

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**ESTUDIO DE LA ESTABILIZACIÓN DE ARCILLAS EXPANSIVAS
DE MANABÍ CON CENIZA DEL VOLCÁN TUNGURAHUA**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL,
MENCIÓN ESTRUCTURAS**

SHIRLEY KAROLINA BUITRÓN LANDETA
buitron.shirley2012@gmail.com

ALEXIS JAIR ENRÍQUEZ LEÓN
aenriquez.eng@gmail.com

DIRECTOR: ING. EUGENIA DE LAS MERCEDES VILLACÍS TRONCOSO, MSc.
mercedes.villacis@epn.edu.ec

TOMO I

Quito, julio 2018

DECLARACIÓN

Nosotros, Shirley Karolina Buitrón Landeta, Alexis Jair Enríquez León, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado en ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa vigente.

SHIRLEY K. BUITRÓN LANDETA

ALEXIS J. ENRÍQUEZ LEÓN

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Shirley Karolina Buitrón Landeta y Alexis Jair Enríquez León, bajo mi supervisión.

ING. EUGENIA DE LAS MERCEDES VILLACÍS TRONCOSO, MSc.
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme la fuerza y la valentía para poder afrontar cada uno de los retos que se han presentado en mi vida.

A Wilson, mi papi quien ha sido el hombre trabajador, honesto que siempre con sus detalles ha mostrado el gran amor que tiene por su familia. Gracias a sus consejos, correcciones y apoyo incondicional. Gracias por amarme, por consentirme y exigirme diariamente para ser una mejor persona y profesional.

A Laura, mi mamita quien ha sido siempre la persona que me ha dado las mejores lecciones de vida, quien ha sido la mujer amorosa, valiente, trabajadora, honesta que con una sola palabra podía cambiar mis días y hacerlos mejor. Ella que con su amor incondicional y su lucha constante ha formado la persona que hoy soy. Gracias por ser la mejor amiga y mamá de todo el mundo.

A Danny y Alisson, mis ñaños quienes siempre lograban sacarme de mis malos ratos con sus bromas, quienes han estado ahí pese a mi mal humor y me han cuidado siempre. Gracias a su cariño, alegría y su apoyo incondicional.

A Alexis, mi futuro colega quien ha mostrado siempre ser una persona perseverante y que con sus exigencias ha logrado que este proyecto sea posible.

A la Ing. Mercedes Villacis quien ha compartido sus conocimientos, ha tenido una gran predisposición y ha sido fundamental para el desarrollo de este proyecto.

Al personal del LEMSUR por brindarnos su gran ayuda y facilitarnos el uso de instalaciones y equipos para el desarrollo del proyecto Técnico - Experimental.

A mi novio, Alex que me ha brindado su apoyo y amor incondicional durante este tiempo. Finalmente, a mis amigos con quienes he vivido cosas únicas y me han llenado de recuerdos inolvidables.

Shirley Karolina Buitron Landeta

AGRADECIMIENTOS

A la Escuela Politécnica Nacional por acogerme en sus aulas, imponiéndome desafíos continuamente, enseñándome el valor de la constancia y mejorándome como ser humano.

A la Ing. Mercedes Villacís, directora de tesis, por su confianza inicial entregada en nosotros, su apoyo, guía y consejos que se consolidaron en la finalización exitosa de este trabajo.

A todo el equipo del Laboratorio de Ensayo de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas - LEMSUR, que desde inicio a fin nos brindaron su ayuda incondicional y todas las facilidades para el desarrollo, al Ing. Martínez, Iván, Antonio, Paúl, a Pancho y a Don Fredy.

A mi compañera de tesis Shirley, por su predisposición, perseverancia y compromiso para lograr culminar este proyecto en el tiempo planificado.

A mi hermana Marjorie, por su ayuda desde las cosas más pequeñas y su siempre compañía.

Alexis Jair Enriquez León

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mis papis Wilson y Laura por su amor incondicional.

A mi ñaño Danny, por su gran cariño y ejemplo de fortaleza.

A mi ñaña Alisson, por su amor, paciencia e incondicionalidad. Tú lo tienes todo
para siempre hacerlo mejor.

Shirley Karolina Buitron Landeta

DEDICATORIA

A mis padres, Hermis Enríquez y Ana León.

A Gabrielly, pilar fundamental.

Alexis Jair Enríquez León

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN	II
CERTIFICACIÓN	III
AGRADECIMIENTOS	IV
AGRADECIMIENTOS	V
DEDICATORIA.....	VI
DEDICATORIA.....	VII
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VIII
LISTA DE TABLAS.....	XII
LISTA DE GRÁFICOS.....	XVI
LISTA DE FIGURAS	XVIII
RESUMEN	XX
ABSTRACT	XXI
PRESENTACIÓN	XXII
CAPÍTULO 1	1
GENERALIDADES.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	3
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.4 ALCANCE.....	4
1.5 ORIGEN DE LAS MUESTRAS DEL SUELO	4
1.5.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA	4

1.5.2	GEOLOGÍA DE LA ZONA	5
1.5.3	GEOMORFOLOGÍA DE LA REGIÓN.....	6
1.5.4	TOPOGRAFÍA DE LA ZONA.....	7
1.5.5	CLIMATOLOGÍA DE LA ZONA	7
1.6	RESEÑA DEL VOLCÁN TUNGURAHUA	8
1.6.1	ANTECEDENTES	8
1.6.2	ACTIVIDAD ERUPTIVA ACTUAL	9
1.7	ORIGEN DE LAS MUESTRAS DE CENIZA VOLCÁNICA	10
1.7.1	LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA	10
1.7.2	GEOLOGÍA DE LA ZONA	10
1.7.3	GEOMORFOLOGÍA DE LA REGIÓN.....	12
CAPÍTULO 2		14
ESTADO DEL ARTE		14
2.1.	EJE DE ESTUDIO	14
2.2.	DOCUMENTOS REVISADOS	15
2.3.	HALLAZGOS	23
CAPÍTULO 3		26
MARCO TEÓRICO.....		26
3.1.	ARCILLAS EXPANSIVAS.....	26
3.1.1.	PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES.....	26
3.1.2.	ESTRUCTURA MINERAL.....	26
3.1.3.	CLASIFICACIÓN DEL SUELO.....	29
3.1.4.	EFFECTOS DE ARCILLAS EN LAS CONSTRUCCIONES	30
3.1.5.	EFFECTOS DE LAS CONSTRUCCIONES EN ARCILLAS	30
3.2.	CENIZA VOLCÁNICA.....	31
3.2.1.	PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES.....	31

3.2.2.	ESTRUCTURA MINERAL.....	32
3.3.	ESTABILIZACIÓN DE SUELOS.....	32
3.3.1.	GENERALIDADES.....	33
3.3.2.	ALTERNATIVAS DE ESTABILIZACIÓN.....	33
3.3.3.	ESTABILIZACIÓN CON PUZOLANA DE CENIZA.....	36
CAPÍTULO 4	41
TRABAJOS DE LABORATORIO.....		41
4.1.	TOMA DE MUESTRAS.....	41
4.1.1.	MUESTRAS INALTERADAS.....	41
4.1.2.	MUESTRAS ALTERADAS.....	42
4.2.	PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS.....	42
4.3.	DOSIFICACIONES DE LA MEZCLA.....	42
4.4.	CANTIDAD DE ENSAYOS DE LABORATORIO.....	43
4.5.	ENSAYOS DE SUELO SIN TRATAR.....	45
4.5.1.	ENSAYOS FÍSICOS.....	45
4.5.2.	ENSAYOS MECÁNICOS.....	63
4.6.	ENSAYOS DE SUELO TRATADO CON CENIZA VOLCÁNICA.....	76
4.6.1.	ENSAYOS FÍSICOS.....	76
4.6.2.	ENSAYOS MECÁNICOS.....	83
CAPÍTULO 5	85
ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS EXPERIMENTALES.....		85
5.1.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	85
5.1.1.	LÍMITES DE CONSISTENCIA.....	85
5.1.2.	ACTIVIDAD.....	91
5.1.3.	ÍNDICE DE EXPANSIÓN.....	91
5.1.4.	DENSIDAD DE SÓLIDOS.....	93

5.1.5.	PERMEABILIDAD	95
5.1.6.	DIFRACCIÓN POR RAYOS X	97
5.1.7.	FLUORESCENCIA POR RAYOS X	99
5.1.8.	CORTE DIRECTO	101
5.1.9.	CONSOLIDACIÓN	104
CAPÍTULO 6		107
ANÁLISIS ECONÓMICO.....		107
6.1.	COSTO-BENEFICIO DE MÉTODOS TRADICIONALES.....	107
6.2.	COSTO-BENEFICIO DEL MÉTODO INVESTIGADO.....	113
6.2.1.	CÁLCULO DEL COSTO UNITARIO DE LA CENIZA	113
6.2.2.	APU's DE ESTABILIZACIÓN CON CENIZA VOLCÁNICA	122
6.3.	ANÁLISIS EN FUNCIÓN DEL COSTO-BENEFICIO	126
CAPÍTULO 7		129
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		129
7.1.	CONCLUSIONES	129
7.2.	RECOMENDACIONES.....	132
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		134

LISTA DE TABLAS

TABLA 1.1. UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS NATURALES DE ESTUDIO.....	5
TABLA 2.1. REVISIÓN DE DOCUMENTOS REVISTAS Y TESIS.....	15
TABLA 2.2. DESCRIPCIÓN Y RESULTADOS DE REVISTAS Y TESIS	17
TABLA 2.3. CATEGORIZACIÓN POR PAÍSES DE REVISTAS Y TESIS.....	22
TABLA 2.4. CONCENTRACIÓN DE ESTUDIO POR REVISTA E INSTITUCIÓN.....	22
TABLA 2.5. CATEGORIZACIÓN POR VARIABLES	24
TABLA 3.1. PORCENTAJES TÍPICOS DE CEMENTO SEGÚN EL TIPO DE SUELO	36
TABLA 4.1. CANTIDAD DE ENSAYOS SEGÚN EL TIPO DE SUELO	44
TABLA 4.2. CONTENIDO DE HUMEDAD DE MUESTRAS NATURALES	46
TABLA 4.3. SÍMBOLOS DE IDENTIFICACIÓN PARA EL SUCS.....	46
TABLA 4.4. LÍMITE LIQUIDO DE MUESTRAS NATURALES.....	48
TABLA 4.5. LÍMITE PLÁSTICO DE MUESTRAS NATURALES.....	50
TABLA 4.6. ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE MUESTRAS NATURALES	50
TABLA 4.7. CLASIFICACIÓN SUCS DE MUESTRAS NATURALES	51
TABLA 4.8. ÍNDICE DE LIQUIDEZ DE MUESTRAS NATURALES	51
TABLA 4.9. GRANULOMETRÍA POR LAVADO DE MUESTRAS NATURALES	53
TABLA 4.10. PORCENTAJE PASANTE SEGÚN EL DIÁMETRO POR GRANULOMETRÍA DE HIDRÓMETRO	54
TABLA 4.11. ACTIVIDAD DE ARCILLAS NATURALES	55
TABLA 4.12. ACTIVIDAD DE MUESTRAS NATURALES.....	55
TABLA 4.13. POTENCIAL DE EXPANSIÓN DE SUELOS	57
TABLA 4.14. ÍNDICE DE EXPANSIÓN DE MUESTRAS NATURALES.....	57
TABLA 4.15. DENSIDAD DE SÓLIDOS DE MUESTRAS NATURALES	58
TABLA 4.16. PERMEABILIDAD DE MUESTRAS NATURALES.....	60

TABLA 4.17. DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE MUESTRAS NATURALES.....	62
TABLA 4.18. COMPACTACIÓN DE MUESTRAS NATURALES.....	65
TABLA 4.19. CORTE DIRECTO DE MUESTRAS NATURALES	67
TABLA 4.20. CONSOLIDACIÓN DE MUESTRA M3 - PROEBETA 1 Y 2.....	74
TABLA 4.21. CONSOLIDACIÓN DE MUESTRA M4 - PROEBETA 1 Y 2.....	75
TABLA 4.22. CONSOLIDACIÓN DE MUESTRA M5 - PROEBETA 1 Y 2.....	75
TABLA 4.23. CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL DE MUESTRAS DOSIFICADAS	76
TABLA 4.24. LÍMITE LIQUIDO DE MUESTRAS DOSIFICADAS.....	77
TABLA 4.25. LÍMITE PLÁSTICO DE MUESTRAS DOSIFICADAS.....	78
TABLA 4.26. ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE MUESTRAS DOSIFICADAS	79
TABLA 4.27. ÍNDICE DE LIQUIDEZ DE MUESTRAS DOSIFICADAS	80
TABLA 4.28. ACTIVIDAD DE MUESTRAS DOSIFICADAS.....	80
TABLA 4.29. ÍNDICE DE EXPANSIÓN DE MUESTRAS DOSIFICADAS	81
TABLA 4.30. DENSIDAD DE SÓLIDOS DE MUESTRAS DOSIFICADAS.....	82
TABLA 4.31. PERMEABILIDAD DE SÓLIDOS DE MUESTRAS DOSIFICADAS	83
TABLA 4.32. CORTE DIRECTO DE MUESTRAS DOSIFICADAS	83
TABLA 4.33. CONSOLIDACIÓN DE MUESTRAS DOSIFICADAS	84
TABLA 5.1. RESULTADOS DE LÍMITES DE CONSISTENCIA Y CONTENIDO DE HUMEDAD	85
TABLA 5.2. PORCENTAJE DE VARIACIÓN DE LÍMITES DE CONSISTENCIA SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA.....	88
TABLA 5.3. RESULTADOS DE ÍNDICES DE LIQUIDEZ SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA.....	90
TABLA 5.4. RESULTADOS DE PORCENTAJE PASANTE DEL N°200 Y ACTIVIDAD SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA.....	91
TABLA 5.5. RESULTADOS DEL ÍNDICE DE EXPANSIÓN Y SU CLASIFICACIÓN SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA.....	92
TABLA 5.6. RESULTADOS DE LA DENSIDAD DE SÓLIDOS SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA.....	93

TABLA 5.7. RESULTADOS DE LA PERMEABILIDAD SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA.....	96
TABLA 5.8. COMPOSICIÓN MINERAL CALCULADA PARA EL SUELO M3 NATURAL SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA.....	98
TABLA 5.9. COMPOSICIÓN MINERAL CALCULADA PARA EL SUELO M4 NATURAL SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA.....	98
TABLA 5.10. COMPOSICIÓN MINERAL CALCULADA PARA EL SUELO M5 NATURAL SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA.....	99
TABLA 5.11. COMPOSICIÓN DE ELEMENTOS - ÓXIDOS DEL SUELO M3, M4, M5 Y DE CENIZA VOLCÁNICA.....	100
TABLA 5.12. RESULTADOS DE ÁNGULO DE FRICCIÓN Y COHESIÓN SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA.....	101
TABLA 5.13. RESULTADOS DE LA CONSOLIDACIÓN SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA.....	106
TABLA 6.1. RESUMEN DE ESTABILIZACIÓN CON DIFERENTES ADITIVOS.....	107
TABLA 6.2. APU 01 - ESTABILIZACIÓN CON 9% DE CEMENTO TIPO MH.....	108
TABLA 6.3. APU 02 - ESTABILIZACIÓN CON 7% DE CEMENTO.....	109
TABLA 6.4. APU 03 – ESTABILIZACIÓN CON 7% DE CAL.....	110
TABLA 6.5. APU 04 - ESTABILIZACIÓN DE SUELOS EXPANSIVOS CON 1.5% DE POLÍMEROS.....	111
TABLA 6.6. APU 05 - ESTABILIZACIÓN DE ARCILLA CON EL 16% DE CAL.....	112
TABLA 6.7. RUBROS PARA ESTIMACIÓN DE COSTO DE PRODUCCIÓN CENIZA VOLCÁNICA.....	114
TABLA 6.8. APU 06 - DESBANQUE DE CENIZA VOLCÁNICA CON MAQUINARIA.....	115
TABLA 6.9. APU 07 - DESALOJO DE CENIZA VOLCÁNICA CON VOLQUETA Y CARGADORA FRONTAL.....	116
TABLA 6.10. APU 08 - TRANSPORTE DE CENIZA VOLCÁNICA EN VOLQUETAS HASTA 10 KM.....	117

TABLA 6.11. APU 09 - BODEGA PROVISIONAL CON CUBIERTA METÁLICA.....	118
TABLA 6.12. APU 10 - SECADO DE CENIZA VOLCÁNICA CON HORNO INDUSTRIAL ELÉCTRICO	119
TABLA 6.13. APU 11 - TAMIZADO DE CENIZA VOLCÁNICA	120
TABLA 6.14. APU 12 - EMPAQUETADO EN FUNDAS DE 25 KG	121
TABLA 6.15. RESUMEN DEL COSTO DIRECTO DE ESTABILIZACIÓN CON CENIZA AL 10, 20 Y 30%.....	122
TABLA 6.16. APU 13 - ESTABILIZACIÓN DE ARCILLA EXPANSIVA CON 10% DE CENIZA VOLCÁNICA.....	123
TABLA 6.17. APU 14 - ESTABILIZACIÓN DE ARCILLA EXPANSIVA CON 20% DE CENIZA VOLCÁNICA.....	124
TABLA 6.18. APU 15 - ESTABILIZACIÓN DE ARCILLA EXPANSIVA CON 30% DE CENIZA VOLCÁNICA.....	125
TABLA 6.19. COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN SEGÚN EL COSTO DIRECTO.....	126

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICA 5.1. LÍMITE LÍQUIDO SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA	86
GRÁFICA 5.2. LÍMITE PLÁSTICO SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA.....	87
GRÁFICA 5.3. ÍNDICE DE PLASTICIDAD SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA.....	88
GRÁFICA 5.4. PORCENTAJE DE VARIACIÓN DE LÍMITES DE CONSISTENCIA PARA EL SUELO M3 NATURAL	89
GRÁFICA 5.5. PORCENTAJE DE VARIACIÓN DE LÍMITES DE CONSISTENCIA PARA EL SUELO M4 NATURAL	89
GRÁFICA 5.6. PORCENTAJE DE VARIACIÓN DE LÍMITES DE CONSISTENCIA PARA EL SUELO M5 NATURAL	90
GRÁFICA 5.7. ÍNDICE DE EXPANSIÓN SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA.....	92
GRÁFICA 5.8. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DEL ÍNDICE DE EXPANSIÓN PARA LOS SUELOS M3, M4 Y M5 NATURALES.....	93
GRÁFICA 5.9. DENSIDAD DE SÓLIDOS SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA.....	94
GRÁFICA 5.10. PORCENTAJE DE VARIACIÓN DE LA DENSIDAD DE SÓLIDOS PARA LOS SUELOS M3, M4 Y M5 NATURALES.....	95
GRÁFICA 5.11. RELACIÓN DE VACÍOS EN PERMEABILIDAD SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA	97
GRÁFICA 5.12. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE RELACIÓN DE VACÍOS PARA LOS SUELOS M3, M4 Y M5 NATURALES	97
GRÁFICA 5.13. ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA SEGÚN PORCENTAJE DE CENIZA.....	102
GRÁFICA 5.14. PORCENTAJE DE VARIACIÓN DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA PARA LOS SUELOS M3, M4 Y M5 NATURALES	102

GRÁFICA 5.15. COHESIÓN SEGÚN PORCENTAJE DE CENIZA.....	103
GRÁFICA 5.16. PORCENTAJE DE VARIACIÓN DE LA COHESIÓN PARA LOS SUELOS M3, M4 Y M5 NATURALES.....	104
GRÁFICA 6.1. COSTO DIRECTO DE ESTABILIZACIÓN POR M ³ SEGÚN LOS MÉTODOS INVESTIGADOS Y TRADICIONALES.....	128

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1. DESNIVELES EN LA VÍA POR FALLAS TRANSVERSALES	2
FIGURA 1.2. UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS POR CANTONES.....	5
FIGURA 1.3. SUELO CARACTERÍSTICO DEL ESTUDIO	6
FIGURA 1.4. GEOMORFOLOGÍA DEL ECUADOR.....	7
FIGURA 1.5. UBICACIÓN DEL VOLCÁN TUNGURAHUA ENTRE PROVINCIAS DE TUNGURAHUA Y CHIMBORAZO.....	8
FIGURA 1.6. LUGARES DE EXTRACCIÓN DE CENIZA	10
FIGURA 1.7. GEOLOGÍA SIMPLIFICADA DEL VOLCÁN TUNGURAGUA	12
FIGURA 3.1. AGRUPACIONES MOLECURALES DE LAS ARCILLAS	27
FIGURA 3.2. ESTRUCTURAS LAMINARES DE LA CAOLINITA Y ESMECTITA	27
FIGURA 3.3. PROPIEDADES DE LOS MINERALES DE LAS ARCILLAS	28
FIGURA 3.4. MINERALES CAOLINITA Y MONTMORILLONITA	29
FIGURA 3.5. ESCARIFICACIÓN CON MOTONIVELADORA.....	38
FIGURA 3.6. HUMECTACIÓN CON TANQUEROS DE AGUA.....	38
FIGURA 3.7. ADICIÓN DE CENIZA VOLCÁNICA EN EL SUELO.....	39
FIGURA 3.8. MEZCLADO DE SUELO Y CENIZA VOLCÁNICA.....	39
FIGURA 3.9. COMPACTACIÓN CON RODILLO PATA DE CABRA Y LISO.....	40
FIGURA 4.1. OBTENCIÓN DE MUESTRAS INALTERADAS EN CAMPO.....	41
FIGURA 4.2. OBTENCIÓN DE MUESTRAS ALTERADAS EN CAMPO	42
FIGURA 4.3. DOSIFICACIONES DE LAS MUESTRAS.....	43
FIGURA 4.4. PREPARACIÓN DE SUELO PARA CONTENIDO DE HUMEDAD.....	45
FIGURA 4.5. CARTA DE PLASTICIDAD PARA SUCS.....	47
FIGURA 4.6. COPA DE CASAGRANDE PARA EL LÍMITE LÍQUIDO	48
FIGURA 4.7. ENSAYO DE LÍMITE PLÁSTICO.....	49
FIGURA 4.8. ENSAYO DE GRANULOMETRÍA POR LAVADO.....	52

FIGURA 4. 9. ENSAYO DE GRANULOMETRÍA POR HIDRÓMETRO.....	54
FIGURA 4.10. ENSAYO INDICE DE EXPANSIÓN	57
FIGURA 4.11. ENSAYO DE DENSIDAD DE SÓLIDOS.....	58
FIGURA 4.12. ENSAYO PERMEABILIDAD	60
FIGURA 4.13. INTERPRETACIÓN DE PERMEABILIDAD EN SUELOS.....	61
FIGURA 4.14. ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO	65
FIGURA 4.15. ENSAYO CORTE DIRECTO	67
FIGURA 4.16. ENSAYO CORTE DIRECTO CON MUESTRA FALLADA.....	67
FIGURA 4.17. ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN	69
FIGURA 4.18. ETAPAS DE LA CONSOLIDACIÓN	69
FIGURA 4.19. MÉTODO GRÁFICO DE CASAGRANDE PARA σ'_c	71
FIGURA 4.20. MÉTODO GRÁFICO DE TAYLOR PARA t_{90}	72

RESUMEN

El proyecto Técnico - Experimental propuesto expone la estabilización de arcillas expansivas con tres muestras de suelo obtenidas en diferentes zonas de la provincia de Manabí y la implementación de un aditivo que no se ha estudiado en el país como es la ceniza volcánica. Este innovador estabilizador se lo encuentra en las faldas del volcán Tungurahua debido a la actividad que ha presentado durante su era geológica y en los últimos años, implementándolo debido a que su puzolana natural actúa como un cementante.

