 golpes / capa.

Tabla 38:

Resultados del análisis de correlación de Spearman entre las variables humedad, Vp y Vs, para los ensayos de 9 golpes / capa.

			Correlaciones		
			Vp (m/s)	Vs (m/s)	Humedad (%)
Rho de Spearman	Vp (m/s)	Coeficiente de correlación	1,000	,600	,300
		Sig. (bilateral)	.	,285	,624
		N	5	5	5
	Vs (m/s)	Coeficiente de correlación	,600	1,000	-,100
		Sig. (bilateral)	,285	.	,873
		N	5	5	5
	Humedad (%)	Coeficiente de correlación	,300	-,100	1,000
		Sig. (bilateral)	,624	,873	.
		N	5	5	5

4.9.1.3. 18 golpes / capa.

Tabla 39:

Resultados del análisis de correlación de Spearman entre las variables humedad, Vp y Vs, para los ensayos de 18 golpes / capa.

			Correlaciones		
			Vp (m/s)	Vs (m/s)	Humedad (%)
Rho de Spearman	Vp (m/s)	Coeficiente de correlación	1,000	,900*	1,000**
		Sig. (bilateral)	.	,037	.
		N	5	5	5
	Vs (m/s)	Coeficiente de correlación	,900*	1,000	,900*
		Sig. (bilateral)	,037	.	,037
		N	5	5	5
	Humedad (%)	Coeficiente de correlación	1,000**	,900*	1,000
		Sig. (bilateral)	.	,037	.
		N	5	5	5

*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral)



4.9.1.4. 36 golpes / capa.

Tabla 40:

Resultados del análisis de correlación de Spearman entre las variables humedad, Vp y Vs, para los ensayos de 36 golpes / capa.

Correlaciones					
			Vp (m/s)	Vs (m/s)	Humedad (%)
Rho de Spearman	Vp (m/s)	Coeficiente de correlación	1,000	,700	,700
		Sig. (bilateral)	.	,188	,188
		N	5	5	5
	Vs (m/s)	Coeficiente de correlación	,700	1,000	1,000**
		Sig. (bilateral)	,188	.	.
		N	5	5	5
	Humedad (%)	Coeficiente de correlación	,700	1,000**	1,000
		Sig. (bilateral)	,188	.	.
		N	5	5	5

Como se observa en las Tablas 37 a la 40, las variables humedad y velocidades sísmicas (Vp y Vs) presentan una relación considerable para obtener un modelo de ajuste confiable, a excepción de la categoría 9 golpes por capa que presenta muy baja relación obteniendo un coeficiente de Spearman negativo entre humedad y Vs, por lo que la correlación entre estas dos variables no es significativa. En total se obtienen 4 modelos de ajuste para cada rango de peso unitario (clasificación por número de golpes).

4.9.2. Análisis de regresión lineal múltiple entre humedad y velocidades sísmicas (Vp y Vs). Primeramente, se realiza una regresión lineal múltiple entre humedad (variable dependiente) y las velocidades sísmicas (Vp y Vs) para cada rango de densidad (cada categoría de número de golpes / capa), donde se obtienen los siguientes resultados.



4.9.2.1. 0 golpes / capa.

El modelo resultante sería aplicable al rango de velocidades sísmicas y peso unitario indicados en la Tabla 29.

Tabla 41:

Coefficientes del modelo de regresión lineal múltiple entre humedad, Vp y Vs para 0 golpes / capa.

Modelo		Coeficientes ^a				
		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Error estándar	Beta		
1	(Constante)	-,333	,189		-1,762	,220
	Vp (m/s)	-,003	,001	-,935	-2,260	,152
	Vs (m/s)	,014	,005	1,312	3,172	,087

a. Variable dependiente: Humedad (%)

El modelo corresponde a:

$$\omega = -0.003Vp + 0.014Vs - 0.333$$

Ecuación 24. Modelo de regresión lineal múltiple entre humedad, Vp y Vs para 0 golpes / capa.

En donde

ω : humedad (%)

Vp: velocidad de propagación de onda primaria (m/s)

Vs: velocidad de propagación de onda secundaria (m/s)

En la Tabla 42 se muestran los resultados de R, R², R² ajustado y error estándar del modelo propuesto.



Tabla 42:

Resultados del modelo de regresión lineal múltiple entre humedad, Vp y Vs para 0 golpes / capa.