La adición de ceniza del volcán Tungurahua en las arcillas expansivas plantea mejorar las propiedades del suelo, por lo que se realizaron varios ensayos físicos y mecánicos como fueron: contenido de humedad, SUCS, granulometría por lavado y por hidrómetro, densidad de sólidos, índice de expansión, análisis mineralógico, permeabilidad, corte directo y consolidación, a partir de muestras de suelo naturales usadas como patrón que permitieron observar su comportamiento inicial y masas de suelo dosificadas al 10, 20 y 30% en peso seco por el aditivo ya mencionado.

Los resultados arrojados por los ensayos de caracterización de suelo han permitido realizar un análisis del comportamiento de las arcillas antes y después de la implementación de la puzolana, dado que se midió la influencia en sus propiedades físico - mecánicas. Generando deducciones claras del comportamiento del suelo en general, quedando en manifiesto el 20% como el porcentaje óptimo de puzolana para las condiciones analizadas.

Se realizó un exhaustivo análisis del costo - beneficio de los métodos tradicionales para la estabilización de suelos como: el cemento, la cal y los polímeros, así como también el análisis de precios unitarios de la ceniza volcánica y el proceso de producción de este para la comercialización dentro del país, proponiendo así nuevas fuentes de trabajo y materiales de bajo impacto ambiental.

ABSTRACT

The proposed Technical - Experimental project exposes the stabilization of expansive clays with three soil samples obtained in different areas of the province of Manabí and the implementation of an additive that has not been studied in the country such as volcanic ash. This innovative stabilizer is found in the foothills of the Tungurahua volcano due to the activity it has presented during its geological era and in recent years, implementing it because its natural pozzolan acts as a cementing agent.

The addition of ash from the Tungurahua volcano in the expansive clays proposes to improve the properties of the soil, which is why several physical and mechanical tests were carried out, such as: moisture content, SUCS, granulometry by washing and hydrometer, density of solids, expansion, mineralogical analysis, permeability, direct shear and consolidation, from natural soil samples used as a standard that allowed to observe their initial behavior and soil masses dosed at 10, 20 and 30% in dry weight for the aforementioned additive.

The results of the soil characterization tests have allowed an analysis of the behavior of the clays before and after the implementation of the pozzolan, since the influence on their physical - mechanical properties was measured. Generating clear deductions of the behavior of the soil in general, remaining 20% as the optimal percentage of pozzolana for the conditions analyzed.

An exhaustive analysis of the cost - benefit of the traditional methods for the stabilization of soils such as cement, lime and polymers was carried out, as well as the analysis of unitary prices of the volcanic ash and the production process of this for the marketing within the country, thus proposing new sources of work and materials of low environmental impact.

PRESENTACIÓN

El presente estudio Técnico - Experimental se planteó con el fin de estabilizar las arcillas expansivas de Manabí con ceniza del volcán Tungurahua mediante la realización de diferentes ensayos como: granulometría, SUCS, contenido de humedad, densidad de sólidos, índice de expansión, permeabilidad, corte directo, consolidación y su estructura mineralógica, para suelos naturales como patrón y tratados, con dosificaciones que fluctúan entre el 10, 20 y 30% de aditivo. A su vez, se realizó una comparación entre los valores obtenidos de estos ensayos. Las etapas realizadas se describen a continuación:

Capítulo 1 Generalidades: Se presenta una breve introducción de la estabilización de arcillas expansivas, así como los objetivos, el planteamiento del problema, la justificación y el alcance. Este apartado muestra la ubicación, la geología, geomorfología, topografía y el clima de la zona del suelo en estudio, además del número de muestras extraídas inicialmente; a su vez se presenta una reseña concisa sobre la actividad eruptiva del volcán Tungurahua, su ubicación y la morfología de la zona.

Capítulo 2 Estado del Arte: Se realiza un análisis exhaustivo de artículos y tesis presentadas alrededor del mundo que han basado su estudio en arcillas expansivas y han sido relevantes a fin a la línea de investigación. Esta sección muestra una pequeña descripción sobre cada uno de los documentos revisados, los resultados obtenidos y estado actual del ámbito estudiado.

Capítulo 3 Marco teórico: Describe las principales propiedades, características y la estructura mineral de las arcillas expansivas, como también de la ceniza volcánica. Se presenta una breve descripción sobre la estabilización de suelo, las alternativas que se presentan en la actualidad y se propone de forma general un método de aplicación del aditivo de ceniza.

Capítulo 4 Trabajos de Laboratorio: Se desarrollan los ensayos de laboratorio para muestras de suelo sin tratar y tratadas con dosificaciones de ceniza volcánica del 10, 20 y 30%. En esta sección se clasifican los ensayos en físicos como son: contenido de humedad, SUCS, granulometría, densidad de sólidos, permeabilidad, índice de expansión, difracción por rayos X y fluorescencia de rayos X; así como también en ensayos mecánicos como: proctor modificado, corte directo y consolidación. De cada una de estas pruebas se presenta una pequeña descripción de su definición, su procedimiento y los valores obtenidos.

Capítulo 5 Análisis de resultados experimentales: Se realiza un análisis de cada uno de los ensayos presentados en el apartado anterior, y se compara las propiedades del suelo sin tratar con las propiedades del suelo arcilloso tratado con ceniza del volcán Tungurahua en la búsqueda del porcentaje óptimo.

Capítulo 6 Análisis Económico: Se investiga el costo de la estabilización de suelos expansivos con métodos tradicionales como son cal, cemento y polímeros, además se realiza el análisis de precios unitarios de los elementos necesarios para la realización de la estabilización con ceniza volcánica para la obtención del costo que este tendría en el mercado y se realiza una comparación entre estas dos secciones.

Capítulo 7 Conclusiones y Recomendaciones: Se generan deducciones de todos los resultados obtenidos en el desarrollo del proyecto Técnico - Experimental.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

Este estudio se basa en la estabilización de arcillas expansivas, debido a que en algunas provincias de la Costa ecuatoriana se cuenta con la presencia de suelos expansivos, como es el caso de la provincia de Manabí, en esta zona se ha tenido registro de problemas relacionados con la inestabilidad de los suelos, produciendo malestar y pérdidas económicas directas a la población.

La presencia de este tipo de suelos ha provocado daños en obras civiles, por ejemplo en zonas residenciales y proyectos viales, específicamente, generando afectaciones en las cimentaciones debido a la falta de diseño previo para soportar solicitaciones como la presión ejercida por las arcillas (Nieto, 1985); el origen de este problema radica en la naturaleza de este tipo de suelo dado que presenta una elevada plasticidad y cambios volumétricos como es el hinchamiento o contracción del material, en presencia de cambios de contenido de humedad (Higuera, Gómez & Pardo, 2012).

Con el paso del tiempo, se han desarrollado nuevas tecnologías en la rama de la estabilización de suelos con diferentes materiales como, por ejemplo: cenizas volátiles, aceites sulfonados, resinas, polímeros, entre otros; los cuales han venido ganando espacio en recientes investigaciones. En búsqueda de una alternativa factible para el medio nacional, se ha optado por la utilización de un nuevo elemento estabilizador, que es la ceniza del volcán Tungurahua por la abundancia presentada en sus alrededores a causa de las constantes erupciones desde 1999 hasta la actualidad (Instituto Geofísico, 2017).

Es por esta razón, la Escuela Politécnica Nacional a través de la investigación busca generar conocimiento; en el área de obra civil se plantea una variante para la estabilización de suelos mediante un aditivo presente en el país, como es la ceniza volcánica, dando lugar al mejoramiento de su resistencia, permeabilidad,

estabilidad volumétrica, trabajabilidad y permanencia de las propiedades mencionadas (Higuera, et al, 2012).

El problema con las arcillas expansivas ha sido recurrente en diferentes latitudes del planeta como en Estados Unidos, Australia, India y Sudáfrica, entre otros, que incurren en costos de construcción muy importantes (Jones & Jefferson, 2012). La Asociación de Aseguradoras Británicas ha estimado que el costo de los daños producidos por este fenómeno en la industria sobrepasa los \$500 millones por año (Driscoll & Crilly, 2000). En Ecuador, se ha presentado en numerosas ocasiones este problema con abundancia en la provincia de Manabí, con afectaciones notables a barrios susceptibles a estos fenómenos, sin embargo, no existen registros de pérdidas económicas. En la Figura 1.1., se aprecian daños en las vías en Manabí debido a los suelos.

FIGURA 1.1. DESNIVELES EN LA VÍA POR FALLAS TRANSVERSALES



Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

En este contexto, se desarrollará una investigación de carácter técnico experimental, siendo los ensayos avalados por normas nacionales del Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, internacionales como la American Society for Testing and Materials ASTM y regionales. Los cuales serán desarrollados en el Laboratorio de ensayos de materiales, mecánica de suelos y rocas (LEMSUR) sobre el suelo de la provincia de Manabí, antes y después de la aplicación de la ceniza extraídas de las faldas del volcán Tungurahua, determinando así sus propiedades mecánicas y físicas, para la obtención de su mejor respuesta.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Estabilizar arcillas expansivas con ceniza del volcán Tungurahua, en diferentes dosificaciones para controlar la excesiva presión de expansión y expansión libre por el incremento de humedad de este suelo.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el comportamiento físico-mecánico de arcillas expansivas estabilizadas con la puzolana de la ceniza volcánica en diferentes porcentajes, basado en el análisis de sus propiedades de consolidación y permeabilidad.
- Determinar la relación entre la mineralogía de las arcillas expansivas con la presión de expansión.
- Comparar el costo-beneficio de la estabilización de arcillas expansivas y ceniza volcánica con los métodos tradicionales utilizados en el país.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Este estudio técnico experimental busca lograr ampliar el conocimiento sobre las arcillas expansivas, las cuales al entrar en contacto con el agua pueden generar importantes cambios de volumen (Bauzá, 2015). Se plantea mediante este estudio estabilizar al suelo con el uso de la puzolana de la ceniza del volcán Tungurahua, mejorando así su estabilidad volumétrica y expansión (Higuera, et al, 2012). Se generarán conocimientos que no han sido obtenidos durante la formación en pregrado de ingeniería civil y a su vez en el mejoramiento de arcillas expansivas, pues se trata de un método innovador con materiales de bajo costo y disponibilidad en el ambiente. Principalmente en provincias como Manabí, en donde la población hace uso de este tipo de suelos en la construcción y se aumenta la vulnerabilidad con respecto a la estabilidad de la construcción y más aún en caso de ocurrencia de sismos (Nieto, 1985). Con las mediciones que se realizarán también se aportará conocimiento de las propiedades de la ceniza y las dosificaciones necesarias para el mejor funcionamiento del suelo. Debido a la gran disponibilidad de arcillas expansivas en la costa ecuatoriana, se hace

necesario el desarrollo de métodos que mejoren el suelo y permitan su uso seguro.

Es imperante el estudio y desarrollo de nuevos métodos constructivos en beneficio de la sociedad ecuatoriana. Uno de los principales factores adversos en la construcción es el suelo, el cual para proyectos de obras civiles poseen un deficiente manejo o poco conocimiento técnico (Sánchez, 2014). Demostrando la adecuada aplicabilidad al entorno de estudio, pues se mejorarán las propiedades mecánicas del suelo para evitar las deformaciones excesivas en las estructuras o sus cambios volumétricos en presencia del agua, cubriendo una gama grande de proyectos estructurales, centrándose en construcciones de viviendas residenciales y viales, resolviendo problemáticas económicas y sociales importantes para la población (Juárez, 1995).

1.4 ALCANCE

En el estudio técnico experimental propuesto se realizarán diferentes dosificaciones para la obtención del porcentaje necesario de ceniza volcánica, para que se logre la estabilización en las arcillas expansivas y verificación del comportamiento de las propiedades mecánicas de estas arcillas en interacción con ceniza volcánica, de esta manera reduciendo su índice de expansión al interactuar con medios acuosos (Camacho, Reyes, Mayorga & Méndez, 2016).

Como etapa final del proyecto, se evaluará el costo beneficio de esta nueva técnica respecto a los métodos tradicionales utilizados en el país, como es la estabilización con cal y cemento.

1.5 ORIGEN DE LAS MUESTRAS DEL SUELO

1.5.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

La zona en donde se investigó se ubica en la provincia de Manabí, situada en la parte occidental de nuestro país, limitada al norte por la provincia de Esmeraldas, al sur por las provincias de Guayas, Santa Elena, Santo Domingo y Los Ríos, y al oeste por el Océano Pacífico (INOCAR, 2012).

El sector de extracción y toma de muestra se realizó en diversos cantones de la provincia, indicados en la Figura 1.2 y sus coordenadas en la Tabla 1.1.

TABLA 1.1. UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS NATURALES DE ESTUDIO

Muestra	Latitud	Longitud
1	0°20.378'S	79°45.147'O
2	1°3.387'S	80°39.829'O
3	0°55.608'S	80°28.808'O
4	0°55.029'S	80°25.936'O
5	0°47.752'S	80°15.028'O
6	0°25.677'S	80°26.964'O
7	0°11.387'S	80°15.105'O

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

FIGURA 1.2. UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS POR CANTONES



Fuente: (Gobierno Provincial de Manabí, 2017)

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

1.5.2 GEOLOGÍA DE LA ZONA

La región Costa del Ecuador con las llanuras horizontales, bajas y fértiles de la cuenca del Guayas descansan al Oeste de los Andes, cubiertas con sedimentos

Terciarios y materiales de acarreo fluvial Cuaternario, y, en el Norte se ubica la cuenca Terciaria Esmeraldas-Borbón ligeramente más disectada (Baldock, 1982).

En la zona de estudio, la cuenca Manabí, se localiza al Norte de la región costera del país, que se ha definido como la más grande de las cuencas costeras del Ecuador, prolongándose cerca de 250 Km., en dirección NNE (Baldock, 1982). Se la detalla como una cuenca ante-arco formada por la subducción de la Placa Nazca por debajo de la Placa Sudamericana. Está limitando al Norte con las montañas de Jama y de Cojimíes, además con la Falla de Esmeraldas, al Sur colinda con la Cordillera Chongón Colonche, al Este con la Cordillera de los Andes, y al Oeste con la Cordillera Costera (Acosta, 2015).

1.5.3 GEOMORFOLOGÍA DE LA REGIÓN

A grandes rasgos, la zona de investigación en donde se extrajeron las muestras de suelo, al Este se sitúa la Cuenca de Manabí y al Oeste se integra a la Cordillera Costanera. Básicamente está formada por un basamento de rocas Cretácicas de la Formación Piñón, sobre las que yacen rocas volcano-terrágenas de la Formación Cayo, y clásticas neríticas de las formaciones San Eduardo, Cerro, San Mateo, Tosagua, Charapotó, Daule, Canoa, Tablazo y Depósitos Cuaternarios (Acosta, 2015). En la Figura 1.3., se visualiza el suelo natural característico del cual fue efectuada la investigación.

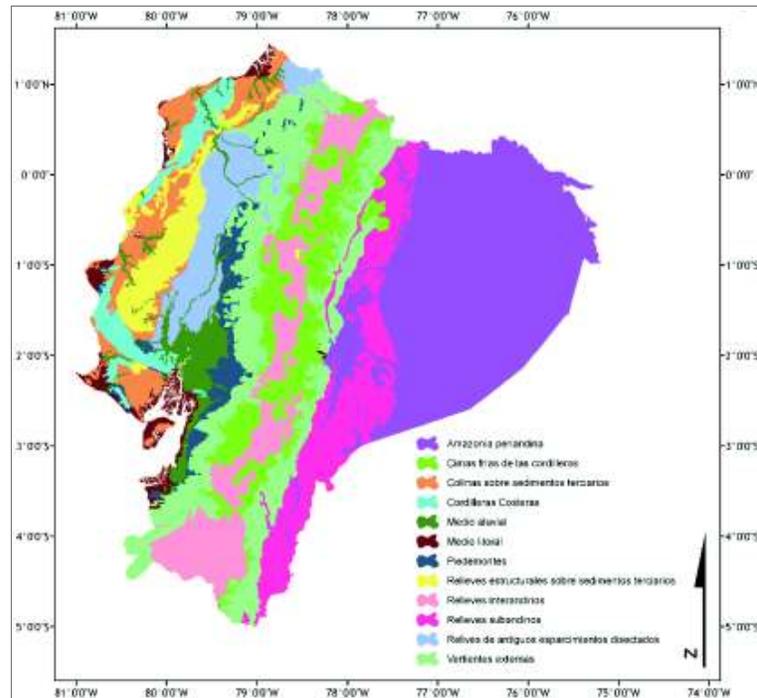
FIGURA 1.3. SUELO CARACTERÍSTICO DEL ESTUDIO



Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

Se exhibe un mapa de la geomorfología del Ecuador en la Figura 1.4., distinguiéndose fácilmente las 3 zonas continentales. Para el caso de Manabí también se muestra en mayor detalle su composición.

FIGURA 1.4. GEOMORFOLOGÍA DEL ECUADOR



Fuente: (León, 2016)

1.5.4 TOPOGRAFÍA DE LA ZONA

La región Costa que está ubicada entre el Océano Pacífico y la Cordillera de los Andes, está caracterizada por sus tierras bajas y elevaciones pequeñas. Las llamadas tierras bajas regularmente tienen alturas por debajo de los 200 m.s.n.m., y la Cordillera de la Costa no supera los 1000 m.s.n.m. El ancho de la faja costanera está entre los 15 y 150 Km, para toda su extensión (INOCAR, 2012).

1.5.5 CLIMATOLOGÍA DE LA ZONA

Entre los diversos climas que posee el país, la zona de interés se emplaza en un clima tropical monzón, el mismo que se distingue de otros por poseer una temperatura media anual poco inferior a los 25°C, alcanzando temperaturas máximas de 38°C y mínimas de 13°C, dependiendo de la época del año. La

humedad relativa ronda por arriba del 80%. Se caracteriza por tener inviernos lluviosos y veranos relativamente secos (INOCAR, 2012).

1.6 RESEÑA DEL VOLCÁN TUNGURAHUA

El volcán Tungurahua se lo define como un estrato-volcán, con forma cónica casi perfecta y una elevación de 5.023 m.s.n.m., localizado en la cordillera Real de los Andes del Ecuador, en las coordenadas 1.467° S, 78.44° W, al sur de la provincia del Tungurahua, en el límite con la provincia de Chimborazo, unos 140 Km. al suroeste de Quito, 33 Km. al sureste de Ambato y 33 Km. al noreste de Riobamba (Aguilera & Dueñas, 2007). A continuación, se muestra en la Figura 1.5 su ubicación.

FIGURA 1.5. UBICACIÓN DEL VOLCÁN TUNGURAHUA ENTRE PROVINCIAS DE TUNGURAHUA Y CHIMBORAZO



Fuente: (Aguilera et al., 2007)

1.6.1 ANTECEDENTES

El volcán Tungurahua está formado por la constitución de tres volcanes sucesivos que son el Tungurahua I, II y III (Hall et al., 1999). Los restos del Tungurahua I y II es posible divisarlos en los flancos norte, este y sur del volcán; estos fueron

parcialmente destruidos por grandes deslizamientos en el pasado. El Tungurahua III es el edificio joven actual, el cual tuvo lugar a su formación después del colapso del Tungurahua II, aproximadamente hace 3100 años. Se conoce que se han producido por lo menos 16 erupciones con flujos piroplásticos y también, 17 flujos de lava (Le Pennec et al., 2005).

La actividad del volcán Tungurahua ha sido monitoreada desde 1999 por el Instituto Geofísico (IG) de la Escuela Politécnica Nacional (EPN). El IG-EPN dispone de un completo Observatorio ubicado en la zona de Guadalupe (a 13 km al norte del cráter del volcán), este observatorio cuenta con los siguientes sistemas de monitoreo: Sísmico (período corto, banda ancha), Deformación (GPS, Inclínómetros electrónicos, EDM), Gases (SO₂, CO₂), Geoquímica (Aguas y Gases), Térmico (Fijo y Travesías), Lahárico y control de dispersión de nubes y caída de ceniza (20 puntos). A partir del 2007, adicionalmente el IG instaló dispositivos de recolección de ceniza (in situ) denominados “cenizómetros”, utilizados para medir con mayor precisión el espesor y la densidad aparente de depósitos de cenizas (< 20 mm). La ubicación de estos recolectores se realizó considerando el régimen dominante de los vientos de la zona del volcán, que controlan la distribución de las nubes de ceniza (Bernard, 2013).

1.6.2 ACTIVIDAD ERUPTIVA ACTUAL

Entre 1999 y 2005, la actividad eruptiva normalmente consistía en periódicas fases recurrentes de baja a moderada explosividad. Las más importantes son las de noviembre-diciembre de 1999, agosto de 2001, septiembre de 2002, septiembre-noviembre de 2003 y de mayo a julio de 2004. Entre estas las fases de la actividad explosiva hubo períodos de inactividad, el más largo es de febrero a diciembre de 2005. En julio de 2006 la actividad sísmica superficial incrementó dramáticamente y culminó con las erupciones del 14 de julio y 16-17 agosto, por primera vez desde el inicio de la actividad eruptiva, el volcán Tungurahua experimentó eventos altamente explosivos (Samaniego et al., 2011).

Una actividad eruptiva, similar a la del período 1999 - 2005 se reanudó en noviembre de 2006, que fue interrumpida por dos fases adicionales, altamente explosivas que se produjeron en febrero de 2008 y mayo de 2010, generando

flujos de depósitos piroclásticos menos voluminosos (Samaniego et al., 2011). A finales de noviembre-diciembre 2011 se registraron nuevamente alta actividad con emisiones continuas de ceniza, esta situación continúa en la actualidad y se intensificó durante febrero-abril y agosto 2012, con fuentes de lava, explosiones y emisiones de ceniza.

1.7 ORIGEN DE LAS MUESTRAS DE CENIZA VOLCÁNICA

1.7.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

La ubicación de la toma de la ceniza para este estudio fue cercano al Observatorio Vulcanológico del Tungurahua (OVT), localizado en el sector de Guadalupe, con coordenadas UTM: 17M - 778651 - 9849744 (IG-EPN, 2017). A continuación, se muestran los lugares de extracción en la Figura 1.6, perteneciente a la quebrada llamada Achupashal y a un corte vial cercano, respectivamente.