Resumen del modelo				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	,913 ^a	,834	,668	,03058642282

a. Predictores: (Constante), Vs (m/s), Vp (m/s)

Con un coeficiente de determinación de 0.834 el modelo resulta empleable para el rango de peso unitario analizado, es decir, los pesos unitarios obtenidos mediante 0 golpes / capa en cada ensayo. Como el modelo es aplicable únicamente para un pequeño rango de densidades y velocidades sísmicas no resulta muy práctico.

Se realiza un análisis exactamente igual para los 3 grupos restantes (9, 18 y 36 golpes / capa) obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 43:

Modelos de regresión lineal múltiple para cada grupo de golpes / capa.

Golpes / capa	Coeficientes			Modelo
	Vp	Vs	Constante	
0	-0,002963	0,014410	-0,333252	$\omega = -0.002963 Vp + 0.014410 Vs - 0.333252$
9	0,000674	-0,000073	-0,061238	$\omega = 0,000674 Vp - 0,000073 Vs - 0.061238$
18	0,000527	0,000083	-0,140781	$\omega = 0.000527 Vp + 0.000083 Vs - 0.140781$
36	0.000030	0,000559	-0,040217	$\omega = 0.000030 Vp + 0.000559 Vs - 0.040217$

En donde:

ω : humedad (%)

Vp: velocidad de propagación de onda primaria (m/s)

Vs: velocidad de propagación de onda secundaria (m/s)

A continuación, se muestran los resultados de R, R², R² ajustado y error estándar para cada modelo:



Tabla 44:

Resultados del modelo de regresión lineal múltiple entre humedad, V_p y V_s para cada grupo de golpes / capa.

Golpes / capa	R	R²	R² ajustado	Error estándar
0	0,913	0,834	0,668	0,030586596
9	0,489	0,239	-0,521	0,061504034
18	0,968	0,936	0,873	0,017624839
36	0,889	0,790	0,580	0,031045788

Como se puede observar, existe un ajuste muy confiable para los modelos de 0, 18 y 36 golpes / capa por lo que la estimación de la humedad en función de las velocidades sísmicas del suelo es muy confiable para estos casos, es decir, para un suelo que mantenga un peso unitario similar al obtenido en los ensayos de 0, 18 y 36 golpes los mismos que se detallan en las Tablas 29, 33 y 35 respectivamente.

En cambio, el modelo obtenido para 9 golpes por capa presenta un coeficiente de determinación bajo por lo que no resulta muy confiable para determinar la humedad en función de las velocidades sísmicas.

Sin embargo, los modelos obtenidos no son aplicables para un rango grande de datos de velocidades sísmicas, debido a que se obtuvieron dichos modelos para un rango establecido de las mismas, así como también para un rango establecido de peso unitario húmedo. Por estas razones, los modelos obtenidos no son prácticos para poder estimar la humedad de un suelo arcillo limoso a partir de sus velocidades sísmicas, ya que representan rangos muy pequeños tanto de peso unitario húmedo como de velocidades sísmicas.



4.9.3. Análisis de regresión simple entre humedad y Vp.

Como alternativa a los modelos de regresión lineal múltiple, se plantean modelos de regresión lineal simple entre humedad y Vp con el fin de analizar la relación entre las variables mencionadas y realizar una comparación entre estos modelos.

En la Tabla 45 se muestran los resultados de una regresión simple para cada grupo de número de golpes por capa. Se realizaron ajustes a un modelo lineal o exponencial, dependiendo de la calidad del ajuste, con el fin de mantener la tendencia de que a mayor humedad crece la velocidad de onda primaria:

Tabla 45:

Resultados del modelo de regresión simple entre humedad y Vp para cada grupo de golpes / capa.

Golpes / capa	Coeficientes		Modelo	Coeficiente R ²
	Vp	Constante		
0	0,000021	0,133956	$\omega = 0.000021 Vp + 0,133956$	0,000046
9	0,005854	0,021108	$\omega = 0,021108 e^{0.005854 Vp}$	0,272905
18	0,000571	-0,143686	$\omega = 0.000571 Vp - 0,143686$	0,935817
36	0,002908	0,021902	$\omega = 0,021902 e^{0.002908 Vp}$	0,639945

Estos modelos de igual manera serían aplicables dentro del rango de velocidades sísmicas y peso unitario estudiado en cada grado de compactación (# de golpes / capa), los mismo que se detallan en la Tablas 29, 31, 33 y 35 respectivamente, por lo que no resultan generales para estimar la humedad del suelo arcillo limoso a partir de las velocidades sísmicas ya que se deben tener pesos unitarios y velocidades dentro de rangos muy pequeños.

También se presentan los gráficos de los modelos con respecto a los datos obtenidos o medidos para visualizar de mejor manera el ajuste del modelo resultante.

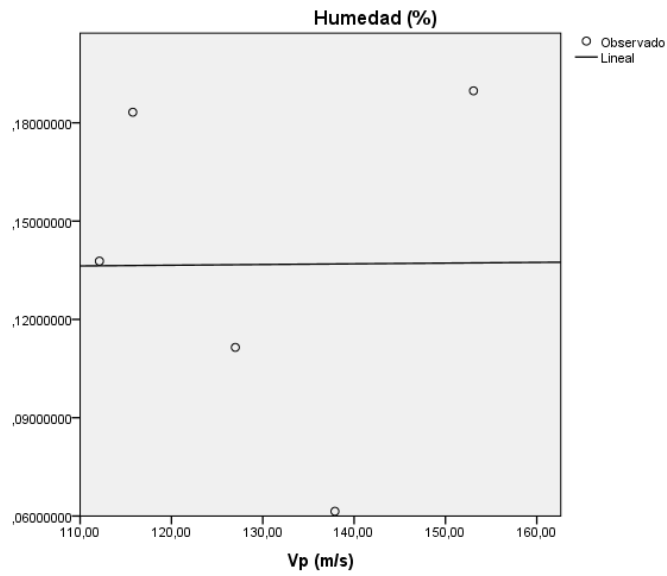


Ilustración 40. Gráfico de modelo de regresión lineal simple entre humedad y Vp para 0 golpes por capa.

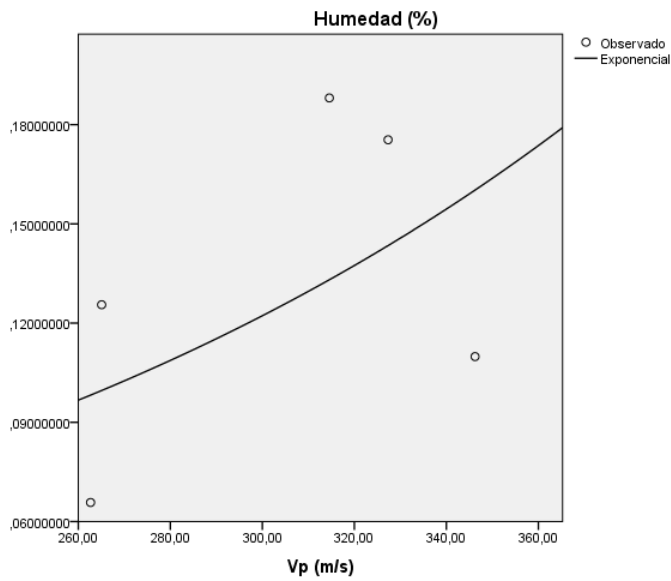


Ilustración 41. Gráfico de modelo exponencial entre humedad y Vp para 9 golpes por capa.

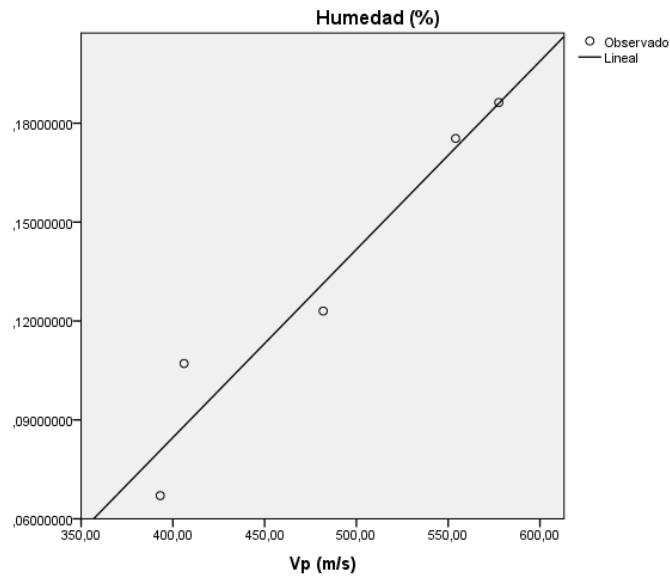


Ilustración 42. Gráfico de modelo de regresión lineal simple entre humedad y Vp para 18 golpes por capa.