FIGURA 1.6. LUGARES DE EXTRACCIÓN DE CENIZA



Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

1.7.2 GEOLOGÍA DE LA ZONA

El Tungurahua I, que es el viejo edificio volcánico fue destruido sobre el basamento metamórfico de la Cordillera Real y está integrado por las grandes superficies inclinadas del flanco Norte (Runtún y Pondoá), así como por lavas de los flancos sur y oriental del volcán. Estas superficies se encuentran seccionadas por los grandes y profundos valles de los ríos Ulba y Vazcún, poseen un espesor de alrededor de 400 m. En su última etapa de construcción estuvo influenciada

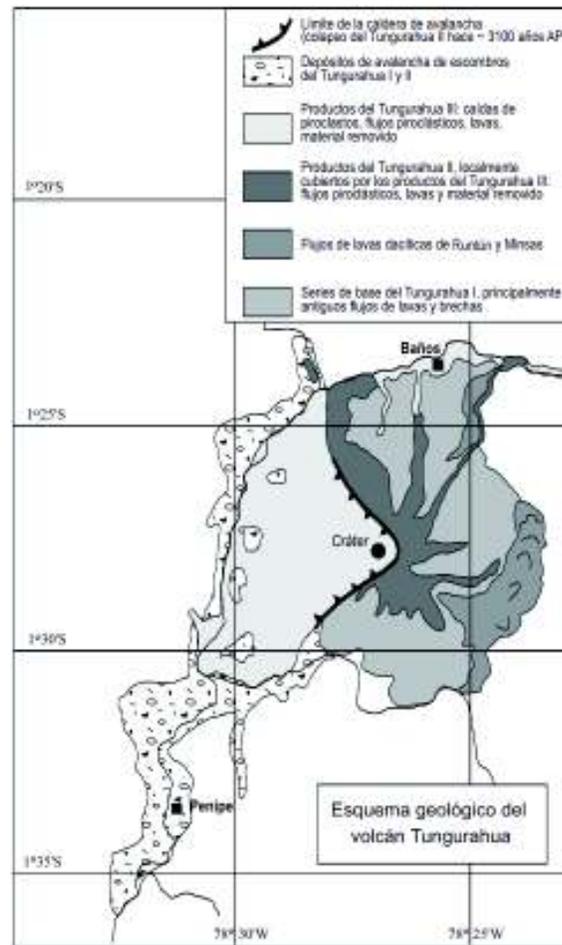
por un importante episodio de vulcanismo ácido (Hall et al., 1999). El Tungurahua I soportó un gran deslizamiento acompañado de una explosión que destruyó parcialmente el edificio posiblemente en el año 30000 a. C. (Le Pennec et al., 2005). Se ha descubierto que la parte basal del Tungurahua I, en la parte inferior del valle de Pastaza fue antiguamente de aproximadamente 2200 m en altura, es decir, casi 400 m más alto que el piso actual (Bustillos, 2010).

Después de sufrir una erosión significativa y una etapa de reposo, se construyó el cono intermedio, llamado Tungurahua II. Está caracterizado por una serie de flujos de lava ubicados en la parte superior del flanco Sur del complejo. La etapa de constitución del edificio se desarrolló entre el 30000 y 3100 años a. C., entonces este edificio sufrió un gran colapso en su flanco Oeste, debido quizás a las pronunciadas pendientes existentes y a la intrusión de magma dacítico en el edificio volcánico (Le Pennec et al., 2005).

El actual edificio, en los últimos 2300 años se lo conoce con el nombre de Tungurahua III. El vigente cono es aproximadamente simétrico con pendientes entre 30° y 35° y ocupa el sector Oeste del edificio Tungurahua II, rellenando la caldera de avalancha de hace 3000 años a. C. Este edificio ha mantenido una actividad eruptiva casi continua, distinguiéndose por la generación de flujos de lava, flujos piroclásticos, flujos de escombros y lahares (Le Pennec et al., 2005, Bustillos 2010).

El Tungurahua III ha sido característico por una frecuente actividad explosiva (Hall et al., 1999), con erupciones generadoras de flujos piroclásticos, de una cada dos siglos (Le Pennec et al., 2006). El volcán atraviesa desde 1999 hasta el momento un periodo de actividad explosiva. Se muestran de forma simplificada la ubicación de los edificios Tungurahua I, II y III en la Figura 1.7.

FIGURA 1.7. GEOLOGÍA SIMPLIFICADA DEL VOLCÁN TUNGURAGUA



Fuente: (IG-EPN & IRD, 2005)

1.7.3 GEOMORFOLOGÍA DE LA REGIÓN

La columna vertebral del país está formada por la Cordillera de los Andes, la cual atraviesa totalmente al territorio nacional de Sur a Norte, siendo particularmente menos ancha que el resto de la cadena montañosa ya que cuenta con apenas 150 km aproximadamente. En altura los Andes llega hasta los 4000 m, sin embargo, en la parte de la Sierra Norte y Central, que están ubicados volcanes cubiertos de nieve llegan alrededor de 6000 m de altura (Baldock, 1982).

La región se encuentra constituida por diversos ambientes microclimáticos, determinados ampliamente por la altitud y las condiciones geomorfológicas locales. El valle interandino aparece dividido en varias cuencas rellenas con

depósitos sedimentarios y piroclásticos Cenozoicos, que fraccionan la Cordillera Real (Oriental) de la Occidental (Baldock, 1982).

La sierra del país, está dividida en dos zonas paralelas, geológicamente diferentes con rumbo NNE. Rocas metamórficas subyacen a la Cordillera Central o Real, mientras que rocas volcánicas y sedimentarias depositadas desde el Cretácico al Paleoceno conforman la masa de la Cordillera Occidental. Es de importancia acotar que las gradientes son extremadamente empinadas, fundamentalmente en el flanco Occidental, en donde las diferencias de altitud de 4000 m acontecen en distancias escasas como de 25 km (Baldock, 1982).

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1. EJE DE ESTUDIO

El estudio de la estabilización de las arcillas expansivas a través de métodos tradicionales y no tradicionales, analizando sus propiedades geotécnicas como límites de consistencia, granulometría, resistencia a la compresión no confinada y potencial de expansión, ha venido evolucionando en el mundo entero con fuerza en las últimas dos décadas por medio de investigadores en su afán de aportar nuevas alternativas cada vez más económicas y seguras para la construcción de obras civiles en general.

Entre los aditivos tradicionales se ha establecido la prevalencia de estudios de la cal y cemento como estabilizantes para este tipo de suelos, comprobando en un extenso número de investigaciones su positiva eficacia. Para los aditivos no tradicionales se ha procurado la búsqueda entre opciones como cenizas volantes, cáscara de arroz, residuos de construcción, cloruro de calcio, polímeros, resina de árbol, entre otros productos innovadores, basado en su disponibilidad en el medio ambiente, hasta pensándose en construcciones ambientalmente sostenibles, que es la vanguardia del siglo XXI.

De acuerdo con los documentos revisados existe una tendencia en los Estados Unidos en comenzar el estudio de nuevos estabilizadores desde la década de los 50s, con el pasar de los años esta tendencia se ha difundido a otros continentes de países como India, Sudáfrica, España, Reino Unido, por sólo citar algunos. Para el caso específico de Sudamérica, existe un gran aporte de Colombia, pues se ha visto que el desarrollo en esta área ha generado interés en diferentes instituciones de investigación.

Para el caso nacional, en Ecuador, se halló que en los últimos años se han desarrollado investigaciones de suelos arcillosos en algunos sectores del país,

principalmente en Manabí, adhiriéndose a la comunidad científica en el encuentro de nuevos aditivos.

2.2. DOCUMENTOS REVISADOS

El presente estudio contiene 22 artículos de revistas especializadas y 7 tesis, las cuales han sido consideradas como relevante y afín a la línea de investigación. Esta revisión será ordenada cronológicamente en la Tabla 2.1, en donde se exponen los artículos y tesis estudiados, según su país y nombre de revista.

TABLA 2.1. REVISIÓN DE DOCUMENTOS REVISTAS Y TESIS

REVISTAS			
Autor	País	Título	Revista
Jamsawang, P., Nuttapon, N., Voottipruex, P., Sonngpiriyakij, S. & Jongpradist, P. (2017)	Tailandia	Laboratory investigations on the swelling behavior of composite expansive clays stabilized with shallow and deep clay-cement mixing methods.	Applied Clay Science
Ortiz, E., Ortiz, E., Macías, L. & Panchana, R. (2017)	Ecuador	Behavior of Clayey Soil Existing in the Portoviejo Canton and Its Neutralization Characteristics	IRJEIS
Darikandeh, F. (2017)	India	Expansive soil stabilised by calcium carbide residue-fly ash columns.	Institution of Civil Engineers
Mustafa, D., Bora, C. & Soonkie, N. (2017)	EEUU	Stabilization of expansive Belle Fourche shale clay with different chemical additives.	Applied Clay Science
Seyed, M. (2017)	Malasia	Stabilization of compacted clay with cement and/or lime containing peat ash.	Road Materials and Pavement Design
Estabragh, A., Rafatjo, H. & Javadi, A. (2014)	Irán/Reino Unido	Treatment of an expansive soil by mechanical and chemical techniques.	Geosynthetics International
Higuera, C., Gomez, J. & Pardo, O. (2012)	Colombia	Caracterización de un suelo arcilloso tratado con Hidróxido de calcio.	Revista Facultad de Ingeniería
Pedarla, A., Chittoori, S. & Puppala, A. (2011)	EEUU	Influence of Mineralogy and Plasticity Index on the Stabilization Effectiveness of Expansive Clays.	Transportation Research Record
Rondón, H., Vargas, E. & Moreno, L.	Colombia	Evaluación de la temperatura como método de estabilización de arcillas.	Studiositas
Ene, E. & Okagbue, C. (2009)	Nigeria	Some basic geotechnical properties of expansive soil modified using pyroclastic dust.	Engineering Geology
Brooks, R. (2009)	EEUU	Soil stabilization with flyash and rice husk ash.	International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences
Rao, M., Rao, S. & Babu, D. (2008)	India	Efficacy of lime-stabilised fly ash in expansive soils.	Institution of Civil Engineers
Ramana, V. & Hari, P. (2006)	India	Stabilisation of expansive clay bed using calcium chloride solution.	Institution of Civil Engineers
Camacho, J., Reyes, O., Mayorga, C. & Méndez, D. (2006)	Colombia	Evaluación de aditivos usados en el tratamiento de arcillas expansivas.	Ciencia e Ingeniería Neogranadina

TABLA 2.1. CONTINUACIÓN

Al-Rawas, A., Hago, A. & Al-Sarmi, H. (2005)	Omán	Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman.	Building and Environment
Tigle, J. & Santoni, R. (2003)	EEUU	Stabilization of Clay Soils with Nontraditional Additives.	Transportation Research Record
Rao, S & Thyagaraj, T. (2003)	India	Lime slurry stabilisation of an expansive soil	Institution of Civil Engineers
Bell, F. & Jermy, C. (1994)	Sudr�frica	Building on Clay Soils which Undergo Volume Changes.	Architectural Science Review
Petry, T. & Armstrong, C. (1989)	EEUU	Stabilization of Expansive Clay Soils.	Transportation Research Record
Nieto, J. & Valverde, J. (1986)	Ecuador	Algunas propiedades de las arcillas expansivas en Manabí.	Revista Pol�cnica
Holtz, W. G. (1959)	EEUU	Expansive clays-properties and problems.	Quarterly of the Colorado School of Mines
Holtz, W. G. & Gibbs, H. J. (1956)	EEUU	Engineering properties of expansive clays.	ASCE Transactions
TESIS			
Autor	País	Título	Institución
Ayala, G. (2017)	Ecuador	Estabilización y control y suelos expansivos utilizando polímeros.	Universidad de Especialidad Espíritu Santo
Bauzá, J. (2015)	España	El tratamiento de los suelos arcilloso con cal. Comportamiento mecánico y evolución a largo plazo ante cambios de humedad.	Universidad de Sevilla
Sánchez, A. (2014)	Ecuador	Estabilización de suelos expansivos con cal y cemento en el sector Cacical del cantón Tosagua provincia de Manabí	Pontificia Universidad Católica del Ecuador
Mora, G. (2013)	España	Estudio de problemas geotécnicos asociados a la presencia de arcillas expansivas en la carretera Rocafuerte-Tosagua, provincia de Manabí-Ecuador. Análisis de posibles tratamientos de mejora del terreno y recomendaciones constructivas	Universidad Nacional de Educación a Distancia
Valle, W. (2010)	España	Estabilización de suelos arcillosos plásticos con mineralizadores en ambientes sulfatados y yesíferos	Universidad Pol�cnica de Madrid
Nieto, J. & Parra, P. (1985)	Ecuador	Las arcillas expansivas: sus propiedades y estabilización	Escuela Pol�cnica Nacional
Castro, M. (1992)	Perú	Suelos expansivos en Talara	Universidad Nacional de Ingeniería

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

En la Tabla 2.2 se efectúa la descripción y los resultados obtenidos en cada caso de estudio, para generar una visión general de lo que se ha producido hasta la actualidad en la línea de investigación considerada. De esta manera se ha podido entender las variables de mayor influencia en la estabilización de suelos expansivos.

TABLA 2.2. DESCRIPCIÓN Y RESULTADOS DE REVISTAS Y TESIS

REVISTAS		
Autor	Descripción	Resultados
Jamsawang, P., Nuttapong, N., Vootipruex, P., Sonngpiriyakij, S. & Jongpradist, P. (2017)	Durante la investigación se observó las características de hinchamiento de arcillas expansivas estabilizadas mediante método de mezcla de cemento superficial y profundo con pruebas de expansión libre. Las mezclas de bentonita y caolín se usaron como arcillas base para crear altos, medios y bajos grados de potencial de hinchamiento de las arcillas expansivas.	Se demostró que las mejoras en relación de volumen afectan el comportamiento general de hinchamiento de las arcillas expansivas compuestas. Además, muestran que los potenciales de hinchamiento máximos de las arcillas compuestas son una función de las intensidades de reflexión del silicato de calcio hidrato y montmorillonita después de la estabilización.
Ortiz, E., Ortiz, E., Macías, L. & Panchana, R. (2017)	Se efectuó una investigación sobre caracterización y comportamiento del suelo expansivo en el cantón de Portoviejo, provincia de Manabí, extrayendo muestras de pozos y al aire libre para los posteriores ensayos de laboratorio. El fin del estudio trataba de estabilizar las arcillas para reducir las deformaciones y daños causados al pavimento superficial y estructural.	Se demostró que los suelos tienen propiedades expansivas de diferentes características, de mediano a alto grado de expansión. Al implementar la cal entre el 3 y 6%, se tuvo una reducción por contracción al cambio volumétrico entre 8 y 13%, permitiendo mejorar sus propiedades físicas y mecánicas; así como su aumento a la capacidad de carga por el método de prueba California Bearing Ratio (CBR) del 9 al 16%.
Darikandeh, F. (2017)	En este estudio se informa los resultados de las pruebas de laboratorio de consolidación realizadas en suelo expansivo estabilizado por columnas de cenizas volantes residuales de carburo de calcio (CCR-FA) con diferentes porcentajes de residuos de carburo de calcio (CCR) y cenizas volantes (FA), en siete columnas de diferentes orientaciones y diámetros en la muestra.	Los estudios a escala de laboratorio han demostrado que CCR es un estabilizador eficaz del suelo en aplicaciones geotécnicas y de pavimento. Sin embargo, los estudios sobre la posibilidad de utilizar CCR-FA para modificar las propiedades del suelo son limitados. Se observó una reducción significativa en el potencial de hinchamiento y la presión de hinchamiento, 62% (CCR:FA = 20:80) y 68% (CCR:FA = 20:80), respectivamente.
Mustafa, D., Bora, C. & Soonkie, N. (2017)	En este estudio, la arcilla expansiva Belle Fourche (B) de Dakota del Sur se mezcló con la clase C de cenizas volantes (FC), clase F de cenizas volantes (FF) y cal. Se realizaron pruebas de presión de hinchamiento (SWP) y de resistencia a la compresión no confinada (UCS) en muestras que se curaron en diferentes períodos (0, 7 y 28 días). Las mezclas de cenizas volantes se prepararon con 10%, 20% y 30% de ceniza volante en peso y el contenido de cal en mezclas varió entre 4%, 8% y 12% en peso.	Los resultados mostraron que el SWP de la arcilla Belle Fourche (B) disminuyó significativamente con la adición de cal 4% en peso seco del suelo desde 235 kPa hasta casi 0 kPa. La mezcla de cenizas volantes también redujo el SWP a 47 kPa y 100 kPa con las cenizas volantes clase C y clase F, respectivamente. En términos de fuerza, el tratamiento químico aumentó la UCS. Se observó que las mezclas con un límite líquido más alto y un índice de plasticidad (IP) tendían a tener mayor SWP y menor UCS.
Seyed, M. (2017)	Un nuevo enfoque para estabilizar la arcilla es usar turba como material suplementario en el suelo compactado y estabilizado. Vale la pena señalar investigaciones sobre la aplicación de turba como material puzolánico en la estabilización de arcilla blanda es relativamente escasa.	Se encontró que, el diseño óptimo de la mezcla del suelo estabilizado es 14% de cemento, 12% de turba y 5% de arena de sílice. El análisis SEM (Scanning Electron Microscope) sugiere que los productos cementosos se incrementaron con las dosis de cemento y turba y obstruyeron los espacios porosos. Se observó que para los porcentajes citados en la mezcla se puede aplicar de manera sostenible para estabilizar la arcilla sin fallas.
Estabragh, A., Rafatjo, H. & Javadi, A. (2014)	En el estudio se hizo una comparación entre cal, cemento y fibra (polietileno y polipropileno) con diferentes formas, longitudes y porcentajes. se hizo una comparación entre las técnicas de estabilización mecánica y química para mejorar el comportamiento expansivo, investigándose estos materiales en el control del potencial de hinchamiento y la presión de hinchamiento.	Las fibras reducen el comportamiento de hinchamiento del suelo expansivo y la cantidad de reducción depende de la forma, la longitud y el porcentaje de fibra en el suelo, lo mismo ocurrió con la cal y cemento, que su efectividad es dependiente de los porcentajes aplicados y el tiempo de curado. El cemento resultó ser más efectivo para reducir el potencial de hinchamiento que la cal. Resultados de las dosificaciones que van del 5-8% de cal y 5% de cemento, producen efectos similares a agregar 1.5% en fibras al suelo.

TABLA 2.2. CONTINUACIÓN

<p>Higuera, C., Gomez, J. & Pardo, O. (2012)</p>	<p>Se utilizó hidróxido de calcio como estabilizante a un suelo expansivo para mejorar sus características mecánicas, químicas y físicas, a través de diferentes ensayos para cuantificar la afectación del aditivo, como son: la humedad, granulometría, peso específico, límites de consistencia, compactación, California Bearing Ratio (CBR) y compresión simple.</p>	<p>Después de utilizarse diferentes proporciones de aditivo con una fluctuación del 2% al 12% en peso, se determinó que el incremento del 4% de aditivo es el más óptimo ya que modifica las características físicas, mecánicas y químicas como es el decremento del límite líquido y el incremento de del límite plástico por consiguiente la reducción del índice de plasticidad lo que demuestra que los iones de calcio se encargan de atraer el agua y disminuyen su potencial de hinchamiento así también el suelo adquiere mayor resistencia frente a la saturación del suelo.</p>
<p>Pedarla, A., Chittoori, S. & Puppala, A. (2011)</p>	<p>Se realizó un estudio mediante la utilización de seis suelos naturales y dos estabilizantes químicos, incluyendo cal viva y aditivos de cemento tipo V. El diseño del estabilizador basado en el índice de plasticidad (IP) es un método ampliamente aceptado, sin embargo, algunos suelos tratados mediante este procedimiento han presentado fallas prematuras. La mineralogía de arcilla desempeña un papel importante en su estabilización por lo que se estudió para la durabilidad a largo plazo al exponer estos suelos a los ciclos de humectación y secado y para medir tanto el cambio de volumen como la resistencia a la compresión durante y en determinados ciclos de humectación y secado.</p>	<p>Se logró proponer un esquema de diseño de estabilización en donde se incluye al porcentaje de la montmorillonita mineral de arcilla y a su índice de plasticidad, sugiriendo dosificaciones óptimas de cal viva y cemento desde valores del 8% y 6%, respectivamente. Confirmando que según los estudios adicionales de durabilidad mostraron que los suelos con mayor contenido de montmorillonita podrían estabilizarse de manera efectiva con mayores dosis de aditivos de cal y cemento.</p>
<p>Rondón, H., Vargas, E. & Moreno, L. (2010)</p>	<p>Se presentan los resultados experimentales de ensayar arcillas, con el fin de evaluar la influencia de la temperatura en sus propiedades índices y mecánicas, y el potencial de expansión. Se investigó si la aplicación de temperatura puede ser utilizada como mecanismo de estabilización de arcillas.</p>	<p>En la primera fase, el suelo fue sometido a tres temperaturas (150, 225 y 300°C) y tiempos de exposición diferentes (1, 7 y 15 días) para evaluar el cambio que experimentan en sus índices de consistencia, resistencia a la compresión no confinada y potencial de expansión. Los resultados muestran que el potencial de expansión de las arcillas disminuye y la resistencia a la compresión simple aumenta cuando se eleva la temperatura entre 150 y 300 °C.</p>
<p>Ene, E. & Okagbue, C. (2009)</p>	<p>Se determinó la influencia del polvo de roca piroclástica sobre las propiedades geotécnicas en suelos expansivos estudiados.</p>	<p>El comportamiento de la arcilla resulta favorable cuando se aplica la mezcla de polvo de roca piroclástica, pues se redujo los espacios vacíos y se aumentó el tamaño de las partículas debido a la presencia de puzolana. Se mejoraron propiedades como la densidad seca máxima, el contenido de agua óptimo y la resistencia al corte, además, el ensayo California Bearing Ratio (CBR) obtuvo un valor óptimo con la adición del 8% del polvo como aditivo.</p>
<p>Brooks, R. (2009)</p>	<p>Se utilizó la ceniza de cáscara de arroz y cenizas volantes como aditivo para la estabilización del suelo, los cuales son materiales de desecho de diferentes industrias. Se realizaron las siguientes pruebas de laboratorio para la caracterización: SUCS, compactación, CBR, consolidación y el estudio del potencial de la mezcla con ceniza volante en la reducción de la hinchazón del suelo.</p>	<p>Frente a la utilización de diferentes porcentajes de contenido de cáscaras de arroz y cenizas volantes, se recomienda un contenido de ceniza de cáscara de arroz del 12% y un contenido de ceniza volante del 25% para fortalecer el suelo expansivo de la subrasante en obras viales, a la vez también se recomienda un contenido de ceniza volante del 15% para mezclar en la ceniza de cáscara de arroz para formar una capa de reducción de hinchamiento debido a su rendimiento satisfactorio en las pruebas de laboratorio.</p>