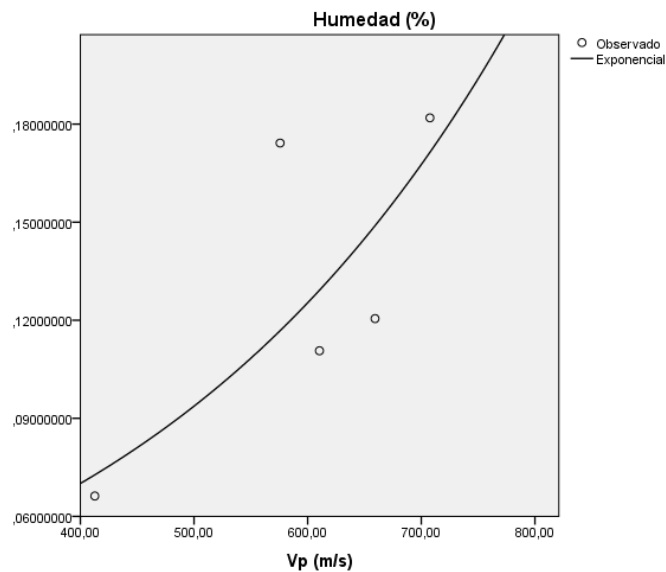


Ilustración 43. Gráfico de modelo exponencial entre humedad y Vp para 36 golpes por capa.

4.9.4. Análisis de regresión simple entre humedad y Vs.

De igual manera se realizan ajustes a modelos lineales y exponenciales entre las variables humedad y Vs. A continuación, en la Tabla 46, se muestran los modelos que se ajustan a los datos reales para cada grupo de # de golpes por capa.



Tabla 46:

Resultados del modelo de regresión simple entre humedad y Vs para cada grupo de golpes / capa.

Golpes / capa	Coeficientes		Modelo	Coeficiente R ²
	Vs	Constante		
0	0,007041	-0,279905	$\omega = 0,007041 V_s - 0,279905$	0,412062
9	0,005748	0,056134	$\omega = 0,056134 e^{0,005748 V_s}$	0,100839
18	0,001016	-0,088778	$\omega = 0,001016 V_s - 0,088778$	0,874970
36	1,446567	0,000038	$\omega = 0,000038 V_s^{1,446567}$	0,808592

Estos modelos de igual manera serían aplicables dentro del rango de velocidades sísmicas y peso unitario estudiado en cada grado de compactación (# de golpes / capa), los mismo que se detallan en la Tablas 29, 31, 33 y 35 respectivamente, por lo que no resultan generales para estimar la humedad del suelo arcillo limoso a partir de las velocidades sísmicas ya que se deben tener pesos unitarios y velocidades dentro de rangos muy pequeños.

Asimismo, a continuación se muestran los gráficos de los modelos obtenidos vs los datos medidos en campo para visualizar de mejor manera la exactitud de dichos modelos.

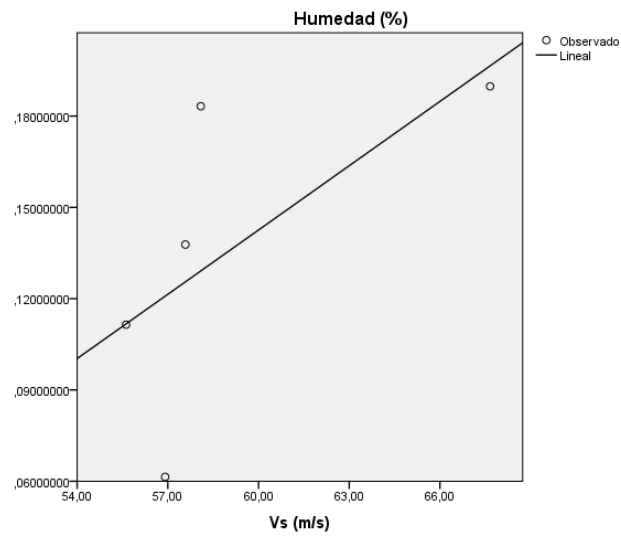


Ilustración 44. Gráfico de modelo de regresión lineal simple entre humedad y Vs para 0 golpes por capa.

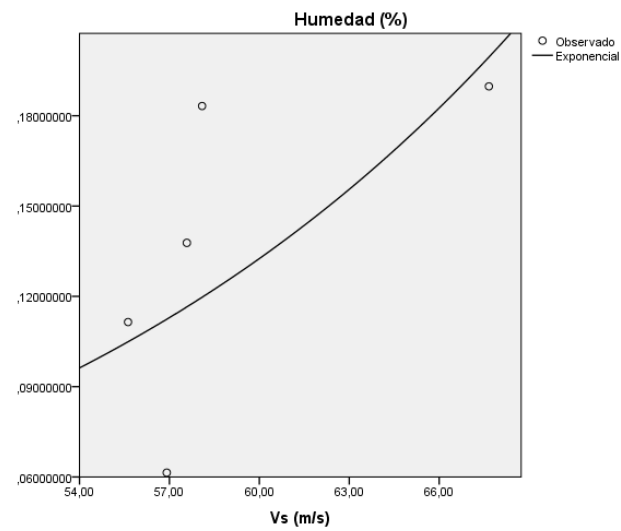


Ilustración 45. Gráfico de modelo exponencial entre humedad y Vs para 9 golpes por capa.

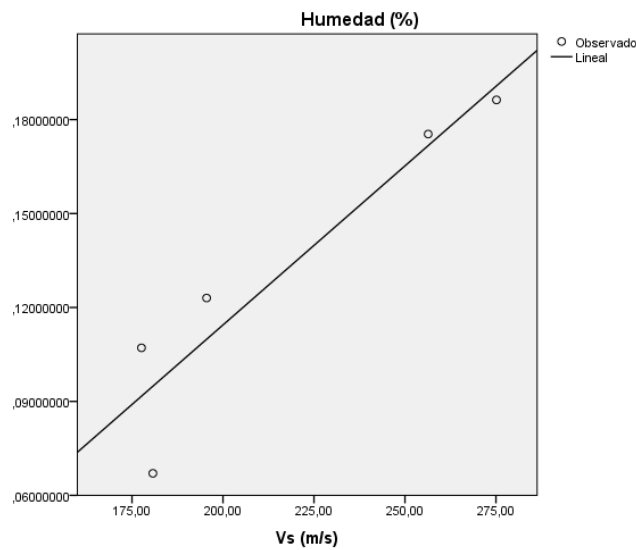


Ilustración 46. Gráfico de modelo de regresión lineal simple entre humedad y Vs para 18 golpes por capa.

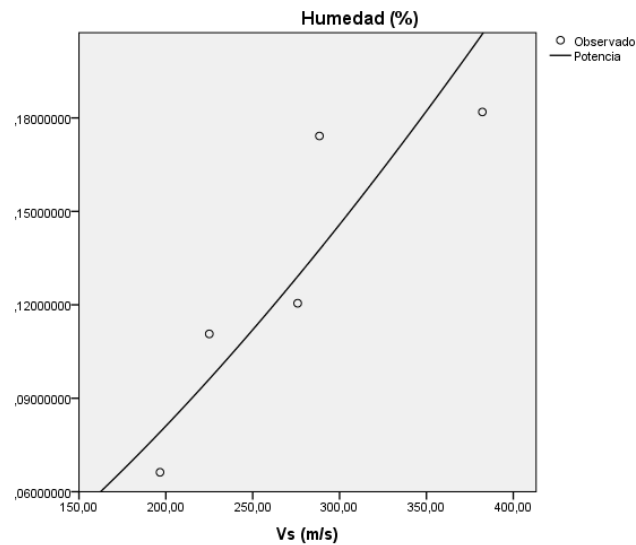


Ilustración 47. Gráfico de modelo potencial entre humedad y Vs para 36 golpes por capa.

Como se puede observar los modelos de regresión simple para el grupo de 0 y 9 golpes no se ajustan satisfactoriamente a los datos reales, presentando coeficientes de determinación bajos, a diferencia de los grupos de 18 y 36 golpes que presentan mayor ajuste. Una alternativa a estos modelos sería la regresión lineal múltiple, la misma que presenta un coeficiente de determinación relativamente alto para el grupo de 0 golpes.



Los modelos que se podrían utilizar para estimar la humedad de un suelo arcillo limoso dentro del rango de pesos unitarios y velocidades sísmicas estudiadas pueden ser:

Tabla 47:

Resultados definitivos de modelo de regresión entre humedad y velocidades sísmicas para cada grupo de golpes / capa.