TABLA 2.2. CONTINUACIÓN

Rao, M., Rao, S. & Babu, D. (2008)	Técnicas de estabilización como cojines de arena (sand cushions) y cojines de suelo cohesivo no expansivo (CNS) han sido puesto a prueba en el laboratorio sin éxito relevante para ambos casos. Se propuso el uso de cojines de cenizas volantes con cal para determinar su efectividad para detener los cambios de volumen en suelos expansivos.	Los cojines de cenizas volantes con 10% de cal como aditivo han dado como resultado una reducción del movimiento en un 69%. Solo se debe agregar un 10% de cal al cojín de cenizas volantes, ya que una adición adicional resultaría desfavorable en su resistencia. El cojín de cenizas volantes no sufre los inconvenientes asociados con el cojín de arena y el cojín CNS.
Ramana, V. & Hari, P. (2006)	En la búsqueda de nuevos aditivos, los investigadores han creído que los electrolitos fuertes como el cloruro de potasio, cloruro de magnesio, cloruro de cinc, hidróxido de sodio, cloruro férrico y cloruro de calcio (CaCl ₂) podrían probarse en lugar de cal como estabilizante de suelo.	El límite líquido disminuyó casi un 41%, y el potencial de hinchamiento y la presión de hinchamiento en un 90% y un 51% respectivamente después del tratamiento con 1% de CaCl ₂ . Se atribuyen estas modificaciones a la reducción de las fuerzas de repulsión entre las partículas de arcilla debido a la adsorción de iones de calcio y la posterior disminución del espesor de la doble capa.
Camacho, J., Reyes, O., Mayorga, C. & Méndez, D. (2006)	En arcillas altamente expansivas (bentonita), se utilizaron tres aditivos (cal, cenizas volantes y aceite sulfonado) con el fin de determinar las ventajas técnicas de estabilización de suelos de cada alternativa bajo las mismas condiciones y ensayos.	La ceniza volante funcionó como aditivo inhibidor de las propiedades expansivas del material, pero a diferencia de la cal, este requiere ser adicionado en porcentajes excesivos, por lo menos para una arcilla tan expansiva como la bentonita, disminuyendo la viabilidad como alternativa de tratamiento. En el caso del aceite sulfonado no existe una metodología adecuada de laboratorio que permita conocer la reacción de dicho aditivo.
Al-Rawas, A., Hago, A. & Al-Sami, H. (2005)	Adición de cal, cemento y Sarooj (puzolana artificial) en diferentes porcentajes a un suelo expansivo para su estabilización. El suelo fue mezclado con cal y Sarooj al 3%, 6% y 9% en peso seco del suelo, manteniendo un porcentaje fijo del 3 al 5% de cal.	El uso de cal mostró resultados superiores en comparación con los otros estabilizadores. El mejor resultado se halló con la adición de un 6% de cal, tanto el porcentaje de hinchamiento como la presión de hinchazón se redujeron a cero.
Tigle, J. & Santoni, R. (2003)	En esta investigación se realizó la adición de estabilizadores químicos o líquidos no tradicionales para evaluar la estabilización de suelos arcillosos de baja y alta plasticidad. Entre los aditivos estabilizadores no tradicionales se evaluaron doce, que incluyen un ácido, enzimas, un lignosulfonato, una emulsión de petróleo, polímeros y una resina de árbol. Como parámetro de comparación se usaron aditivos tradicionales como cal, cemento portland tipo I y cal hidratada.	Al finalizar los ensayos en muestras húmedas y secas, se determinó su contenido de humedad, densidad seca máxima, concluyéndose que el lignosulfato, la emulsión de petróleo y los métodos tradicionales proporcionaron excelente impermeabilización. Se recomiendan categorías de productos específicos para estabilizar suelos arcillosos de baja y alta plasticidad, puesto que se observó que el cemento y la cal fueron efectivos en la estabilización de la arcilla de baja plasticidad bajo condiciones de pruebas húmedas, pero la cal fue relativamente inefectiva en la estabilización de la arcilla de alta plasticidad en base a los criterios de mejora de la resistencia.
Rao, S & Thyagaraj, T. (2003)	Este artículo informa los resultados de un estudio de laboratorio sobre la estabilización química in situ de un suelo expansivo, analizando la eficacia de la lechada de cal en la estabilización química del suelo expansivo disecado mediante la comparación de las propiedades físico-químicas y las propiedades de ingeniería del suelo tratado.	Los resultados experimentales indicaron que la migración de la suspensión de cal a través del suelo disecado promovió una fuerte modificación de la cal y reacciones puzolánicas en la masa del suelo. Se infiere que es preferible estabilizar químicamente los depósitos del suelo durante la estación seca.

TABLA 2.2. CONTINUACIÓN

Bell, F. & Jermy, C. (1994)	El estudio se centra en la exposición de diferentes métodos para predecir el comportamiento de suelos con cambios de volumen. Detallando métodos empíricos, de edómetro y de succión de suelo. El primero hace uso de ensayos de laboratorio para obtener sus propiedades básicas tales como relación de vacío, contenido de humedad natural, límite de líquido, índice de plasticidad y actividad.	Se concluye que se pueden usar varios tipos diferentes de cimientos dependiendo de la severidad de los cambios de volumen que puedan ocurrir. Se registró evidencia de arcillas moderadamente expansivas con un potencial más pequeño para hincharse pero con permeabilidades más altas que las arcillas que tienen un mayor potencial de hinchamiento, pudiendo hincharse más durante una sola estación húmeda que las arcillas más expansivas.
Petry, T. & Armstrong, C. (1989)	Análisis de fenómenos asociados a la inestabilidad de suelos, patrones de comportamiento de afectación y métodos de estabilización como físicos, mecánicos y químicos. Se mostró la importancia de los diferentes fenómenos que afectan la estabilización de suelos expansivos, como el clima, los cambios generados por la variación de propiedades debido a fenómenos externos, entre otros.	Se recomienda, desde el punto de vista económico y operacional, la estabilización de los suelos expansivos. Es posible realizarla de forma más económica y completa al inicio de la obra, en lugar de cuando se necesiten reparaciones. Suelos inestables y expansivos no deben ser aceptados para el uso sin que se realice sus correspondientes adecuaciones.
Nieto, J. & Valverde, J. (1986)	El estudio analiza el desarrollo de las presiones laterales de hinchamiento en función del tiempo, presión vertical, humedad inicial y densidad inicial de arcillas potencialmente expansivas ya identificadas de la provincia de Manabí. Se dan los primeros pasos de estabilizar este tipo de suelos expansivos con aceite mineral de desecho de vehículos.	Se establecieron correlaciones entre la presión vertical, el hinchamiento, la presión lateral y el contenido de humedad con el propósito de predecir el porcentaje de expansión. En la estabilización, se tuvo resultados satisfactorios para la atenuación de la expansión y la reducción de la presión de hinchamiento, sin embargo, las propiedades mecánicas se vieron afectadas. Se sugiere continuar con investigaciones para este tipo de suelo.
Holtz, W. G. (1959)	El apartado realiza la caracterización de suelos expansivos acumulados desde 1953 localizados en el occidente de Estados Unidos, Golfo de México, en los bordes de Canada y en Nebraska, mediante ensayos de laboratorio y a su vez, genera una de las primeras experiencias de diseño para la construcción de obras civiles con este tipo de suelo.	La caracterización de masas de suelo a través de ensayos como cambio de volumen, resistencia, hinchamiento, entre otros ensayos, han permitido desarrollar diferentes métodos para controlar la variación volumétrica. El hinchamiento en arcillas fue de más del 11% por lo que se las ha clasificado de baja, media y alta expansión debido al incremento de sus propiedades físicas por acción de diversos fenómenos.
Holtz, W. G. & Gibbs, H. J. (1956)	El documento presenta investigaciones en muestras de arcillas expansivas y el procedimiento de identificación diferentes sectores en el oeste de Estados Unidos, la descripción de ensayos de laboratorio, su caracterización y problemas causados en edificios de ingeniería hidráulica y obra estructural, tomándose como directriz para posteriores trabajos.	Se exponen las propiedades que poseen los suelos arcillosos mediante pruebas de laboratorio, como difracción de rayos X, índice de plasticidad, límite de contracción, potencial de hinchamiento y expansión. Las muestras de suelo presentan un hinchamiento mayor al 50%, con una saturación del 91% al 100% en su estado natural baja resistencia e índice de plasticidad.
TESIS		
Autor	Descripción	Resultados
Ayala, G. (2017)	En la ciudad de Guayaquil se caracterizaron varias muestras de suelo expansivo mediante diferentes ensayos de laboratorio, además de determinar la cantidad óptima de polímero que debe introducirse en la masa de suelo para su estabilización.	La caracterización de arcillas expansivas se realizó mediante ensayos como son granulometría, humedad natural, límites de Atterberg, compactación, humedad óptima y potencial de expansión. Se determina que el polímero debe introducirse en un 1.5% de la masa de suelo con un control de volumen del 91.5% y reducción de presión de expansión en un 94.1%. La implementación tiene un costo de 20.46 \$/m³.

TABLA 2.2. CONTINUACIÓN

Bauzá, J. (2015)	Se han analizado más de 300 probetas de un suelo arcilloso de tipo montmorillonítico expansivo de una obra real, donde se ha comparado las propiedades tanto del suelo sin tratar como con adiciones de un 2 y 3% de cal viva para su tratamiento de estabilización.	Resultados en base al análisis granulométrico por tamizado y sedimentación, la determinación del pH, plasticidad, ensayos de compactación próctor, densidad de las partículas del suelo, hinchamiento y colapso, composición química, resistencia al corte y deformabilidad por consolidación en edómetro, confirman la eficacia del tratamiento para la mejora del suelo.
Sánchez, A. (2014)	La investigación se basa en el comportamiento de la estabilización con cal y cemento, las propiedades físicas y mecánicas del suelo del cantón Tosagua, provincia de Manabí, el cual es característico por ser arcillas altamente plásticas, con un potencial expansivo alto.	Por medio de la difracción de rayos X se corrobora la presencia de 10% de Montmorillonita y 10% de Vermiculita, concordando con los datos de actividad del material y justificando su expansividad por presencia de estos minerales. La dosificación varió entre el 3.5 y 7% dependiendo del aditivo aplicado en el suelo, acotando que las arcillas tuvieron un comportamiento estabilizante.
Mora, G. (2013)	El trabajo se basa en el estudio e investigación de muestras alteradas de material expansivo (arcilla) obtenidas en el tramo de la vía Rocafuerte-Tosagua ubicado en Manabí y los métodos más usados de estabilización como es la cal y cemento para la implementación de métodos constructivos favorables para el Ecuador.	Las arcillas se caracterizaron mediante ensayos de laboratorio, cambiando así la masa de suelo después de la aplicación del aditivo. El estabilizante (cal o cemento) debe ser agregado en un 1.5% de la arcilla, que reduce el límite líquido y por consiguiente el índice de plasticidad con el 91.5% de control de la expansión, así también muestran un bajo costo en el mercado. La aplicación de cal es método económico y más útil.
Valle, W. (2010)	Se realiza un análisis con cuatro métodos diferentes de estabilización realizados en la universidad de Arlington en Texas, en muestras de suelo en presencia de sulfatos solubles y yesos. A su vez, se muestran diferentes técnicas como también recomendaciones generadas en España.	La aplicación de estabilizantes como cenizas volantes bajas en calcio, el cemento sulfato resistente tipo V, las escorias granuladas de alto horno y cal mezclada con fibras fibriladas de polipropileno, presentan un aumento en la resistencia y disminución de hinchamiento en las muestras de suelo, siendo los menos favorables por tiempo de curado las cenizas volantes y con resistencias del 58 al 100% mientras que los otros elementos sobrepasan el 300%.
Nieto, J. & Parra, P. (1985)	En la investigación se presentan los problemas de las arcillas expansivas, precisamente en el control de su expansión y asentamiento. La zona de estudio es la Provincia de Manabí, en donde se ha tenido registros de comportamientos desfavorables para la construcción de obras civiles. En el país, es uno de los primeros trabajos de caracterización de arcilla en la zona mencionada y un intento de estabilización alternativa.	El estudio fue efectuado con muestras de arcilla joven en proceso de transformación cristalina, por esta razón no fue posible obtener información cuantitativa exacta de los minerales constitutivos. Se clasificó al suelo en el rango de alta plasticidad y de muy alto grado de expansión. Respecto a la estabilización, se señala que se optó por aceite quemado obteniendo resultados preliminares relativamente buenos.
Castro, M. (1992)	La presente investigación caracteriza muestras de arcillas expansivas alteradas e inalteradas obtenidas en la zona norte del Perú y los factores que afectan su potencial de hinchamiento, como también su cambio volumétrico, además de los problemas que se generan en las construcciones.	Los ensayos de laboratorio arrojaron resultados como expansión libre, con fluctuaciones entre el 5 y el 64%, expansión entre el 5.3 y el 1.3% con cargas de 1.5 y 2 Kg/cm ² respectivamente, para consolidación se llega hasta el 3.11 Kg/cm ² lo que muestra que son suelos poco favorables y no permite dar una solución única debido a los diferentes factores influyentes en las localidades donde se presentan este tipo de suelo.

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

Es visible el gran volumen de producción científica de los Estados Unidos como punto de inicio para los posteriores estudios en el mundo, como se muestra en la Tabla 2.3, siguiéndole India en calidad y cantidad, lo cual no resulta extraño ya que estos países han apostado a la producción intelectual en la construcción, siendo la piedra angular sus universidades y científicos.

TABLA 2.3. CATEGORIZACIÓN POR PAÍSES DE REVISTAS Y TESIS

Países	Número
Colombia	3
Ecuador	5
España	3
Estados Unidos	7
India	4
Irán	1
Malasia	1
Nigeria	1
Omán	1
Perú	1
Reino Unido	1
Sudáfrica	1
Tailandia	1

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

Entre las revistas revisadas ha resaltado la Applied Cly Sciencem, Institution of Civil Engineers y Transportation Research Record, que son capaces de establecer los parámetros y resultados de los casos de estudio innovadores, tanto por su alcance, afinidad de línea investigativa y credibilidad. Esto se presenta en la Tabla 2.4.

TABLA 2.4. CONCENTRACIÓN DE ESTUDIO POR REVISTA E INSTITUCIÓN

Revista	Número
Architectural Science Review	1
ASCE Transactions	1
Applied Cly Science	2
Building and Environment	1
Ciencia e Ingeniería Neogranadina	1
Engineering Geology	1
Geosynthetics International	1
Institution of Civil Engineers	4

International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences	1
International Research Journal of Engineering, IT & Scientific Research	1
Revista Facultad de Ingeniería	1
Revista Politécnica	1
Road Materials and Pavement Design	1
Studiositas	1
Transportation Research Record	3
Quarterly of the Colorado School of Mines	1
Institución	Número
Escuela Politécnica Nacional	1
Pontificia Universidad Católica del Ecuador	1
Universidad de Especialidad Espíritu Santo	1
Universidad de Sevilla	1
Universidad Nacional de Ingeniería	1
Universidad Nacional de Educación a Distancia	1
Universidad Politécnica de Madrid	1

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

2.3. HALLAZGOS

Se realizó una primera aproximación sobre las propiedades ingenieriles de las arcillas expansivas y sus problemas asociados en la construcción (Holtz, W. G. & Gibbs, H. J. 1956), siendo los principales el agrietamiento, afectación al drenaje, la incertidumbre de la carga admisible, los cambios de volumen del suelo, etc. En Manabí, (Nieto, J. & Valverde, J. 1986) realizaron estudios de caracterización de arcillas expansivas, además de que se realizaron los primeros pasos en un intento de estabilizarla con aceite mineral de desecho de vehículos en el país.

Otros estudios ya más actuales igualmente analizan materiales no utilizados antes, como enzimas, resinas y otros (Tigle, J. & Santoni, R. 2003), que encontraron la estabilización de arcillas con dosificaciones eficientes, siendo económicamente relevantes para el uso en la construcción civil y abriendo posibilidades para nuevas investigaciones.

En el aspecto constructivo, los artículos (Bell, F. & Jermy, C. 1994) y (Petry, T. & Armstrong, C. 1989), demostraron que es posible la estabilización de forma más económica y completa al inicio de la obra, en lugar de intervenir cuando se necesiten reparaciones.

Se encuentran materiales innovadores como la cáscara de arroz (Brooks, R. 2009), ceniza volantes o residuales (Rao, M., Rao, S. & Babu, D. 2008) y (Darikandeh, F. 2017), que lograron aportar al suelo propiedades físico-mecánicas mejoradas permanentes, aunque de momento se desconozca su beneficio económico.

En la región, para Sudamérica existen propuestas como (Higuera, C., Gomez, J. & Pardo, O. 2012) que trabajó con hidróxido de calcio con 4% en peso mejorando su comportamiento de expansión, (Rondón, H., Vargas, E. & Moreno, L. 2010) que estabilizó el suelo en base a cambios de temperatura entre 150 y 300°C y (Camacho, J., Reyes, O., Mayorga, C. & Méndez, D. 2006) se evaluó materiales como cal, cenizas volantes y aceite sulfonado, descubriendo que las cenizas volantes funcionan como aditivo inhibidor de las propiedades expansivas, sin embargo, todas estas a nivel de laboratorio.

En la actualidad, en la zona de interés de la presente investigación, (Sánchez, M. 2014) propone resultados positivos en su estudio con aditivos tradicionales como cal y cemento, (Ortiz, E., Ortiz, E., Macías, L. & Panchana, R. 2017), realizaron en Portoviejo la descripción de la caracterización y comportamiento del suelo, demostrándose que el suelo posee diferentes características expansivas según su tipo, obteniendo la estabilización en un rango de 3 a 6% de mezcla de suelo y cal.

El conjunto de variables analizadas se encuentra cuantificada en la Tabla 2.5, según la institución o revista de origen, siendo valorizadas el número de veces las variables.

TABLA 2.5. CATEGORIZACIÓN POR VARIABLES

Institución - Revista	Estabilizadores		Estudio de impacto en la construcción
	Tradicionales	No tradicionales	
Architectural Science Review			1
ASCE Transactions	1		1
Applied Clay Science	2	1	
Building and Environment	1	1	
Ciencia e Ingeniería Neogranadina	1	1	
Engineering Geology		1	
Geosynthetics International	1		1
Institution of Civil Engineers	2	3	

TABLA 2.5. CONTINUACIÓN

International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences		1	
International Research Journal of Engineering, IT & Scientific Research	1		
Revista Facultad de Ingeniería		1	
Revista Politécnica	1	1	1
Road Materials and Pavement Design	1	1	
Studiositas		1	
Transportation Research Record	1	1	1
Quarterly of the Colorado School of Mines	1		1
Escuela Politécnica Nacional	1	1	1
Pontificia Universidad Católica del Ecuador	1		1
Universidad de Especialidad Espíritu Santo		1	
Universidad de Sevilla	1		1
Universidad Nacional de Ingeniería	1		1
Universidad Nacional de Educación a Distancia			
Universidad Politécnica de Madrid		1	1

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

CAPÍTULO 3

MARCO TEÓRICO

3.1. ARCILLAS EXPANSIVAS

Los elementos arcillosos se distinguen entre otros grandes grupos muy usuales como los rocosos, suelos limosos o granulares por su comportamiento y características que los hacen objetivo de estudio para su mejoramiento (Juárez & Rico, 2005).

Este apartado revisa los conceptos y principios básicos para el desarrollo del tema, de esta forma entender de mejor manera su comportamiento, propiedades y características. Es necesario mencionar que no se desarrollará una teoría completa, apenas se busca presentar bases para la comprensión de la solución planteada inicialmente para suelos expansivos.

3.1.1. PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

Las características principales de un suelo arcilloso visto de forma macroscópica a partir de su composición y estructura son: diferente comportamiento de acuerdo al contenido de humedad que posea, la variación de volumen que ésta pueda tener, baja capacidad portante, baja permeabilidad y la compresibilidad que dependerá del tiempo en el que se aplique la carga (Bauzá, 2015).

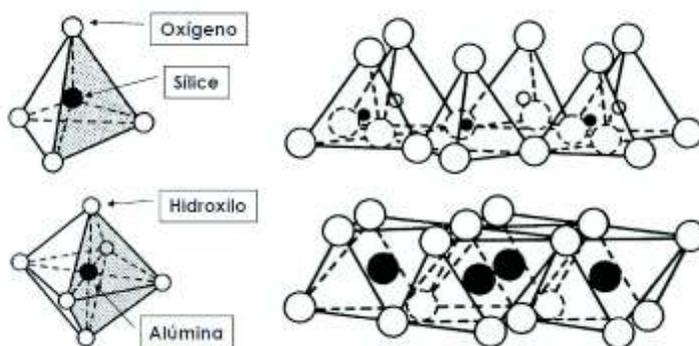
3.1.2. ESTRUCTURA MINERAL

Los suelos expansivos tienen propiedades físicas y químicas que se encuentran controladas, en su gran mayoría por humus y arcilla, estos actúan como centros de actividad y a su alrededor ocurren cambios en los nutrientes y reacciones químicas (Higuera, 2015). Los minerales de la arcilla son silicatos de aluminio complejos, que tienen estructuras químicas de forma laminar constituidas por una de las unidades de sílice tetraédrico y aluminio octaédrico. Las mallas tetraédricas se conforman de iones de sílice y átomos de oxígeno que lo rodean, así también son equidistantes del mismo constituyendo vértices y dándole forma a las

mismas. Las unidades octaédricas se constituyen por 6 grupos de hidroxilos (OH) en sus vértices que rodean a un átomo de magnesio y aluminio (Bauzá, 2015).

Las unidades ya mencionadas se combinan bien por los vértices de los tetraedros o por las caras de los octaedros, para formar las láminas anulares o lineales, como se expone en la Figura 3.1. Las estructuras laminares son las más frecuentes y representativas en las arcillas (Bauzá, 2015).

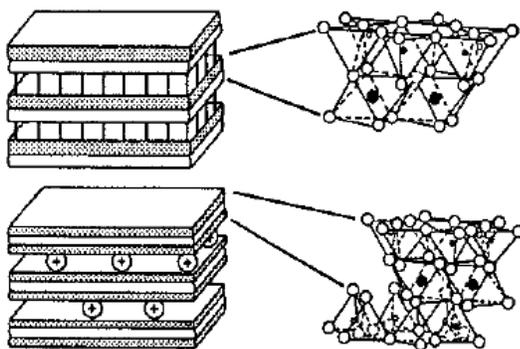
FIGURA 3.1. AGRUPACIONES MOLECURALES DE LAS ARCILLAS



Fuente: (Bauzá, 2015)

Las estructuras laminares son repetitivas y típicas. Varias capas de mallas tetraédricas y octaédricas comparten uno o varios planos o caras de átomos y agrupados en láminas se forman los enlaces. Las atracciones simples entre láminas son más fuertes que los enlaces compuestos. La Figura 3.2., muestra en la parte superior los enlaces de hidrógeno típicos de la caolinita, mientras que la imagen inferior los enlaces catiónicos muy típico de las esmectitas (Bauzá, 2015).

FIGURA 3.2. ESTRUCTURAS LAMINARES DE LA CAOLINITA Y ESMECTITA



Fuente: (Bauzá, 2015)

Estas láminas se combinan y dan lugar a diferentes minerales arcillosos, como montmorillonita, caolinita, illita y sus propiedades pueden ser observadas en la Figura 3.3. Las cuales mediante enlaces electrostáticos absorben el agua y la retiene, cuando las partículas de arcilla se alejan de las moléculas de agua, se genera una pérdida de atracción y queda como resultado agua suelta (Higuera, et al, 2012).