Golpes / capa	Modelo	Coefficiente R ²
0	$\omega = -0.002963 Vp + 0.014410 Vs - 0.333252$	0,834196
9	$\omega = 0,021108 e^{0.005854 Vp}$	0,272905
18	$\omega = 0.000571 Vp - 0.144$	0,935817
36	$\omega = 0,000038 Vs^{1,446567}$	0,808592

Como ya se mencionó estos modelos son aplicables a rangos muy pequeños de velocidades sísmicas y peso unitario húmedo por lo que no son recomendables para estimar la humedad de un suelo arcillo limoso con datos de velocidades sísmicas dentro de rangos más generales, es decir los modelos propuestos no resultan muy prácticos .

4.9.5. Análisis de regresión lineal múltiple entre humedad con velocidades sísmicas y peso unitario húmedo.

Como alternativa a los modelos anteriores se plantea un modelo de regresión lineal múltiple teniendo como variable dependiente a la humedad y variables independientes a las velocidades sísmicas y el peso unitario húmedo. Se realiza la estimación mediante el software IBM SPSS Statistics obteniendo el siguiente modelo.



Tabla 48:

Coefficientes del modelo de regresión lineal múltiple entre humedad con velocidades sísmicas y peso unitario húmedo.

Coefficientes^a

Modelo	Coefficients no estandarizados		Coefficients estandarizados	t	Sig.
	B	Error estándar	Beta		
1 (Constante)	,336	,135		2,487	,024
Vp (m/s)	,000	,000	-,475	-,512	,616
Vs (m/s)	,001	,000	1,510	1,697	,109
Peso unitario húmedo (kN/m3)	-,019	,012	-,895	-1,625	,124

a. Variable dependiente: Humedad (%)

Y el modelo corresponde a.

$$\omega = -0,000114 V_p + 0,000759 V_s - 0,019202 \gamma_h + 0,335996$$

Ecuación 25. Modelo de regresión lineal múltiple entre humedad con velocidades sísmicas y peso unitario húmedo.

En donde:

ω : humedad (%)

V_p : velocidad de propagación de onda primaria (m/s)

V_s : velocidad de propagación de onda secundaria (m/s)

γ_h : peso unitario húmedo (kN/m³)

Este modelo no presenta resultados consistentes por lo que no se recomienda aplicarlo para realizar estimaciones del porcentaje de humedad de un suelo arcillo limoso a partir de sus velocidades sísmicas y peso unitario húmedo, ya que presenta un coeficiente de determinación R² de 0.244.



Una explicación a que los datos de porcentaje de humedad difieran mucho en el caso de 0 y 9 golpes por capa, reside en que el material es arcilloso. Un aumento continuo del contenido de humedad expandirá más las capas dobles y esto se traducirá en un incremento continuo de la repulsión entre las partículas. Esto le dará un grado aún mayor a la orientación de las partículas y una estructura más o menos dispersa. Sin embargo, el peso unitario seco disminuirá debido a que el agua añadida va a disminuir la concentración de sólidos del suelo por unidad de volumen. También es importante señalar que en un contenido de humedad dado, un mayor esfuerzo de compactación tiende a dar una orientación más paralela a las partículas de arcilla, resultando así una estructura más dispersa (Das, 2013). Por esta razón, sin ningún o bajo porcentaje de compactación, este material sufre una expansión lo que provoca menor densidad.

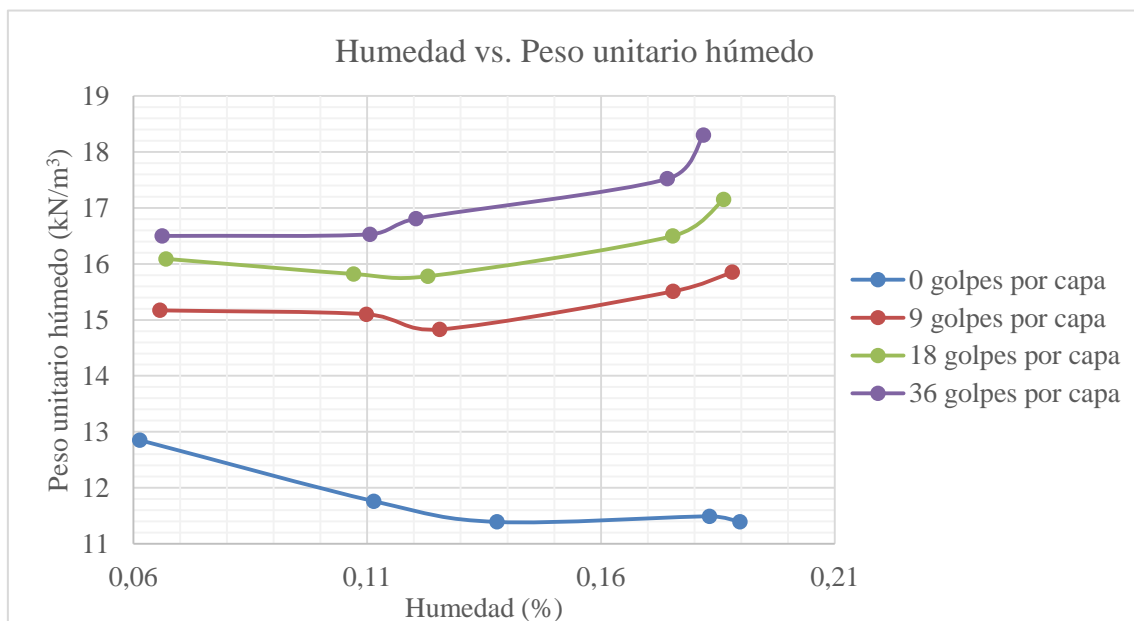


Ilustración 48. Gráfico de humedad contra peso unitario húmedo para cada grupo de compactación.

Como se puede observar en la Ilustración 51 efectivamente en el gráfico de humedad contra peso unitario de 0 golpes por capa se puede observar que conforme aumenta la humedad disminuye el peso unitario húmedo debido al abudamiento del material; en



relación a los grupos de 9, 18 y 36 golpes por capa, se observa que hay una incidencia importante del abundamiento para las humedades bajo el 12% en todos los casos, presentándose con una ligera disminución o igual valor de peso unitario.



Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

El presente trabajo analizó tres muestras de suelos de la ciudad de Cuenca y sus alrededores, los mismos que pertenecen a la Formación Biblián. De los 3 analizados se eligió el suelo arcillo limoso extraído de la locación Santa Ana, luego de realizar los ensayos pertinentes en laboratorio. De esta manera se constató que la litología típica de la formación Biblián contiene suelos finos tipo arcillas limosas.

Con el suelo obtenido se determinó la humedad óptima y el peso unitario seco máximo. Sin embargo, no fue posible alcanzar este peso en la caja donde se realizaron las mediciones de velocidades sísmicas debido a que, por aspectos de espacio para la colocación de los geófonos, la caja presenta un volumen considerablemente mayor respecto al del ensayo Proctor Modificado, por lo que procedimos a realizar hasta un número máximo de 36 golpes por capa utilizando 5 capas con el martillo Proctor modificado.

De acuerdo a los dos métodos utilizados para la correlación de los parámetros geofísicos estudiados se logró verificar que el programa estadístico IBM SPSS es el más exacto y confiable. Luego de realizar 3 tipos de correlación entre peso unitario húmedo y las velocidades de onda sísmica del suelo en estudio mediante el software mencionado, las que corresponden a una regresión múltiple entre el peso unitario húmedo y las velocidades sísmicas y dos regresiones simples entre el peso unitario húmedo y un tipo de velocidad sísmica, V_p o V_s respectivamente, se llega a la conclusión de que para estimar el peso unitario húmedo de una muestra de suelo arcillo limoso, el modelo más confiable es el correspondiente a la Ecuación 17 debido a que toma en cuenta los



vslores de V_p y V_s simultáneamente, de manera que refleja de mejor manera el estado de la muestra de suelo en torno a su humedad.

El modelo es el siguiente:

$$\gamma_h = 0,006558 V_p + 0,007947 V_s + 11,276615$$

Ecuación 26. Modelo de regresión lineal múltiple para peso unitario húmedo a partir de velocidades sísmicas.

En donde:

γ_h : Peso unitario húmedo (kN/m^3)

V_p : Velocidad de onda primaria (m/s)

V_s : Velocidad de onda secundaria (m/s)

Este modelo es aplicable para el rango de velocidades sísmicas analizado en este estudio que corresponde entre 110 m/s a 710 m/s para V_p y entre 50 m/s y 390 m/s para V_s .

También se determinaron 4 modelos de relación entre humedad y velocidades de propagación de onda. Se obtuvo un modelo para cada categoría de ensayos clasificados por el número de golpes por capa utilizados en la compactación, o dicho de otra manera, se obtuvo un modelo para cada rango de peso unitario como se muestra en la Tabla 47.