FIGURA 3.3. PROPIEDADES DE LOS MINERALES DE LAS ARCILLAS

Propiedades	MINERAL		
	Caolinita	Illita	Montmorillonita
Esquemas de la estructura	 	  	  
G = lámina de Gibbsita S = lámina de Silicato K = ión de potasio			
Tamaño de las partículas	d= 0.3 a 3 μm e = 1/3 a 1/10 d	d= 0.1 a 2 μm e = 1/10 d	d= 0.1 a 1 μm e = 1/10 d
Superficie específica	5 – 30	65 – 100	600 – 800
Capacidad de intercambio catiónico por 100g de arcilla	3 – 15	10 – 40	80 – 150
Forma de la partícula	Aplanada	Aplanada	Aplanada
Expansión máximo para una presión de 0.1 t/p ²	despreciable	350	1500
Expansión máxima para una presión de 0.2 t/p ²	despreciable	150	350

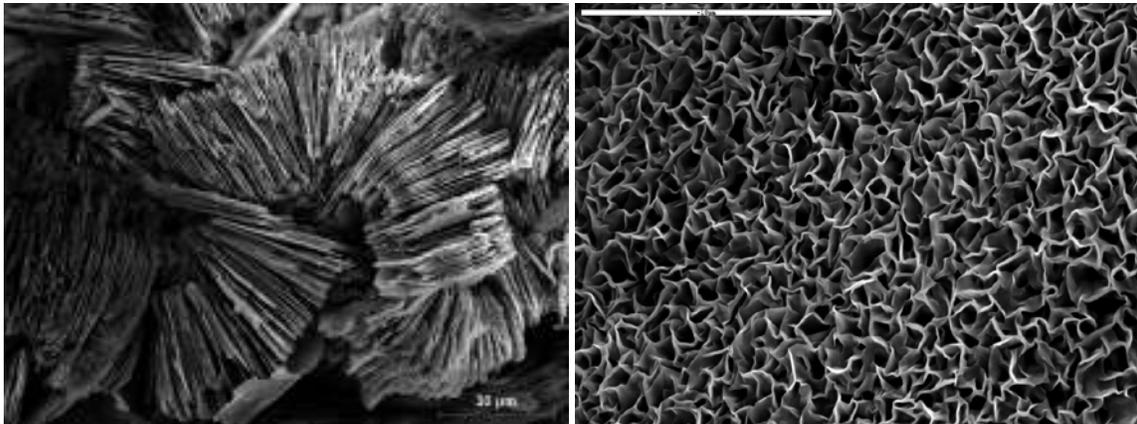
Fuente: (Bauzá, 2015)

Los suelos expansivos muestran una variación significativa en su volumen ante la presencia de agua. Algunas arcillas cuya composición se encuentra formada por el mineral montmorillonita, muestran espacios entre las láminas que tienden absorber agua generando su expansión. A los suelos que contienen este material se los conocen como suelos expansivos o arcillas expansivas y son la causa de la mayoría de los problemas estructurales (Higuera, et al, 2012). En la Figura 3.4., es posible visualizar tanto a la caolinita (lado izquierdo) como a la montmorillonita (lado derecho), los cuales son minerales de la arcilla.

3.1.3. CLASIFICACIÓN DEL SUELO

Las arcillas se encuentran conformadas por agregados de silicato de aluminio hidratado, proveniente de la descomposición de los minerales de aluminio. Este tipo de suelo presenta diferentes coloraciones dependiendo de las impurezas que posee, siendo de color blanco cuando se encuentra en estado puro, y aparece de la descomposición de rocas constituidas por feldespato, que se origina mediante procesos naturales que duran en formarse decenas de miles de años. A estos suelos se los considera como un coloide, por sus partículas pequeñas y de superficie lisa, el diámetro de estas es menor a 0,002 mm y se clasifican en arcillas primarias y secundarias, dependiendo como se encuentran en la naturaleza (Higuera, et al, 2012).

FIGURA 3.4. MINERALES CAOLINITA Y MONTMORILLONITA



Fuente: (Sociedad Española de Arcillas, 2017)

Las arcillas primarias son las que se encuentran en la misma zona en donde estas se formaron, esto quiere decir, que no han sido movidas de su lugar de origen por el viento o por el agua. Una de las arcillas conocidas como primarias es el caolín, es de color casi blanco cuando se encuentra en estado puro, posee un grano más grueso y es menos plástico. Por otra parte, las arcillas secundarias son las que se han sido movidas de su lugar de origen, el agua es un medio de transporte más común, así también los glaciares y el viento. Estas arcillas son las más comunes y se conforman de elementos como hierro, cuarzo y otros minerales que proceden de distintas fuentes (Higuera, et al, 2012).

3.1.4. EFECTOS DE ARCILLAS EN LAS CONSTRUCCIONES

Existen diferentes efectos de los suelos arcillosos en las construcciones como los exhibidos a continuación (Bauzá, 2015):

- Alteraciones en los procesos constructivos debido a los problemas de drenaje, la susceptibilidad a las variaciones meteorológicas y la poca trabajabilidad que estas poseen.
- Los agrietamientos producidos por ambientes secos o húmedos por la exposición que estos tienen al estar en la superficie afecta a su estabilidad y a la durabilidad.
- La incertidumbre sobre la resistencia, debido a que el aumento o disminución de humedad da como resultado la disminución de su resistencia y su estado blando.
- Los cambios de humedad ocasionan un cambio de volumen y pueden ser originados por causas naturales, por ejemplo, las condiciones atmosféricas artificiales o de su entorno, la humedad empleada durante la construcción y el cambio ambiental al final de la obra y así también, el cambio de nivel freático.
- En las cimentaciones se producen deformaciones plásticas.
- Debido a su baja permeabilidad se dificulta su capacidad de eliminar el agua en exceso, por lo que se genera la consolidación o el aumento de movimientos diferidos.

3.1.5. EFECTOS DE LAS CONSTRUCCIONES EN ARCILLAS

Existen efectos que han sido inducidos por las construcciones que han hecho que las consecuencias anteriores incrementen su magnitud o se produzcan efectos secundarios, los cuales inicialmente no fueron tomados en cuenta (Bauzá, 2015).

- Afectaciones en los espesores de los estratos de suelo por el cambio de geometría y en especial, por excavaciones para sótanos y retiro de material en laderas.
- Las excavaciones provocan la descompresión del terreno, por lo tanto, se generan cambios en las tensiones lo que induce levantamientos.

- La apertura de nuevas superficies de contacto con el medio externo produce cambios de drenaje (variaciones de equilibrio hídrico), debido al secado en las capas profundas y la exposición a variaciones climáticas.
- La impermeabilización de la superficie de contacto de suelos expuestos parcial o completamente al ambiente externo produce cambios en las condiciones de drenaje.

3.2. CENIZA VOLCÁNICA

La ceniza volcánica es un material piroclástico con un diámetro menor a 2 mm y es producto de la fragmentación de rocas volcánicas y magma (Schmid, 1981). La ceniza es el elemento que se distribuye ampliamente y esta se forma mediante tres mecanismos básicos los cuales son: a) La descomposición de magma al llegar a la superficie libera gases en solución, b) La explosión del magma durante el contacto con el agua superficial, nieve, hielo o suelo causa la fragmentación y el enfriamiento del mismo y c) Durante las erupciones de agua caliente y vapor se expulsan partículas de las paredes del conducto o a su vez escombros del cráter (Guevara, 2015).

3.2.1. PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

La ceniza volcánica presenta una amplia gama de propiedades como se puede observar a continuación:

3.2.1.1. Propiedades físicas

- **Composición litológica y textural**
La interpretación de las propiedades físicas de una erupción volcánica y el contenido que se suspende, se determina a través de la composición y forma de la ceniza, indican también la interacción entre el agua y el magma que se encuentra sobre el conducto volcánico o en el borde cráter (Guevara, 2015).
- **Albedo**
Es el porcentaje de radiación que se refleja en cualquier superficie respecto a la radiación que ocurre sobre la misma. La ceniza volcánica tiene alta vascularidad en sus partículas y grandes concentraciones de vidrio de

silíce, lo que podría aumentar en gran magnitud el albedo en la superficie cuando éste se encuentre en el cráter (Guevara, 2015).

- Tamaño de la partícula

El tamaño de las partículas de ceniza puede ser muy variable dependiendo del tipo de erupción que se produzca. Estas partículas pueden viajar grandes distancias, lo cual depende de la dirección y velocidad del viento en el cráter (Guevara, 2015).

3.2.2. ESTRUCTURA MINERAL

La ceniza del volcán Tungurahua se encuentra constituida de SiO_2 ($59.2\% \pm 1.3$), CaO ($7.8\% \pm 0.6$), Al_2O_3 ($15.9\% \pm 1.3$), Na_2O ($3.2\% \pm 0.5$) y cantidades menores de 3.0% de Mg, K_2O y Ti_2O , con composición principalmente andesítica. Los minerales presentes en la fase cristalina son plagioclasas ($58.0\% \pm 3.1$), piroxenos ($37\%, \pm 3.3$), olivino ($3.5\% \pm 1.5$), magnetita ($1.0\% \pm 0.5$) y 39%, $\pm 6.6\%$ de material amorfo. Estos valores no han tenido cambios significativos durante los 15 años que ha tenido de actividad eruptiva, y debido a que se ha emitido más de 112 m³ de ceniza durante el tiempo ya mencionado, se ha visto óptimo el uso de este material. Esta ceniza contiene material fino ($<63 \mu\text{m}$) que presentan fluctuaciones entre 0.3% y 48.7% (Guevara, 2015).

3.3. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Se denomina como estabilización de suelos a una serie de procesos físicos, químicos y físico-químicos que transforman las propiedades que poseen los suelos debido al gran interés en aplicaciones de ingeniería, para la obtención de un material adecuado para su uso. Esta estabilización requiere mejorar las propiedades como son: durabilidad, estabilidad volumétrica, resistencia, permeabilidad, compresibilidad, permanencia de las propiedades obtenidas y trabajabilidad. Se busca mantener sus propiedades a través del tiempo y a su vez, tener una resistencia suficiente a la deformación por cargas y la acción destructora en el suelo (Higuera, et al, 2012).

3.3.1. GENERALIDADES

El diseño y construcción de diferentes tipos de estructuras de bajo volumen ha requerido que los ingenieros incorporen a la creación de estos proyectos suelos y agregados de baja calidad. Esta necesidad está dada por la disponibilidad de materiales de calidad dentro de la zona de construcción, las distancias que se tienen para el acarreo y las consideraciones económicas. Los materiales de mala calidad o marginales generalmente tienen el potencial de demostrar un comportamiento de ingeniería indeseable, como baja capacidad de carga, alto potencial de contracción y expansión, alta susceptibilidad a la humedad y baja durabilidad. Estas características negativas de rendimiento del suelo generalmente se atribuyen a la naturaleza y cantidad de finos presentes en el material. Por lo tanto, los suelos de grano fino como limos y arcillas tienden a ser los elementos más problemáticos. El bajo rendimiento de ingeniería de los materiales fácilmente disponibles ha obligado a los ingenieros a procurar mejorar las propiedades mecánicas de los suelos y agregados de baja calidad mediante la estabilización del suelo (Tigle & Santoni, 2003).

3.3.2. ALTERNATIVAS DE ESTABILIZACIÓN

Existen diversas alternativas para la estabilización de suelos y para su elección dependerán de factores como son las características del material a emplearse y a su vez de las condiciones que se busque optimizar, con la finalidad de obtener un suelo con mejores condiciones físico-mecánicas y que sea eficiente para el uso que se le vaya a dar dentro del proyecto (Sánchez, 2014). Para lograr cumplir con las condiciones requeridas se podrán aplicar los métodos que se verán a continuación.

3.3.2.1. Estabilización mecánica

La estabilización mecánica incluye todas las mejoras a las propiedades de la masa del suelo sin la adición de agentes estabilizantes. La idea principal de la estabilización mecánica de arcillas expansivas es la producción de un suelo que no tengan cambios de volumen, reduciendo los espacios vacíos y, por lo tanto, aumentando su impermeabilidad, además que posean la fuerza suficiente para

sostener de forma segura las cargas que se le aplican, o no causen daños a medida que cambia su volumen (Petry & Armstrong, 1989)

Esta estabilización se la realiza usualmente por compactación, ya que es un proceso que se usa para aumentar el peso unitario del suelo, la resistencia y la capacidad de carga de las estructuras construidas sobre los suelos. En este método se usan generalmente rodillos compactadores, rodillos vibratorios, rodillos neumáticos de goma y rodillos de ruedas lisas. Para aumentar la densidad de suelos granulares se utilizan rodillos vibratorios. A la compactación se la denomina también como consolidación, ya que necesita energía mecánica para la eliminación de aire contenido en el suelo (Das, 2015).

El contenido de humedad tiene gran influencia en la compactación de un suelo, así como también el tipo de suelo debido al tamaño de grano y el esfuerzo de compactación usados para la consolidación (Das, 2015).

3.3.2.2. Estabilización física

La estabilización física se basa principalmente en un tratamiento térmico. Se pueden definir dos tipos de estabilización:

- Por calentamiento
- Por enfriamiento

3.3.2.2.1. Estabilización térmica por calentamiento

Mediante este método se reduce el potencial de expansión de suelos arcillosos y se basa en la observación del cambio que sufre con el calor la arcilla. Se debe llegar a temperaturas suficientes para que el proceso de rehidratación de la arcilla sea irreversible, de esta manera la resistencia adquirida no se pierde ni por inmersión. El calor se aplica por llama directa al suelo provocada en la superficie o por la acumulación de gas calientes (Nieto & Parra, 1985).

3.3.2.2.2. Estabilización térmica por enfriamiento

Todos los métodos de estabilización por enfriamiento deben llegar al punto de congelamiento a través del agua contenida en los poros, de tal manera la arcilla se transforma en un conjunto rígido de considerable resistencia. Para el suelo en

estudio se requieren temperaturas bajo cero grados centígrados (Nieto, et al, 1985).

Este método es empleado para la construcción de cimentaciones profundas en arcilla, esto se logra mediante refrigerantes que circulan por tuberías colocadas en el interior de la arcilla a estabilizarse (Nieto, et al, 1985).

3.3.2.3. Estabilización química

La estabilización química para arcillas expansivas consiste en cambiar el entorno físico-químico alrededor y dentro de las partículas de suelo, cambiando la naturaleza del agua que entra y sale de los espacios vacíos, y efectuando cambios de comportamiento en la masa del suelo. Estos métodos hacen que la arcilla requiera menos agua para satisfacer el desequilibrio de carga, dificultando el movimiento y la salida de agua del sistema, para reducir el cambio de volumen (Petry & Armstrong, 1989).

Este tipo de estabilización consiste en la unión de partículas de un suelo con un agente cementante, el cual produce una reacción dentro del suelo, la misma no incluye necesariamente las partículas de la arcilla, aunque en la unión si están implicadas las fuerzas intermoleculares del suelo (Nieto, et al, 1985).

Los estabilizantes químicos de tipo ácido y alcalino, actúan sobre los componentes del suelo especialmente sobre los minerales de arcilla. El cloruro de sodio es un estabilizante de arcillas de acción no muy durable, su efecto produce reacciones coloidales y altera las características del agua contenida en el suelo, actúa como floculante, disminuyendo la permeabilidad lo que beneficia en el tratamiento de las arcillas expansivas. La cal es un estabilizador usado comúnmente en la ingeniería civil, la cual produce reacciones que incluyen el intercambio iónico, la unión de partículas y la floculación, siendo esta última la principal responsable del cambio de las propiedades de la arcilla cuando es tratada con cal, este procedimiento reduce potencialmente el potencial de expansión, el límite líquido, el índice de plasticidad, densidad seca máxima, y también ayuda a lograr un incremento en la resistencia de este tipo de suelo (Al-

Rawas, Hago & Al-Sarmi, 2005). Su desventaja es que es muy soluble y por lo tanto se lava fácilmente (Nieto, et al, 1985).

La estabilización del cemento es similar a la de la cal y produce resultados similares. Este método se desarrolla a partir de los enlaces cementosos entre el silicato de calcio y los productos de hidratación de aluminato y las partículas del suelo. La adición de cemento al suelo arcilloso reduce el límite líquido, el índice de plasticidad y el potencial de hinchamiento, así como también aumenta el límite de contracción y su resistencia (Al-Rawas, et al, 2005).

La estabilización de suelos mediante aditivos no tradiciones como son electrolitos, resinas y polímeros, hace que estos actúen como catalizadores lo que produce el intercambio de cationes y la floculación de los minerales de la arcilla. A medida que los minerales de arcilla atraen cationes más fuertes del fluido de poro de electrolito iónico, el material de arcilla resultante típicamente exhibe plasticidad reducida, potencial de hinchamiento reducido y tamaño de partícula reducido. Se agrega que un cambio en la calidad del ambiente de alcalino a ácido o viceversa, puede dar como resultado un cambio completo en la estructura molecular del material, generalmente durante largos períodos de tiempo (Tigle, et al, 2003).

3.3.3. ESTABILIZACIÓN CON PUZOLANA DE CENIZA

3.3.3.1. Criterio de dosificación

Existen diferentes y variados registros de recomendaciones de porcentajes para distintos aditivos de estabilización como el cemento, cal o cenizas artificiales. Para el primero, según la Tabla 3.1., se sugieren valores para arcillas altamente plásticas (CH) que van en el rango de 10 a 16% de ceniza en peso.

TABLA 3.1. PORCENTAJES TÍPICOS DE CEMENTO SEGÚN EL TIPO DE SUELO

AASHTO	Clasificación de suelo		Rango típico de cemento requerido en porcentaje por peso
		UNIFICADA	
A-1-a	GW, GP, GM, SW, SP, SM		3-5
A-1-b		GM, GP, SM, SP	5-8
A-2		GM, GC, SM, SC	5-9
A-3		SP	7-11
A-4		CL, ML	7-12

TABLA 3.1. CONTINUACIÓN

A-5	ML, MH, CH	8-13
A-6	CL, CH	9-15
A-7	MH, CH	10-16

Fuente: (ACI Committee 230, 1991)

Para el caso de la cal, se han realizado investigaciones con éxito con porcentajes del 5% en mezcla (Das, 2012). Sin embargo, debido a que las cenizas volcánicas se restringen geográficamente a países que poseen volcanes en actividad, esta rama de la investigación no se ha desarrollado a la par de las anteriores, en donde es posible encontrar normativas por países sobre su uso.

Por estos motivos, en el presente estudio se propone el uso de tres diferentes dosificaciones de ceniza volcánica que son el 10, 20 y 30% en peso seco del suelo, para posteriormente, comparar los resultados de los ensayos y su influencia con respecto a las muestras naturales (0% de ceniza) en búsqueda del porcentaje óptimo para estos suelos.

3.3.3.2. Método de aplicación en campo

Como método de aplicación no es posible proponer procesos exactos a seguir dado que todavía no se ha probado el uso de la ceniza volcánica sobre arcillas expansivas en campo a escala real, sin embargo, a continuación, se expone una metodología utilizada en gran medida con materiales tradicionales con cemento o cal, sirviendo como punto de partida y únicamente referencial:

a) Escarificación y esponjamiento

Este procedimiento se lo realizará mediante una motoniveladora, como se observa en la Figura 3.5., con el objetivo de disgregar la superficie del suelo a lo ancho y largo de la vía a construirse, así logrando una profundidad adecuada como a su vez la homogeneidad requerida obteniendo una condición suelta que permita la mezcla del aditivo (Orellana & Huevo, 2009).

FIGURA 3.5. ESCARIFICACIÓN CON MOTONIVELADORA

Fuente: (Construdata, 2018)

b) Aireación

Consecuentemente a la escarificación, si el suelo posee una humedad mayor a la requerida se debe dejar el suelo en reposo con el fin de que se elimine agua con la exposición al sol por evaporación (Orellana & Huezco, 2009).

c) Humectación

Este paso se lo realizará si el suelo posee un contenido de humedad menor a la especificada para la compactación, que previamente se debió obtener en laboratorio, para lo cual se emplearán tanqueros de agua, ver Figura 3.6. Este procedimiento es de suma importancia porque al momento de implementar la ceniza volcánica ésta se adherirá al suelo y no se dispersarán las partículas como en el caso de que estuviera seco y así, existiría pérdida de material, además de poder alcanzar a su contenido de humedad óptima.

FIGURA 3.6. HUMECTACIÓN CON TANQUEROS DE AGUA

Fuente: (Construdata, 2018)

d) Adición de ceniza volcánica

Los sacos de ceniza se colocarán en el terreno en filas y columnas de forma que se logre cumplir la dosificación requerida por el suelo, como se muestra en la Figura 3.7. Es necesario tomar en cuenta aspectos importantes como: espesor de capa de arcilla, ancho y largo de la vía a ser estabilizada.

FIGURA 3.7. ADICIÓN DE CENIZA VOLCÁNICA EN EL SUELO



Fuente: (Construdata, 2012)

Adicionalmente, se abrirán los sacos de ceniza y se los extenderá de manera manual en toda la vía. Las precauciones de seguridad no deben olvidarse dado que se puede inhalar el producto por ser un grano muy fino, pudiendo causar problemas de salud en los trabajadores.

e) Mezclado de suelo con ceniza volcánica

El mezclado del aditivo se realizará con el uso de una motoniveladora con escarificadores, mezclándola de un lado a otro hasta que la masa de suelo se homogenice, es decir, cuando no presente grumos y tenga un color uniforme. El mezclado del suelo más el aditivo se encuentra en la Figura 3.8.

FIGURA 3.8. MEZCLADO DE SUELO Y CENIZA VOLCÁNICA



Fuente: (Construdata, 2014)

El número de pasadas de la motoniveladora para el mezclado se realizará de acuerdo con el criterio del ingeniero, garantizando que al finalizar este paso el suelo se encuentre homogéneo en el tramo donde se requiera la vía.

f) Compactación del suelo estabilizado

La compactación de suelo se la realiza mediante las técnicas convencionales de movimiento de tierra, este procedimiento se lo desarrolla a través de un rodillo compactador pata de cabra, ideal para los suelos cohesivos, ver Figura 3.9 (lado izquierdo), con el cual se busca que la densidad de la mezcla de suelo y ceniza volcánica cumpla con la densidad obtenida en el ensayo de compactación en laboratorio. Finalmente se realiza el uso del rodillo compactador liso, ver Figura 3.9 (lado derecho), para dejar terminada la superficie. Una vez concluida esta etapa, debe mantenerse húmedo hasta que se aplique el riego de curado, lo que provocará que la puzolana se active y modifique las propiedades del suelo.

FIGURA 3.9. COMPACTACIÓN CON RODILLO PATA DE CABRA Y LISO



Fuente: (Construdata, 2014)

CAPÍTULO 4

TRABAJOS DE LABORATORIO

4.1. TOMA DE MUESTRAS

Para la toma de muestras sean alteradas o inalteradas es necesario identificar cada una de ellas con: localización de extracción, número de espécimen, entre otros datos que sean útiles para su fácil reconocimiento (NTE INEN 0686, 1982).

4.1.1. MUESTRAS INALTERADAS

Las muestras inalteradas se obtienen a través de la excavación de suelo recientemente realizada a una profundidad de 1.5 m (NTE INEN0687, 1982), para este procedimiento se limpió el terreno y se retiró el material alterado cuidadosamente. Se talló un bloque de 35x35 cm como se observa en la Figura 4.1 y al obtener la muestra fue colocado papel film alrededor del bloque, así como también una funda plástica de tal manera que sus propiedades físicas, como el contenido de humedad y forma no cambien. Después de este procedimiento se depositó los bloques dentro de una caja de madera con dimensiones de 40x40 cm con amortiguadores de espuma Flex que evitaron cualquier daño durante el transporte.

FIGURA 4.1. OBTENCIÓN DE MUESTRAS INALTERADAS EN CAMPO



Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

Como aclaración, al momento de depositar el bloque de suelo en la caja de madera, se debe tener cuidado con la colocación al mismo sentido del cual fue extraído.

4.1.2. MUESTRAS ALTERADAS

Las muestras alteradas se tomaron directamente del estrato seleccionado, en este caso, del lugar donde se obtuvo la muestra inalterada de forma que se pudo caracterizar las condiciones de suelo. El material extraído fue colocado en saquillos de yute, como está indicado en la Figura 4.2. (NTE INEN 0686, 1982).

FIGURA 4.2. OBTENCIÓN DE MUESTRAS ALTERADAS EN CAMPO



Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

4.2. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Las masas de los suelos naturales 3, 4 y 5 tomadas en las ubicaciones descritas en el capítulo 1 se utilizaron para los ensayos en su forma natural o secas, de acuerdo como se indicaba en las normas ASTM. Se debe aclarar que para las muestras dosificadas se requirió secarlas para obtener contenidos de humedad nulas y así efectuar las mezclas con la ceniza volcánica.

4.3. DOSIFICACIONES DE LA MEZCLA

Para la dosificación de la muestra al 10, 20 y 30% de ceniza en peso seco, se requirió aproximadamente 12 kg de cada una las masas de suelo en estudio, así como 2.4 kg de ceniza volcánica debido a las especificaciones antes ya mencionadas en el apartado 3.3.3.1. El suelo se secó al horno durante 24 horas

para la eliminación de su contenido de humedad, posteriormente se disgregó; a su vez la ceniza volcánica seca fue tamizada a través de la malla N° 200.

La masa de suelo fue dividida en tres porciones, en este caso de 3 kg cada muestra y se combinó con las cantidades correspondientes de ceniza de forma manual hasta que se tuvo una mezcla homogénea, este procedimiento se indica con mayor claridad en la Figura 4.3.

FIGURA 4.3. DOSIFICACIONES DE LAS MUESTRAS



Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

Como información base, la densidad real (Luna, 2014) de la ceniza del volcán Tungurahua fue calculada mediante el ensayo de densidad con el frasco de Le Chatelier (Ec. 4.1), resultando una densidad real de 2.66 g/cm³ (ANEXO 1, págs. 140-141).

$$Densidad\ real = \frac{P_2 - P_1}{L_2 - L_1} \quad (4.1)$$

P_1 : peso del frasco con reactivo, gr.

P_2 : peso del frasco con reactivo y cemento, gr.

L_1 : lectura de volumen inicial, cm³.

L_2 : lectura de volumen final, cm³.

4.4. CANTIDAD DE ENSAYOS DE LABORATORIO

A continuación, en la Tabla 4.1., se visualiza la cantidad de ensayos realizados en este estudio con su correspondiente norma, tanto para el suelo natural como para el dosificado. Además se aclara que, en los ensayos sobre suelos con ceniza

volcánica, cuando fue necesario elaborar especímenes remoldeados se utilizó los resultados de compactación de las muestras naturales respectivas, con una densidad máxima seca ($\gamma_{d\text{ máx}}$) de por lo menos el 95% y la humedad óptima ($w_{\text{ópt}}$), sin embargo, para el tallado de las muestras naturales la densidad fue la de los suelos inalterados. Esto ocurrió para permeabilidad, corte directo y consolidación.

TABLA 4.1. CANTIDAD DE ENSAYOS SEGÚN EL TIPO DE SUELO

Tipo	Ensayo	Norma ASTM	Cantidad de ensayos			
			Suelo natural	Suelo dosificado (10, 20 y 30%)	Total	
Propiedades físicas	Granulometría por tamizado	D421/ D422	3	-	3	
	Granulometría por hidrómetro	D7928	3	-	3	
	Límite líquido	D4318	3	18	21	
	Límite plástico	D4318	3	18	21	
	Contenido de humedad	D2216	3	18	21	
	Clasificación de suelos SUCS	D2487	3	18	21	
	Densidad de sólidos	D854	3	18	21	
	Permeabilidad	D2434	6	18	24	
	Índice de expansión	D4829	6	18	24	
	Difracción de rayos X	E2627	3	-	3	
	Fluorescencia de rayos X	E2465	3	-	3	
	Propiedades mecánicas	Próctor modificado	D1557	3	-	3
		Corte directo	D3080	3	18	21
Consolidación		D2435	6	9	15	
Total					204	

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

4.5. ENSAYOS DE SUELO SIN TRATAR

En este apartado se muestra todos los ensayos realizados sobre las muestras naturales muestreadas en la provincia de Manabí. Inicialmente para la investigación se recogieron 7 muestras en diferentes ubicaciones de la provincia, las cuales se evidenciaron en la Figura 1.2, no obstante, las muestras 1, 2, 6 y 7 no fueron aptas para continuar con el estudio porque no clasificaron como suelos arcillosos de alta plasticidad. A través de los suelos 3, 4 y 5, se han obtenido los resultados de los ensayos que son de gran importancia para el presente estudio técnico experimental.

4.5.1. ENSAYOS FÍSICOS

4.5.1.1. Contenido de humedad

El contenido de humedad determina la masa de agua que se remueve a través del secado del suelo húmedo en un horno controlado de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}$ C durante 24 horas (ASTM D2216-10). Este ensayo se lo realizó como se puede observar en la Figura 4.4 y sus resultados se encuentran presentes en la Tabla 4.2 (ANEXO 2, págs. 142-145).

$$\text{Contenido de humedad \%} = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_c} * 100 \quad (4.2)$$

W_1 : peso del recipiente más suelo húmedo, gr.

W_2 : peso del recipiente más suelo seco, gr.

W_c : peso del recipiente, gr.

FIGURA 4.4. PREPARACIÓN DE SUELO PARA CONTENIDO DE HUMEDAD



Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

TABLA 4.2. CONTENIDO DE HUMEDAD DE MUESTRAS NATURALES

CONTENIDO DE HUMEDAD						
NORMA: INEN 690			ASTM D 2216-10			
MUESTRA	PRUEBA No.	CÁPSULA No.	PESO HÚMEDO (gr)	PESO SECO (gr)	PESO CÁPSULA (gr)	LÍMITE NATURAL (%)
M3	1	L115	67.62	57.86	9.44	20.14
	2	L13	60.16	51.52	9.74	20.70
M4	1	M22	62.01	53.33	9.34	19.74
	2	M8	59.99	51.61	9.37	19.85
M5	1	N23	59.91	53.46	9.62	14.72
	2	R13	46.89	42.16	9.47	14.45

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

4.5.1.2. Clasificación por SUCS

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) clasifica los suelos de grano grueso y grano fino con fines de ingeniería, basado en la determinación de las características de tamaño de partícula, límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad, a través de ensayos de laboratorio que debe ser usado cuando se requiere una clasificación precisa (ASTM D2487-11).

Este sistema clasifica a los suelos en dos grandes categorías como ya fue mencionado. Los suelos de grano grueso, los cuales pertenecen al grupo de grava y arena, que se retienen en el tamiz N° 200 se los caracteriza mediante los símbolos G (grava) y S (arena). Mientras que el suelo fino, que pasa más del 50% del tamiz N° 200, se clasificará por los símbolos M, O y C que son limo inorgánico, limos y arcillas orgánicas/inorgánicas, respectivamente (Das, 2015).

El Sistema Unificado utiliza los siguientes símbolos de representación, expuesto en la Tabla 4.3.

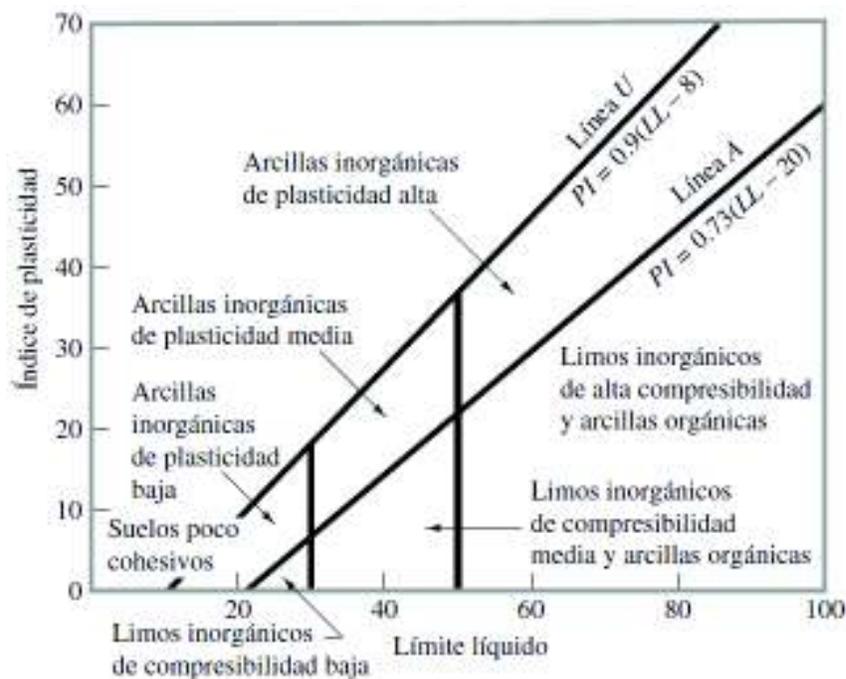
TABLA 4.3. SÍMBOLOS DE IDENTIFICACIÓN PARA EL SUCS

Símbolo	G	S	M	C	O	Pt	H	L	W	P
Descripción	Grava	Arena	Limo	Arcilla	Limos orgánicos y arcilla	Turba y suelos altamente orgánicos	Alta plasticidad	Baja plasticidad	Bien graduados	Mal graduados

Fuente: (Das, 2001)

Cuando los resultados de las pruebas de laboratorio indican que el suelo está cerca de otro grupo de clasificación del suelo, la condición límite se puede indicar con dos símbolos separados por una barra inclinada. Los símbolos fronterizos son particularmente útiles cuando el valor del límite líquido de los suelos arcillosos es cercano a 50 como se observa en la Figura 4.5. Estos suelos pueden tener características expansivas y el uso de un símbolo límite (como CL/CH, CH/CL) alertará al usuario de las clasificaciones asignadas de potencial expansivo (ASTM D2487-11).

FIGURA 4.5. CARTA DE PLASTICIDAD PARA SUCS



Fuente: (Das, 2015)

4.5.1.2.1. Límite Líquido

Este método de ensayo determina el contenido de humedad de una masa de suelo cuando esta se encuentra en el límite entre su estado líquido y plástico, a través de un dispositivo mecánico llamado Copa de Casagrande, en el que a 25 golpes se determina la fluencia que tiene el material de estudio en condiciones normalizadas (NTE INEN 0691, 1982).

Para este ensayo se necesita una muestra de 250 gr de suelo que pase por el tamiz N° 40 y se procede a mezclar con agua hasta formar una pasta homogénea.

Se coloca una porción de suelo sobre la copa de forma rápida, como se puede ver en la Figura 4.6., cuidando que las burbujas de aire no queden atrapadas, se realiza una ranura central en el suelo y se generan golpes los cuales se encuentran en los siguientes rangos: 15-25, 20-30 y 25-35; por cada uno de estos intervalos es necesario obtener el contenido de humedad (ASTM D4318-17).

Se obtuvieron resultados de límite líquido en Tabla 4.4. con el uso de la Ec. 4.2, la cual es un resumen de los resultados obtenidos en laboratorio (ANEXO 2, págs. 142-145).

FIGURA 4.6. COPA DE CASAGRANDE PARA E LÍMITE LÍQUIDO



Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

TABLA 4.4. LÍMITE LIQUIDO DE MUESTRAS NATURALES

LÍMITE LÍQUIDO							
NORMA: ASTM D 4318-10							
MUESTRA	CÁPSULA No.	No. GOLPES	PESO HÚMEDO (gr)	PESO SECO (gr)	PESO CÁPSULA (gr)	% HUMEDAD	% HUMEDAD A 25 GOLPES
M3	S71	32	18.32	13.14	5.27	65.82	89
	S8	27	17.96	12.16	5.07	84.81	
	S34	23	17.66	11.60	5.32	95.50	
M4	S136	34	17.23	14.40	10.61	74.67	83
	S81	23	15.01	12.82	10.23	84.35	
	S100	20	16.59	13.70	10.52	90.76	
M5	S63	30	15.09	11.24	5.07	62.40	67
	S93	26	16.78	12.14	5.13	66.19	
	S68	19	19.26	13.38	5.22	72.07	

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

4.5.1.2.2. Límite Plástico

El límite plástico es un ensayo para determinar el contenido de humedad de una muestra de suelo en el límite entre su estado plástico y sólido, para lo cual se utiliza un enrollamiento de masa que permite la eliminación gradual de agua hasta la disgregación o la fisura del elemento en estudio (NTE INEN 0692, 1982).

Para la realización de este ensayo se requiere 20 gr de muestra seca que pase por el tamiz N° 40, se amasa con agua normal hasta que se forme con facilidad una esfera y se procede a tomar aproximadamente 6 gr de suelo para proceder a realizar la prueba. Esta masa de suelo se la enrolla sobre una superficie de vidrio lisa, hasta poseer un diámetro de 3.2 mm, como se puede observar en la Figura 4.7., cuando esto suceda es necesario repetir el procedimiento con la masa de suelo con las dimensiones mencionadas inicialmente hasta que se agriete, consecuentemente se procederá a secar la muestra durante 12 horas en un horno para la obtención de su contenido de humedad (ASTM D4318-17).

Para la determinación del límite plástico se utilizó la Ec. 4.2. de la cual se obtuvieron los resultados que se podrán observar en la Tabla 4.5 (ANEXO 2, págs. 142-145)

FIGURA 4.7. ENSAYO DE LÍMITE PLÁSTICO



Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

TABLA 4.5. LÍMITE PLÁSTICO DE MUESTRAS NATURALES

LÍMITE PLÁSTICO						
NORMA: ASTM D 4318-10						
MUESTRA	PRUEBA No.	CÁPSULA No.	PESO HÚMEDO (gr)	PESO SECO (gr)	PESO CÁPSULA (gr)	LÍMITE PLÁSTICO (%)
M3	1	S24	9.60	8.39	5.13	37.19
	2	S68	9.96	8.72	5.40	37.34
M4	1	11	12.67	11.02	5.47	29.71
	2	S96	13.50	11.59	5.32	30.39
M5	1	S46	12.35	11.00	5.47	24.31
	2	S24	13.17	11.59	5.13	24.42

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

4.5.1.2.3. Índice de Plasticidad

El índice de plasticidad es una medida que da el resultado de la cantidad de agua que puede contener una muestra, hay que mencionar que mientras mayor es este valor el suelo es más débil y más plástico. Este índice se calcula a través de la diferencia entre los resultados obtenidos en los ensayos de límite líquido y el límite plástico (ASTM D4318-17).

$$IP = LL - LP \quad (4.3)$$

LL: Límite Líquido

LP: Límite plástico

Mediante la Ec. 4.3. se registran los resultados presentados en el Tabla 4.6 (ANEXO 2, págs. 142-145).

TABLA 4.6. ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE MUESTRAS NATURALES

ÍNDICE DE PLASTICIDAD	
MUESTRA	IP (%)
M3	52
M4	53
M5	42

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

Al finalizar los ensayos de consistencia LL, LP e IP, se determinó mediante la carta de plasticidad la clasificación SUCS (ANEXO 2, págs. 142-145) para los

suelos naturales expuestos en la Tabla 4.7. Identificándose suelos arcillosos de alta plasticidad y una porción de limos altamente plásticos.

TABLA 4.7. CLASIFICACIÓN SUCS DE MUESTRAS NATURALES

MUESTRA	LL (%)	IP (%)	SUCS
M3	89	37	MH-CH
M4	83	30	CH
M5	67	24	CH

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

4.5.1.2.4. Índice de Liquidez

El índice de liquidez muestra la consistencia relativa de un suelo cohesivo; es un indicativo de los esfuerzos a los que ha sido sometido el suelo antiguamente, por lo que, si este índice es cercano a cero o negativo, quiere decir que está preconsolidado o sobreconsolidado, mientras que si es cercano a 1 es normalmente consolidado (Crespo, 2004). Para su determinación tenemos la siguiente ecuación:

$$I_L = \frac{W - LP}{IP} \quad (4.4)$$

W : Contenido de humedad del suelo.

LP : Límite plástico.

IP : índice de plasticidad.

En la Tabla 4.8, está representados los resultados del índice de liquidez para las tres muestras naturales, calculado en base a sus límites de consistencia y contenido de humedad.

TABLA 4.8. ÍNDICE DE LIQUIDEZ DE MUESTRAS NATURALES

MUESTRA	ÍNDICE DE LIQUIDEZ	
	IL (%)	IL (%) Promedio
M3	-0.33	-0.32
	-0.32	
M4	-0.19	-0.19
	-0.20	
M5	-0.23	-0.23
	-0.24	

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

4.5.1.3. Granulometría por lavado

Fue necesario el uso de una porción de la muestra alterada de 300 gr almacenada en saquillos, que fue lavada mediante el uso de agua potable. El agua de lavado que contiene materia disuelta o material en suspensión decanta y pasa a través del tamiz N° 200, como se puede observar en la Figura 4.8. Se debe dejar secar la masa de suelo y calcular el material eliminado mediante este procedimiento con relación a la muestra inicial y se toma como porcentaje solo el material más fino con la Ec. 4.5. (NTE INEN 0697, 2010).

$$A = \frac{B - C}{B} \quad (4.5)$$

A: Porcentaje del material fino que pasa a través del tamiz 75 µm por lavado.

B: Peso seco inicial.

C: Peso seco después del lavado.

Los resultados calculados para este ensayo se observan en la Tabla 4.9 (ANEXO 2, págs. 142-145).

FIGURA 4.8. ENSAYO DE GRANULOMETRÍA POR LAVADO



Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

TABLA 4.9. GRANULOMETRÍA POR LAVADO DE MUESTRAS NATURALES

GRANULOMETRÍA							
TAMIZ No.	ABERTURA TAMIZ (mm)	MUESTRA M3		MUESTRA M4		MUESTRA M5	
		PESO RETENIDO (gr)	PORCENTAJE PASANTE (%)	PESO RETENIDO (gr)	PORCENTAJE PASANTE (%)	PESO RETENIDO (gr)	PORCENTAJE PASANTE (%)
No.3/8	9.500	-	-	-	-	0.00	100.0
No. 4	4.750	0.00	100.0	0.00	100.0	0.44	99.7
No. 10	2.000	0.03	100.0	0.10	99.9	0.48	99.3
No. 20	0.850	0.09	99.9	0.20	99.8	0.88	98.6
No. 40	0.425	2.54	97.9	0.20	99.5	2.04	97.1
No. 200	0.075	9.71	90.1	11.30	88.3	10.33	89.2
PASA 200	-	112.19	0.00	88.30	0.00	116.74	0.00
TOTAL		124.19		125.21		130.91	

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

4.5.1.4. Granulometría por hidrómetro

La granulometría por hidrómetro se realiza a partir de la sedimentación de los granos del suelo en un líquido, en este caso agua. Una masa de suelo se encuentra dispersa en el agua, las partículas se asientan a diferentes velocidades que dependerán de su tamaño, forma y peso. Para su simplificación se supone que todas las partículas son esféricas y que su velocidad es expresada por la Ley de Stokes (Das, 2015).

Para este ensayo se tomó una muestra de 50 gr de masa natural inalterada como se muestra en la Figura 4.9 (lado izquierdo). Se debe colocar la muestra en un vaso de dispersión y se agrega agua destilada hasta que la superficie quede de 50 a 80 mm por debajo de la boca del vaso, presente en la Figura 4.10 (lado derecho). El cilindro de sedimentación es cubierto mediante un tapón y sacudido de manera que se remuevan los sedimentos que se encuentran en el fondo del recipiente, obteniendo así una suspensión uniforme (ASTM D7928-17).

Es necesario agitar durante un minuto, colocar el cilindro sobre una mesa y correr el cronómetro con intervalos de tiempo previamente establecidos. Se toman las lecturas del hidrómetro después de los dos primeros minutos en los que se encuentra estabilizada, se procede a retirar cuidadosamente el hidrómetro y se lo coloca en un cilindro graduado con agua natural, así como también se toma la temperatura (ASTM D 7928-17). Este procedimiento debe tomar en cuenta las

lecturas en los tiempos de 5, 15, 30, 60, 120, 250 y 1440 minutos, para las tres muestras de suelo obtenidas en Manabí.

Para el ensayo se obtuvieron los diámetros del grano de suelo de las muestras naturales como se ve en la Tabla 4.10. (ANEXO 3, págs. 146-152).

FIGURA 4. 9. ENSAYO DE GRANULOMETRÍA POR HIDRÓMETRO



Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

TABLA 4.10. PORCENTAJE PASANTE SEGÚN EL DIÁMETRO POR GRANULOMETRÍA DE HIDRÓMETRO

TIEMPO (min)	MUESTRA M3		MUESTRA M4		MUESTRA M5	
	DIÁMETRO	PESO PASANTE	DIÁMETRO	PESO PASANTE	DIÁMETRO	PESO PASANTE
	Dm	Nm (%)	Dm	Nm (%)	Dm	Nm (%)
1	0.0320	79.3%	0.0314	84.6%	0.0286	84.3%
2	0.0232	76.8%	0.0231	80.4%	0.0214	79.7%
4	0.0167	74.7%	0.0168	77.0%	0.0159	75.0%
15	0.0090	69.7%	0.0092	69.7%	0.0087	68.1%
30	0.0066	64.7%	0.0066	66.3%	0.0064	63.4%
60	0.0048	58.9%	0.0049	61.2%	0.0047	58.8%
120	0.0035	54.8%	0.0035	57.8%	0.0034	55.7%
240	0.0026	49.8%	0.0025	54.4%	0.0025	51.8%
1440	0.0011	38.2%	0.0011	45.1%	0.0011	44.1%

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

4.5.1.5. Actividad

El agua que absorben las partículas de suelo arcilloso corresponde a la propiedad plástica que estos elementos poseen, así como también el tipo y cantidad de minerales que los constituyen provocan en los límites de Atterberg. La fracción del

tamaño de arcilla (porcentaje) aumenta linealmente con el índice de plasticidad, por lo tanto, la actividad es la pendiente de la línea de correlación del índice de plasticidad y el porcentaje de tamaño de arcilla más pequeño que $2\mu\text{m}$ (Das, 2015).

$$A = \frac{PI}{\text{Porcentaje de tamaño de arcilla, por peso}} \quad (4.6)$$

La actividad es un índice aproximado que identifica el potencial hinchamiento que poseen la arcillas (Das, 2015). Si la actividad crece, también lo hace la cohesión del suelo y se determina el tipo de arcilla según la actividad como se muestra en la Tabla 4.11.