Sin embargo, estos modelos no resultan prácticos y no se recomienda aplicarlos debido a que son aplicables únicamente para el rango de velocidades sísmicas y peso unitario húmedo obtenidos para cada compactación por número de golpes por capa en esta investigación. Se trató de obtener un modelo más general que relacione las velocidades sísmicas y peso unitario húmedo con el porcentaje de humedad del suelo pero no se obtuvieron resultados consistentes por lo que también se descartó este modelo.

Además, se pudo constatar que el suelo estudiado (arcillo limoso) presenta abundamiento cuando no presenta ningún porcentaje de compactación. Este fenómeno



se produce por la naturaleza cohesiva de la arcilla, la misma que disminuye la densidad conforme aumenta la humedad como se puede verificar en la Ilustración 51. Es decir, el material conforme aumenta la humedad presenta mayor abundamiento, por lo tanto el material ocupa más volumen, disminuyendo así su densidad.

Cabe recalcar que el peso unitario húmedo máximo obtenido en el ensayo sísmico corresponde a un porcentaje del peso unitario húmedo máximo obtenido en el ensayo Proctor, por lo que para obtener modelos más generales para estimar este parámetro a partir de las velocidades sísmicas de un suelo arcillo limoso, se recomienda realizar mediciones de las velocidades sísmicas con pesos unitarios húmedos mayores a los alcanzados en esta investigación. No es posible obtener un modelo que relacione el porcentaje de humedad de un suelo arcillo limoso con sus velocidades sísmicas, debido a que existe una gran variabilidad de la humedad con relación a estas velocidades. Se pudo observar que independientemente del porcentaje de humedad de la muestra de suelo, a valores semejantes de peso unitario, los valores de velocidades sísmicas van a mantener un valor similar. Es decir que no existe una tendencia de que a mayor humedad exista mayores velocidades sísmicas.

Esta investigación puede servir de base para obtener modelos más generales de estimación de peso unitario húmedo de un suelo arcillo limoso a partir de sus velocidades sísmicas utilizando los datos obtenidos y realizando mediciones de dichas velocidades en muestras de suelo con mayor grado de compactación, es decir con mayor peso unitario húmedo; a partir de este se puede estimar otro modelo para relacionar el peso unitario seco del suelo arcillo limoso con sus velocidades sísmicas.



Bibliografía.

American Society for Testing and Materials. (2012). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (ASTM D1557-12). United States.

Armas Novoa, R. (2004). *Compactación de Suelos*. Cuenca.

Atlantic International University. (2003). *Lección 4: Regresión y correlación simple*.

Bruce B. Redpath. (1973). *Seismic Refraction Exploration For Engineering Site Investigations*. Livermore, California.

Das, B. M. (2001). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. (Thomson Learning, Ed.). México.

Das, B. M. (2013). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. (Cengage Learning, Ed.) (Cuarta Edición).

Dobrin, M. B. (1980). *Introducción a la Prospección Geofísica*. (Ediciones Omega, Ed.) (Segunda Ed). Barcelona.

Enkay Enterprises. (2000). TICO Ultrasonic Testing Instrument.

IBM. (2015). IBM SPSS Statistics: Visión General. Retrieved November 18, 2017, from <https://www.ibm.com/mx-es/marketplace/spss-statistics#product-header-top>

INIGEMM. Hoja Geológica 73: Azogues (1980).

Irani, R. R. (1963). *Tamaño de partículas, Interpretación y Aplicación*. (John Wiley & Sons, Ed.). Nueva York.

Lahura, E. (2003). *El coeficiente de correlación y correlaciones espúreas*.

Manilla, A. A. (2003). *Geofísica Aplicada en los Proyectos Básicos de Ingeniería Civil*. Sanfandila. Retrieved from <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt229.pdf>



Rimoldi, C., & Mariano, L. (2012). *Ensayo no Destructivo por método de ultrasonido*.

Santos de la Cruz, E., Cancino, N., Yenque, J., Ramírez, D., & Palomino, M. (2005). El Ultrasonido y su Aplicación. *Industrial Data*, 25–28.

Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1955). *Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica*. (John Wailey & Sons, Ed.) (Segunda Ed). New York.

Universidad de Chile. (2014). *Guía de Asociación entre variables (Pearson y Spearman en SPSS)*. Santiago.