TABLA 4.11. ACTIVIDAD DE ARCILLAS NATURALES

A	TIPO DE ARCILLA
< 0.5	Arcilla con poca actividad (caolinítico)
0.5 - 0.7	Arcilla con actividad normal (ilítico)
> 1	Arcillas más activas (montmorillonítico)

Fuente: (Crespo, 2004)

Según la Ec. 4.6, se calcula la actividad de las muestras naturales con datos aportados de la granulometría de hidrómetro y los límites de consistencia, en la Tabla 4.12 se representa los resultados.

TABLA 4.12. ACTIVIDAD DE MUESTRAS NATURALES

Muestra	Pasa N°200 (%)	IP (%)	% Arcilla	Actividad	Clasificación
M3	93.1	52	44.00	1.182	MUY ALTA
M4	99.1	53	49.75	1.065	MUY ALTA
M5	95.7	42	47.52	0.884	ALTA

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

4.5.1.6. Índice de expansión

El índice de expansión proporciona una indicación del hinchamiento del suelo. Este índice es la diferencia entre la lectura final de hinchamiento menos la inicial dividido para la lectura inicial (ASTM D4829-11).

Para la compactación del suelo se usa un molde de 101.9 mm de diámetro, se divide al suelo en dos capas y se le administra 15 golpes uniformemente en cada una de ellas con un martillo estándar de 325 mm de altura. Para la adherencia entre capas se realiza cortes entre capas (ASTM D4829-11).

Para conocer el grado de saturación de la muestra se aplica la siguiente fórmula.

$$S = \frac{w * G_s * \gamma_d}{G_s * \gamma_w - \gamma_d} \quad (4.7)$$

S : Grado de saturación, %.

W : Contenido de humedad, %.

G_s : Gravedad específica del suelo (2.6 a 2.8).

γ_w : Peso unitario del agua kN/m^3 .

γ_d : Peso unitario húmedo del suelo compactado kN/m^3 .

Con el suelo ya compactado se procede a remoldear la muestra con un grado de saturación del 50 ± 2 % en un anillo de metal, continuamente se coloca el espécimen más el anillo en un consolidómetro y se aplica una carga vertical de 6.9 kPa. Se debe someter a la masa de suelo a esta carga durante 10 minutos y se obtendrá la medida inicial, se procederá a inundar la muestra y pasadas las 24 horas se tomará la medida de hinchamiento final (ASTM D4829-11). Este procedimiento se observa en la Figura 4.10.

Para el cálculo de índice de expansión se aplicará la siguiente fórmula:

$$EI = \frac{\Delta H}{H_1} * 1000 \quad (4.8)$$

ΔH : Variación de altura $D_2 - D_1$, mm.

H_1 : Altura inicial, mm.

D_1 : Lectura inicial del dial, mm.

D_2 : Lectura final del dial, mm.

Se determina el potencial de expansión a través de la Tabla 4.13, los resultados del índice de expansión se encuentran mostrados en la Tabla 4.14 y en el ANEXO 4, págs. 153-165, se encuentran tabulados los datos obtenidos durante el ensayo.

TABLA 4.13. POTENCIAL DE EXPANSIÓN DE SUELOS

ÍNDICE DE EXPANSIÓN (IE)	POTENCIAL DE EXPANSIÓN
0 - 20	MUY BAJO
21 - 50	BAJO
51 - 90	MEDIO
91 - 130	ALTO
> 130	MUY ALTO

Fuente: (ASTM D4829-11)

FIGURA 4.10. ENSAYO INDICE DE EXPANSIÓN

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

TABLA 4.14. ÍNDICE DE EXPANSIÓN DE MUESTRAS NATURALES

Muestra	Prueba No.	D1 (mm)	D2 (mm)	Altura (mm)	ΔH (mm)	Índice de expansión	Índice de expansión	IE Promedio	Clasificación
M3	1	-5.06	-1.57	20.00	3.49	174.50	175	175	MUY ALTA
		-5.04	-1.53	20.00	3.51	175.50			
	2	-5.09	-1.52	20.00	3.57	178.50	176		
		-4.94	-1.49	20.00	3.45	172.50			
M4	1	-5.08	-2.37	20.00	2.71	135.50	135	136	MUY ALTA
		-5.29	-2.61	20.00	2.68	134.00			
	2	-5.01	-2.27	20.00	2.74	137.00	136		
		-5.06	-2.35	20.00	2.71	135.50			
M5	1	-5.03	-3.41	20.00	1.62	81.00	83	83	MEDIA
		-5.01	-3.33	20.00	1.68	84.00			
	2	-5.19	-3.50	20.00	1.69	84.50	83		
		-5.03	-3.39	20.00	1.64	82.00			

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

4.5.1.7. Densidad de sólidos

La densidad de sólidos se determina mediante una muestra de suelo seca, la masa se introduce en el picnómetro a través de un embudo de manera que no se pierda la cantidad de suelo inicial, se añade agua hasta 1/3 o 1/2 de la profundidad del recipiente y se procede a extraer el aire por medio de una bomba de vacío por un tiempo prudente hasta eliminar el aire (ASTM D 854-10). Este procedimiento se observa en la Figura 4.11. El ensayo arroja los resultados presentados en la Tabla 4.15 y en el ANEXO 5, págs. 166-169, estos resultados son fácilmente verificable debido a que la mayoría de sus minerales poseen gravedades específicas que se ajustan dentro del rango de 2.6 a 2.9 (Das, 2015).

$$\text{Densidad relativa} = \frac{A}{B + S - C} \quad (4.9)$$

A: Peso de suelo seco en horno, gr.

B: Peso del picnómetro lleno de agua hasta la marca de calibración, gr.

C: Peso del picnómetro, más suelo y agua hasta la marca de calibración, gr.

S: Peso de muestra saturada seca, gr.

FIGURA 4.11. ENSAYO DE DENSIDAD DE SÓLIDOS



Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

TABLA 4.15. DENSIDAD DE SÓLIDOS DE MUESTRAS NATURALES

MUESTRA	Gs
M3	2.784
M4	2.747
M5	2.784

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

4.5.1.8. Permeabilidad

La permeabilidad es la propiedad que tienen los suelos para permitir el paso del agua a través de sus espacios vacíos y depende de diversos factores como: la distribución de los poros por su tamaño, relación de vacíos, rugosidad de las partículas minerales y el grado de saturación que el suelo posea. En el caso de las arcillas, el material de estudio, la estructura que tiene la muestra juega un rol importante en la permeabilidad como el espesor de las capas de agua en las partículas de arcilla y la concentración iónica. Para la obtención de este parámetro se usa el ensayo de carga variable, ya que el agua fluye a través del suelo mediante el registro de una carga inicial y final en el tiempo (Das, 2015).

Para este ensayo es necesario considerar las condiciones iniciales del suelo, éste se remoldea de la masa natural no alterada y se la coloca en el permeámetro siendo inicialmente medidas las longitudes y pesado. Se toman dos muestras de suelo para determinar su contenido de humedad, así como también se debe colocar papel filtro y un anillo de caucho en los extremos del cilindro para ajustar los cabezales. Se conecta el manómetro y se lo rellena de agua, se abre la válvula de entrada y de salida (drenaje) de manera que se remueva el aire retenido. Consecuentemente, se procede a cerrar la válvula para tomar la altura de agua del manómetro y se abre nuevamente, simultáneamente con el cronómetro para la toma del tiempo. Cada vez que se reduzca un cm de agua se tomará el tiempo al que este sucede (ASTM D 2434-06). La realización de este ensayo se llevó a cabo como se puede observar en la Figura 4.12.

$$K = \frac{VL}{Aht} \quad (4.10)$$

K : Coeficiente de permeabilidad, cm/s

V : Volumen de agua descargado, cm³

L : Longitud de la muestra, cm

t : Tiempo total para que pase la descarga, segundos

h : Carga hidráulica, cm

Los resultados obtenidos a través de la Ec. 4.10., se pueden ver en la Tabla 4.16 y con mayor detalle en el ANEXO 6, págs. 170-176.

FIGURA 4.12. ENSAYO PERMEABILIDAD



Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

TABLA 4.16. PERMEABILIDAD DE MUESTRAS NATURALES

		DATOS PERMEABILIDAD	
MUESTRA	ENSAYO	PERMEABILIDAD MEDIA	
		K_t (cm/seg.)	K_{20} (cm/seg.)
M3	1	4.6959E-06	4.9338E-06
	2	3.3508E-06	3.5206E-06
M4	1	1.1242E-06	1.1519E-06
	2	1.6502E-06	1.6910E-06
M5	1	2.3830E-07	2.4041E-07
	2	1.3209E-07	1.4096E-07

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

Según Terzaghi & Peck, 1973, para resultados de coeficientes K , de permeabilidad que van en el orden de $1E-06$ o menores como se observa en la Figura 4.13, al comparar con las muestras naturales analizadas, se las puede considerar como suelos impermeables, es decir, no permiten el paso del agua a través de ellas.

FIGURA 4.13. INTERPRETACIÓN DE PERMEABILIDAD EN SUELOS

	100	10	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹
Drenaje				Bueno				Pobre			Prácticamente impermeable	
Tipo de suelo	Grava limpia	Arenas limpias y mezclas limpias de arena y grava.		Arenas muy finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena, limo y arcilla, morenas glaciares, depósitos de arcilla estratificada.				Suelos "impermeables", modificados por la vegetación o la descomposición.				
Determinación directa de <i>k</i>	Ensayo directo del suelo "in situ" por ensayos de bombeo. Se requiere mucha experiencia, pero bien realizados son bastante exactos.											
Determinación indirecta de <i>k</i>	Permeámetro de carga hidráulica constante. No se requiere mayor experiencia.											
		Permeámetro de carga hidráulica decreciente. No se requiere mayor experiencia y se obtienen buenos resultados.		Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados dudosos. Se requiere mucha experiencia.				Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados de regular a bueno. Se requiere mucha experiencia.				
	Por cálculo, partiendo de la curva granulométrica. Sólo aplicable en el caso de arenas y gravas limpias sin cohesión.											
	Cálculos basados en los ensayos de consolidación. Resultados buenos. Se necesita mucha experiencia.											

Fuente: (Terzaghi & Peck, 1973)

4.5.1.9. Difracción por rayos X

La difracción por rayos X es una técnica usada con frecuencia para la determinación de minerales, además de la caracterización de rocas sedimentarias que contiene elementos arcillosos. Este al ser un método muy fiable es aplicado en elementos que tienen un ordenamiento adecuado de los componentes que lo constituyen y una estructura cristalina (Carretero & Pozo, 2007).

Para la realización de este ensayo es imperante el uso de una fuente de rayos X la cual se obtiene a partir de un filamento llamado cátodo del cual provienen electrones que se encargan de atacar un anticátodo formado de metal que suele ser comúnmente el cobre o el cobalto, el mismo que provoca rayos X con una única longitud de onda; la radiación procedente pasa a través de un cristal que logre reducir o eliminar las líneas espectrales y la radiación continua. La relación que se produce entre la estructura y la radiación del cristal se encuentra dada por la ecuación de Bragg, a continuación (Carretero & Pozo, 2007).

$$n\lambda = 2d * \text{sen}\theta \quad (4.11)$$

n : Orden de reflexión.

λ : Longitud de onda de los rayos X.

d : Espaciado de angstroms entre planos reticulares paralelos.

θ : Ángulo de incidencia.

Los rayos X generados pasan a través de la partícula, en este caso de suelo arcilloso, dispersándose a través de los átomos que se encuentran ordenados (materia cristalina). Este método es posible por el cambio de potencia que se le da al sistema (Carretero & Pozo, 2007). La difracción por rayos X se realizó para las muestras 3, 4 y 5, de acuerdo con la Tabla 4.17. Se observará con detalle sus resultados en el ANEXO 7, págs. 177-184.

TABLA 4.17. DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE MUESTRAS NATURALES

Mineral	Fórmula	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
		Contenido (%)	Contenido (%)	Contenido (%)
Caolinita	$Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$	30	25	15

TABLA 4.17. CONTINUACIÓN

Cuarzo	SiO_2	16	20	25
Grupo Plagioclasas	$(Na, Ca)Al(Si, Al)Si_2O_8$	13	15	24
Diópsido	$CaMgSi_2O_6$	12	13	11
Mordenita	$(Na_2, Ca, K_2)_4(Al_8Si_{40})O_{96}$ * $28H_2O$	7	8	9
Muscovita	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	6	5	3
Magnetita	Fe_3O_4	5	3	3
Gypsum	$CaSO_4 * 2H_2O$	5	2	2
Cordierita	$Mg_2Al_4Si_5O_{18}$	2	1	1
Montmorillonita	$(Na, Ca)_{0.3}(Al, Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2$	2	2	5
Hematita	Fe_2O_3	1	1	1
Ferropargasita	$NaCa_2Fe^{2+}_4AlSi_6Al_2O_{22}(OH)_2$	1	4	2
Crossita	$Ca_2(Mg, Fe^{2+})_3(OH, F)_2Si_8O_{22}$	1	1	1

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

4.5.1.10. Espectrometría de fluorescencia de rayos X

Esta técnica se realiza a partir del bombardeo generado por rayos X, cuando este emite una radiación secundaria con intensidades y longitudes de onda que depende mucho de los elementos en estudio; la radiación tiene una medida característica la cual reflejará la concentración de la muestra a través de porcentajes de elementos u óxidos que lo constituyen (Carretero & Pozo, 2007). Existe mayor detalle en el ANEXO 8, págs. 185-188 y en el subcapítulo 5.1.7 donde se realiza la interpretación de resultados.

4.5.2. ENSAYOS MECÁNICOS

4.5.2.1. Compactación

La compactación de suelo densifica las partículas de una muestra, debido a la eliminación de aire y la introducción de energía mecánica. Mediante su densidad máxima seca ($\gamma_{d\text{máx}}$) se determinará el grado de compactación que éste posee, es necesario aclarar que el agua es un agente importante ya que cuando se agrega durante la compactación las partículas de suelo se deslizan entre sí y

forman un empaque más denso. En este caso el contenido de humedad es proporcional a la densidad máxima seca después de la compactación (Das, 2015).

Para este método se compactarán al menos tres especímenes de suelo, el primer espécimen será compactado con el contenido de humedad natural del terreno, a partir de 3 Kg de muestra natural para lo cual inicialmente se obtuvo el contenido de humedad inicial y se lo compactará mediante la prueba de proctor modificado. El procedimiento se repite para tres muestras a las cuales se les añadirá 2%, 4% y 6% del contenido de humedad inicial del suelo respectivamente (ASTM1557-12). Para determinar el peso específico húmedo (γ) y la densidad máxima seca ($\gamma_{d \text{ máx}}$) se usan las siguientes fórmulas::

$$\gamma = \frac{W}{V_m} \quad (4.12)$$

γ : Peso específico húmedo de compactación, gr/cm³

W : Peso de suelo compactado en el molde, gr

V_m : Volumen del molde, 943.3 cm³

$$\gamma_{d \text{ máx}} = \frac{\gamma}{1 + \frac{w(\%)}{100}} \quad (4.13)$$

$\gamma_{d \text{ máx}}$: Densidad máxima seca, gr/cm³

$w(\%)$: Contenido de humedad, %

4.5.2.1.1. Proctor Modificado

Para el ensayo de proctor modificado se usa un molde de diámetro 101.6 mm, una masa de suelo de 3 kg la cual se divide en cinco capas, mediante un martillo de 4.536 kg y con una caída de 457.2 mm se procede a compactar. Se compacta cada capa de suelo con 25 golpes (ASTM 1557-12). Este procedimiento se puede dividir en la Figura 4.15 y los resultados de las muestras naturales en la Tabla 4.18 (ANEXO 9, págs. 189-192).

FIGURA 4.14. ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

TABLA 4.18. COMPACTACIÓN DE MUESTRAS NATURALES

COMPACTACIÓN		
Muestra	Yd máx (gr/cm ³)	Humedad óptima (%)
M3	1.526	25.36%
M4	1.64	19.66%
M5	1.634	17.56%

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

4.5.2.2. Corte Directo

La resistencia cortante o cizallamiento del suelo es la resistencia interna del suelo por el área del suelo (unidad) donde puede producirse el deslizamiento en cualquier plano interno y fallar. Esta propiedad se encuentra en función de contenido de humedad, la cohesión entre partículas, la resistencia al rozamiento que se presenta entre partículas y la presión de agua intersticial en el suelo (Das, 2015).

Para el ensayo de corte directo, se debe remoldear una muestra de suelo natural en el anillo, el cual se divide en dos partes. Se coloca un esfuerzo normal de 0.5 kg/cm³ sobre el sistema, a su vez se ubica un lector de desplazamiento horizontal en la zona lateral y se aplica una fuerza lateral la cual irá incrementando constantemente hasta que la muestra falle, ocurriendo a lo largo del plano de división del anillo. El procedimiento se realizará para esfuerzos normales de 1.0 y 2.0 kg/cm² respectivamente para cada muestra, resultando tres especímenes por

cada ensayo (ASTM D3080-11). Detalles del ensayo se pueden observar en las Figura 4.15 y 4.16.

4.5.2.2.1. *Ángulo de Fricción Interna*

El ángulo de fricción interna, conocido también como coeficiente de rozamiento depende principalmente de la uniformidad que existe entre las partículas de una masa de suelo, la forma del grano, del tamaño, como también la distribución, la presión generada sobre la misma y la densidad (Crespo, 2004).

4.5.2.2.2. *Cohesión*

La cohesión de un suelo es la adherencia o cementación que se produce entre las partículas de una masa de suelo ya que entre ellas existe atracción debido a las fuerzas moleculares. En suelos donde no existe ningún tipo de adherencia se supone una cohesión igual a cero y se los denomina suelos no cohesivos (Crespo, 2004).

Al ser determinados los conceptos de cada una de las variables, se aplican las siguientes fórmulas para su cálculo:

$$\tau = \frac{F_t}{A} \quad (4.14)$$

τ : Esfuerzo cortante, kPa.

F_t : Resistencia al esfuerzo de corte, kN.

A : Área de la sección transversal de la muestra, m².

$$\sigma = \frac{F_n}{A} \quad (4.15)$$

σ : Esfuerzo normal, kPa.

F_n : Fuerza normal, kN.

A : Área de la sección transversal de la muestra, m².

$$\tau_f = c + \sigma * \tan(\phi) \quad (4.16)$$

τ_f : Esfuerzo cortante, kPa.

c : Cohesión.

σ : Esfuerzo normal, kN.

ϕ : Ángulo de fricción interna.

A través de las fórmulas mencionadas, se puede determinar el ángulo de fricción y cohesión presentada en la Tabla 4.19 (ANEXO 10, págs. 193-202).

FIGURA 4.15. ENSAYO CORTE DIRECTO



Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

FIGURA 4.16. ENSAYO CORTE DIRECTO CON MUESTRA FALLADA



Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018).

TABLA 4.19. CORTE DIRECTO DE MUESTRAS NATURALES

CORTE DIRECTO		
Muestra	Φ (°)	c (kg/cm ²)
M3	30.96	0.23
M4	18.26	0.30
M5	18.26	0.51

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

4.5.2.3.Consolidación

La consolidación es producida mediante el aumento de esfuerzos sobre los estratos de suelo y es causado por: el reordenamiento de las partículas del suelo, la expulsión de agua o aire de los espacios vacíos o la deformación de las partículas de suelo (Das, 2015).

Existen dos tipos de asentamientos que se generan por cargas externas como son:

- *Asentamiento elástico.*

Este asentamiento es causado por la deformación elástica en masas de suelo saturadas, húmedas y secas, sin la variación del contenido de humedad (Das, 2015).

- *Asentamientos de consolidación.*

Este asentamiento es dependiente del tiempo y se produce por el cambio de volumen generado en suelos cohesivos saturados debido a la eliminación de agua intersticial (Das, 2015).

Cuando una capa de arcilla saturada compresible es sometida a un incremento de esfuerzo se produce un asentamiento elástico inmediato, sin embargo, debido a que la presión de poros ejercida sobre la capa de suelo es muy alta por la carga aplicada, ésta se elimina gradualmente produciendo así un asentamiento de consolidación, por consiguiente, un cambio de volumen durante grandes o teóricamente infinitos periodos de tiempo (Das, 2015).

El ensayo de consolidación se lo realizó a través de un consolidómetro mostrado en la Figura 4.17 (lado izquierdo). La masa de suelo para el caso de las arcillas naturales 3, 4 y 5 se obtuvo mediante el tallado de la muestra natural inalterada mientras que para las muestras dosificadas se obtuvo a partir de suelo compactado. Los especímenes tallados son colocados en un anillo acompañado de dos piedras porosas colocadas sobre y bajo la probeta metálica, visualizado en la Figura 4.71 (lado derecho). Se aplica la carga a través de un brazo de palanca y se obtienen datos de la deformación mediante un micrómetro digital. La

aplicación de carga dura aproximadamente 24 horas (en ocasiones llegó hasta 3 días por su expansión) y ésta es duplicada por día, así como también la descarga.

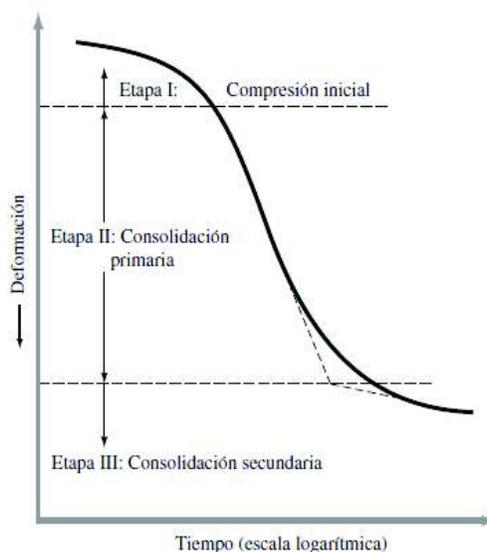
FIGURA 4.17. ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN



Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

En la Figura 4.18. se muestran las etapas que presenta la consolidación. La etapa 1 es causada principalmente por la precarga, la etapa 2 se produce por la presión generada por el agua intersticial, la cual se transfiere paulatinamente en esfuerzo efectivo por su eliminación y la etapa 3 aparece cuando se ha eliminado completamente el excedente de la presión de agua y se generan deformaciones en la masa de suelo por la plasticidad (Das, 2015).

FIGURA 4.18. ETAPAS DE LA CONSOLIDACIÓN



Fuente: (Das, 2015)

Es necesario analizar el índice de vacíos después de obtenidas las gráficas de deformación vs tiempo para lo cual tenemos la siguiente ecuación:

$$H_s = \frac{W_s}{A * G_s * \gamma_w} \quad (4.17)$$

H_s : Altura de sólidos, mm

W_s : Peso seco de la muestra, gr

A : Área de las muestras, cm²

G_s : Gravedad específica de sólidos de suelo

γ_w : Peso unitario del agua, g/cm³

Para el cálculo de la altura inicial de vacíos, se tiene que:

$$H_v = H - H_s \quad (4.18)$$

H_v : Altura inicial de vacíos, mm

H : Altura inicial de la muestra, mm

H_s : Altura de sólidos, mm

Para el cálculo del índice de vacíos inicial se sigue la siguiente fórmula:

$$e_o = \frac{V_v}{V_s} = \frac{H_v A}{H_s A} = \frac{H_v}{H_s} \quad (4.19)$$

e_o : Índice de vacíos inicial

V_v : Volumen de vacíos, cm³

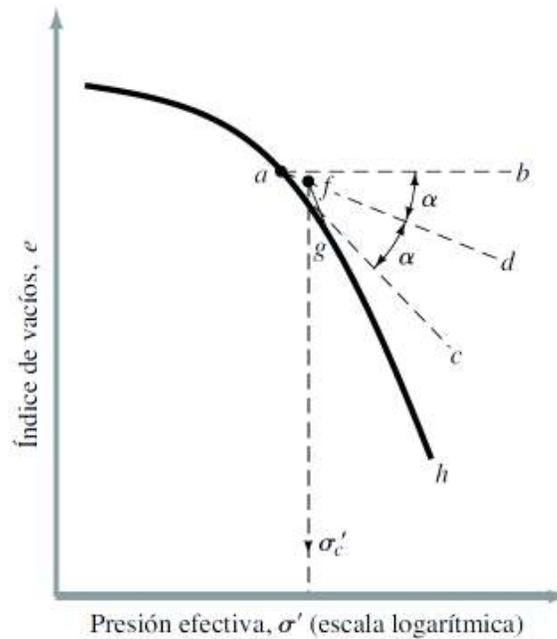
V_s : Volumen de sólidos, cm³

Se menciona que la sobrecarga efectiva actual de las arcillas normalmente consolidadas es la misma presión máxima a la que fue sometida en el pasado, mientras tanto se le llama sobreconsolidada o preconsolidada a las arcillas que presentan una presión de sobrecarga efectiva actual menor a la que experimentó en su era geológica (Das, 2015). El indicador de esta variable, es el índice de sobreconsolidación OCR.

En el estudio, la presión de preconsolidación σ'_c , fue estimada mediante el método gráfico de Casagrande, ver Figura 4.19. Casagrande propuso un método

gráfico de e vs $\log \sigma'$ para determinar la presión de preconsolidación σ'_c , la cual después de la presión efectiva σ' a la que se encuentra sometida la masa de suelo se presenta y es la presión de sobrecarga máxima (Das, 2015).

FIGURA 4.19. MÉTODO GRÁFICO DE CASAGRANDE PARA σ'_c



Fuente: (Das, 2015)

Para la definición del índice de sobreconsolidación se aplica la siguiente ecuación:

$$OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'} \quad (4.20)$$

σ'_c : Presión de preconsolidación de la masa de suelo, kg/cm^2

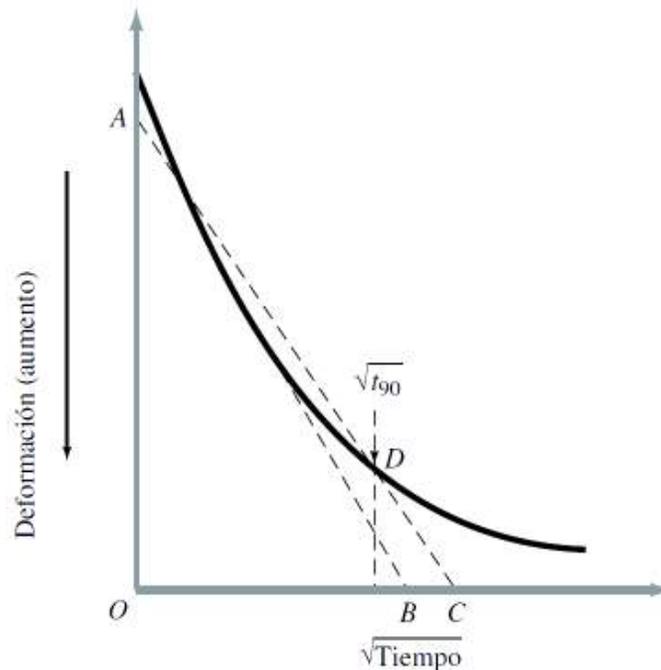
σ' : Presión vertical efectiva, kg/cm^2

Cuando se tienen valores de $OCR > 1$, se indica que es un suelo sobreconsolidado y cuando $OCR = 1$, se trata de un suelo normalmente consolidado.

Otro parámetro indispensable en la consolidación es el coeficiente de consolidación C_v , el cual se determinó mediante el método gráfico de la raíz cuadrada del tiempo o método de Taylor, ver en Figura 4.20.

El método de Taylor se usa para obtener el tiempo de consolidación para un porcentaje de 90% de la muestra consolidada mediante la curva Deformación vs. \sqrt{t} .

FIGURA 4.20. MÉTODO GRÁFICO DE TAYLOR PARA t_{90}



Fuente: (Das, 2015)

A partir de la obtención de este tiempo se procede a obtener el coeficiente de consolidación, a partir de la siguiente ecuación:

$$C_v = \frac{T_v * H_{dr}^2}{t_{90}} \quad (4.21)$$

C_v : Coeficiente de consolidación.

T_v : Tiempo de consolidación, segundos

H_{dr} : Máxima distancia que recorre el agua en el ensayo, mm

Con uso de tablas resultado de la experimentación, para el 90% de consolidación en el presente método, se tiene $T_{90} = 0.848$ (Das, 2015), entonces se genera la Ec. 4.22, que simplemente es una variación de la Ec. 4.21.

$$C_v = \frac{0.848 * H_{dr}^2}{t_{90}} \quad (4.22)$$

Para los suelos arcillosos expansivos es de suma importancia analizar los asentamientos por consolidación primaria, la Ec. 4.23 indica en función de qué parámetro se encuentra desde su forma base:

$$S_p = H * \frac{\Delta e}{1 + e_o} \quad (4.23)$$

S_p : Asentamiento por consolidación primaria unidimensional, mm

H : Espesor de capa de arcilla saturada, mm

Δe : Variación del índice de vacíos

e_o : Índice de vacíos inicial

O la ecuación en su forma generalizada:

$$S_p = \frac{C_s * H}{1 + e_o} * \log\left(\frac{\sigma'_c}{\sigma'_o}\right) + \frac{C_c * H}{1 + e_o} * \log\left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'}{\sigma'_c}\right) \quad (4.24)$$

S_p : Asentamiento por consolidación primaria unidimensional, mm

H : Espesor de capa de arcilla saturada, mm

e_o : Índice de vacíos inicial

C_s : Índice de compresión

C_c : Índice de abultamiento

$\Delta\sigma'$: Variación de presiones, kg/cm²

σ'_c : Presión de preconsolidación de la masa de suelo, kg/cm²

σ'_o : Presión vertical efectiva, kg/cm²

Finalmente, para los índices de compresión C_s y de abultamiento C_c , se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log\left(\frac{\sigma_2'}{\sigma_1'}\right)} \quad (4.25)$$

C_c : Asentamiento por consolidación primaria unidimensional, mm

e_1, e_2 : Relaciones de vacíos al final de la consolidación

σ_1', σ_2' : Esfuerzos efectivos de vacíos al final de la consolidación, kg/cm²

$$C_c = \frac{e_3 - e_4}{\log\left(\frac{\sigma_4'}{\sigma_3'}\right)} \quad (4.26)$$

C_c : Asentamiento por consolidación primaria unidimensional, mm

e_3, e_4 : Relaciones de vacíos en la recarga de la consolidación

σ_3', σ_4' : Esfuerzos efectivos de vacíos en la recarga de la consolidación, kg/cm²

Se desarrolló el ensayo de consolidación en el laboratorio mediante la norma ASTM D 2435-11, fue aplicado para las muestras de suelo naturales 3, 4 y 5, dos especímenes por tipo de suelo. Un resumen de los resultados obtenidos se puede visualizar en las Tablas 4.20, 4.21 y 4.22 y con mayor detalle se muestra en el ANEXO 11, págs. 203-245.

TABLA 4.20. CONSOLIDACIÓN DE MUESTRA M3 - PROBETA 1 Y 2

MUESTRA	M3 (1)	M3 (2)	MUESTRA	M3 (1)	M3 (2)
DIÁMETRO (mm) =	50.00	50.00	ys (gr/cm ³) =	1.25	1.22
ÁREA (cm ²) =	19.63	19.63	wo (%) =	34.10	33.31
ALTURA (mm) =	20.00	20.00	wf (%) =	43.04	42.03
VOLUMEN (cm ³) =	39.27	39.27	Hs (mm) =	8.95	8.78
Gs =	2.78	2.78	Hv (mm) =	11.05	11.22
eo =	1.24	1.28	Vs (cm ³) =	17.57	17.24
T 90 =	0.85	0.85	Vv (cm ³) =	21.70	22.03
yh (gr/cm ³) =	1.67	1.63			

RESUMEN DE DATOS Y CALCULOS									
MUESTRA M3 ENSAYO 1					MUESTRA M3 ENSAYO 2				
ALTURA DE VACIOS	RELACION VACIOS	ALTURA PROMEDIO	t90	Cv t90	ALTURA DE VACIOS	RELACION VACIOS	ALTURA PROMEDIO	t90	Cv t90
Hv'	e'	(mm)	(seg)	(mm ² /seg)	Hv'	e'	(mm)	(seg)	(mm ² /seg)
11.054	1.236	18.791	27.04	2.768	11.218	1.277	19.183	20.25	3.853
8.636	0.965	17.354	22.09	2.890	9.584	1.091	18.184	21.16	3.313
8.18	0.914	16.815	11.56	5.185	9.220	1.05	17.746	12.25	5.450
4.558	0.845	16.135	7.29	7.570	8.707	0.991	17.121	6.76	9.193
6.819	0.762	15.321	5.75	8.639	7.971	0.908	16.341	7.29	7.765
5.931	0.663	15.094	13.69	3.528	7.147	0.814	16.139	7.84	7.043
6.364	0.711	15.545	31.56	1.633	7.566	0.862	16.605	28.09	2.081
6.833	0.764	15.491	1936.00	0.030	8.079	0.92	17.611	1681.00	0.039
8.256	0.923				9.579	1.091			

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

TABLA 4.21. CONSOLIDACIÓN DE MUESTRA M4 - PROEBETA 1 Y 2

MUESTRA	M4 (1)	M4 (2)	MUESTRA	M4 (1)	M4 (2)
DIÁMETRO (mm) =	65.00	65.00	yh (gr/cm ³) =	1.27	1.33
ÁREA (cm ²) =	33.18	33.18	wo (%) =	35.030	32.430
ALTURA (mm) =	20.00	20.00	wf (%) =	50.178	34.130
VOLUMEN (cm ³) =	66.37	66.37	Hs (mm) =	9.27	9.67
Gs =	2.747	2.747	Hv (mm) =	10.731	10.334
eo =	1.158	1.069	Vs (cm ³) =	30.76	32.08
T 90 =	0.848	0.848	Vv (cm ³) =	35.61	34.29
yh (gr/cm ³) =	1.719	1.758			

RESUMEN DE DATOS Y CALCULOS

MUESTRA M4 ENSAYO 1					MUESTRA M4 ENSAYO 2				
ALTURA DE VACIOS	RELACION VACIOS	ALTURA PROMEDIO	t ₉₀	Cv t ₉₀	ALTURA DE VACIOS	RELACION VACIOS	ALTURA PROMEDIO	t ₉₀	Cv t ₉₀
Hv'	e'	(mm)	(seg)	(mm ² /seg)	Hv'	e'	(mm)	(seg)	(mm ² /seg)
10.731	1.158	19.502	8.41	9.587	10.334	1.069	19.446	6.25	12.826
9.735	1.050	18.771	9.00	8.300	9.225	0.954	18.583	12.25	5.976
9.269	1.000	18.162	8.41	8.315	8.608	0.891	17.818	36.00	1.870
8.517	0.919	17.310	27.04	2.349	7.696	0.796	16.782	222.01	0.269
7.564	0.816	16.317	10.24	5.512	6.535	0.676	15.700	289.00	0.181
6.532	0.705	16.074	46.24	1.185	5.532	0.572	15.464	144.00	0.352
7.078	0.764	16.686	600.25	0.098	6.064	0.627	16.065	841.00	0.065
7.756	0.837	18.491	3906.25	0.019	6.734	0.697	18.049	0.00	-
10.687	1.153				10.031	1.038			

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

TABLA 4.22. CONSOLIDACIÓN DE MUESTRA M5 - PROEBETA 1 Y 2

MUESTRA	M5 (1)	M5 (2)	MUESTRA	M5 (1)	M5 (2)
DIÁMETRO (mm) =	50.00	50.00	yh (gr/cm ³) =	1.24	1.28
ÁREA (cm ²) =	19.63	19.63	wo (%) =	34.189	32.595
ALTURA (mm) =	20.00	20.00	wf (%) =	41.848	38.782
VOLUMEN (cm ³) =	39.27	39.27	Hs (mm) =	8.91	9.16
Gs =	2.784	2.784	Hv (mm) =	11.091	10.835
eo =	1.245	1.182	Vs (cm ³) =	17.49	18.00
T 90 =	0.848	0.848	Vv (cm ³) =	21.78	21.27
yh (gr/cm ³) =	1.664	1.692			

RESUMEN DE DATOS Y CALCULOS

MUESTRA M5 ENSAYO 1					MUESTRA M5 ENSAYO 2				
ALTURA DE VACIOS	RELACION VACIOS	ALTURA PROMEDIO	t ₉₀	Cv t ₉₀	ALTURA DE VACIOS	RELACION VACIOS	ALTURA PROMEDIO	t ₉₀	Cv t ₉₀
Hv'	e'	(mm)	(seg)	(mm ² /seg)	Hv'	e'	(mm)	(seg)	(mm ² /seg)
11.091	1.245	19.494	7.84	10.275	10.835	1.182	19.472	7.84	10.253
10.078	1.131	18.701	4.00	18.536	9.779	1.067	18.571	4.41	16.579
9.506	1.067	17.908	6.25	10.878	9.033	0.986	17.728	24.01	2.775
8.492	0.953	16.940	9.61	6.330	8.092	0.883	16.777	26.01	2.294

TABLA 4.22. CONTINUACIÓN

7.569	0.850	16.050	146.41	0.373	7.131	0.778	15.863	262.44	0.203
6.712	0.753	15.871	14.44	3.698	6.265	0.684	15.684	249.64	0.209
7.211	0.809	16.430	784.00	0.073	6.773	0.739	16.254	784.00	0.071
7.831	0.879	17.606	0.00	0.000	7.404	0.808	17.476	0.00	0.000
9.563	1.073				9.218	1.006			

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

4.6. ENSAYOS DE SUELO TRATADO CON CENIZA VOLCÁNICA

En este subcapítulo se procura presentar apenas el resumen de los resultados de cada ensayo realizado en el suelo ya con la ceniza volcánica, recopilando la vasta información generada que, posteriormente su análisis es efectuado en el apartado 5.1 con los valores promedios de cada ensayo.

4.6.1. ENSAYOS FÍSICOS

4.6.1.1. Contenido de humedad

Al realizar las mezclas de suelo y ceniza, ambos materiales se encontraban en estado seco, lo cual se confirma en la medición del contenido de humedad de la Tabla 4.23 (ANEXO 12, págs. 246-264).

TABLA 4.23. CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL DE MUESTRAS DOSIFICADAS

CONTENIDO DE HUMEDAD								
NORMA: INEN 690 ASTM D 2216-10								
MUESTRA	% DE CENIZA	PRUEBA No.	CÁPSUL A No.	PESO HÚMEDO (gr)	PESO SECO (gr)	PESO CÁPSULA (gr)	HUMEDAD NATURAL (%)	w PROMEDIO (%)
M3	10%	1	S23	59.91	59.72	9.62	0.38	0
		2	R13	46.89	46.76	9.47	0.35	
	20%	1	N12	47.21	47.01	9.42	0.53	0
		2	S14	41.87	41.69	9.27	0.56	
	30%	1	S17	47.32	47.18	9.31	0.37	0
		2	S34G	42.76	42.64	9.21	0.36	
M4	10%	1	S65	45.31	45.21	9.25	0.28	0
		2	S10	46.83	46.71	9.09	0.32	
	20%	1	S21	37.43	37.31	9.09	0.43	0
		2	MG24	38.54	38.43	9.41	0.38	
	30%	1	S67	36.43	36.32	9.52	0.41	0
		2	S21	38.65	38.56	9.31	0.31	

TABLA 4.23. CONTINUACIÓN

M5	10%	1	S32	43.12	43.01	10.01	0.33	0
		2	C5	41.76	41.65	9.99	0.35	
	20%	1	17	42.65	42.54	9.27	0.33	0
		2	R13	43.54	43.42	9.36	0.35	
	30%	1	S34	48.65	48.51	10.09	0.36	0
		2	S67	47.53	47.41	9.83	0.32	

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

4.6.1.2. Clasificación por SUCS

4.6.1.2.1. Límite Líquido

Se valoró los cambios del límite líquido por la ceniza volcánica en el suelo, resultantes en la Tabla 4.24 (ANEXO 12, págs. 246-264), realizando dos ensayos por muestra.

TABLA 4.24. LÍMITE LIQUIDO DE MUESTRAS DOSIFICADAS

LÍMITE LÍQUIDO									
NORMA: ASTM D 4318-10									
MUESTRA	% DE CENIZA	PRUEBA No.	CÁPSULA No.	No. GOLPES	PESO HÚMEDO (gr)	PESO SECO (gr)	PESO CÁPSULA (gr)	% HUMEDAD	% HUMEDAD A 25 GOLPES
M3	10%	1	C6	33	15.46	13.10	9.88	73.29	76
			L114	27	15.07	12.70	9.55	75.24	
			A006	19	16.02	13.40	10.05	78.21	
		2	M55	32	13.54	11.90	9.58	70.69	73
			E1	25	15.31	12.90	9.65	74.15	
			J10R	16	15.86	13.40	10.20	76.87	
	20%	1	J13R	35	15.83	13.50	9.86	63.83	68
			L10	25	16.33	13.84	10.10	66.49	
			L122	16	18.65	15.05	10.28	75.32	
		2	R28	35	16.46	14.26	10.64	60.68	65
			L105	26	15.35	13.20	9.86	64.32	
			D17	23	16.16	13.43	9.27	65.47	
30%	1	N5	35	14.60	12.60	9.30	60.61	65	
		J13	29	16.04	13.60	9.80	64.21		
		56	21	15.62	13.40	10.06	66.47		
	2	J12R	31	14.83	13.00	9.87	58.47	62	
		MG16	26	14.60	12.40	8.87	62.32		
		D19	22	14.67	12.60	9.36	63.89		
M4	10%	1	J10R	35	14.70	12.90	10.20	66.67	68
			D15	21	14.05	12.40	10.00	68.75	
			A006	17	15.34	13.00	9.70	70.91	
	2	MG20	35	15.59	13.50	10.37	66.77	68	
		L68	23	13.73	12.10	9.71	68.20		
		M19	19	13.45	11.80	9.42	69.33		
20%	1	L97	30	13.61	12.10	9.69	62.66	65	
		L90	27	14.73	12.80	9.74	63.07		
		R15	18	14.45	12.70	10.24	71.14		
	2	R27	35	17.22	14.70	10.62	61.76	68	
		C6	25	15.24	13.10	9.87	66.25		
		J20R	21	14.31	12.10	9.06	72.70		

TABLA 4.24. CONTINUACIÓN

M5	30%	1	N3	35	13.40	11.85	9.30	60.72	64
			M55	24	14.80	12.73	9.50	64.29	
			J10R	16	16.13	13.66	10.10	69.52	
		2	D11	35	14.62	12.62	9.52	64.36	
			N25	23	14.95	12.81	9.62	67.08	
			A006	15	15.87	13.49	10.02	68.73	
	10%	1	C6	34	14.79	12.97	9.87	58.81	60
			L114	21	14.55	12.65	9.55	61.24	
			J13R	17	16.26	13.82	9.86	61.82	
		2	J12R	35	13.60	12.21	9.80	57.68	
			J20R	27	13.70	11.95	9.00	59.38	
			D19	17	14.10	12.24	9.30	63.21	
20%	1	M34	33	15.54	13.40	9.50	54.79	59	
		L21	27	15.72	13.40	9.38	57.54		
		M25	18	14.79	12.90	9.93	63.40		
	2	L10	29	17.05	14.60	10.08	54.20		
		L100	23	15.42	13.40	9.86	57.01		
		N9	20	17.04	14.50	10.20	59.07		
30%	1	L76	29	15.86	13.80	9.74	50.74	51	
		D11	26	14.45	12.80	9.53	50.46		
		J20R	15	13.63	12.00	9.06	55.44		
	2	J5R	35	14.70	13.10	9.70	47.09		
		L37	26	14.70	13.20	10.20	50.00		
		N25	20	14.90	13.10	9.60	51.43		

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

4.6.1.2.2. Límite Plástico

De igual forma, para el límite plástico se utilizaron dos especímenes para cada ensayo, presentados en la Tabla 4.25 (ANEXO 12, págs. 246-264).

TABLA 4.25. LÍMITE PLÁSTICO DE MUESTRAS DOSIFICADAS

LÍMITE PLÁSTICO										
NORMA: ASTM D 4318-10										
MUESTRA	% DE CENIZA	PRUEBA No.	CÁPSULA No.	PESO HÚMEDO (gr)	PESO SECO (gr)	PESO CÁPSULA (gr)	% HUMEDAD	% HUMEDAD PROMEDIO		
M3	10%	1	S76	6.60	6.20	5.30	44.44	44		
			S26	6.70	6.30	5.40	44.44			
		2	N23	6.55	6.14	5.21	44.09			
			J19M	6.49	6.12	5.28	44.05			
		20%	1	S89	6.74	6.30	5.40		48.89	45
				S38	6.90	6.40	5.20		41.67	
	2	S78	6.71	6.26	5.30	46.88	45			
		S26	6.84	6.43	5.50	44.09				
	30%	1	S71	7.10	6.60	5.40	41.67	46		
			15	7.00	6.50	5.50	50.00			
		2	S65	6.98	6.50	5.40	43.64	44		
			S78	6.87	6.45	5.50	44.21			
10%		1	S53	6.55	6.21	5.13	31.48	32		
			S9	6.38	6.08	5.16	32.61			
2	S76	6.56	6.25	5.31	32.98	33				
	S84	6.40	6.12	5.25	32.18					
M4	20%	1	S136	6.90	6.40	5.30	45.45	35		
			S54	6.80	6.50	5.30	25.00			
	2	S65	6.80	6.30	5.20	45.45	36			
		S67	6.70	6.40	5.30	27.27				

TABLA 4.25. CONTINUACIÓN

30%	1	S48	6.80	6.40	5.40	40.00	38
		S33	6.70	6.30	5.20	36.36	
	2	S65	6.70	6.30	5.30	40.00	38
		S74	6.60	6.20	5.10	36.36	
10%	1	18	6.70	6.39	5.30	28.21	25
		S62	6.70	6.46	5.30	21.21	
	2	S68	6.60	6.28	5.20	29.63	26
		S35	6.60	6.37	5.30	21.50	
20%	1	12	6.80	6.52	5.30	22.85	36
		S20	7.30	6.60	5.20	49.79	
	2	S34	6.70	6.40	5.40	30.00	30
		S56	6.90	6.50	5.20	30.77	
30%	1	S56	6.80	6.45	5.15	26.92	34
		S21	6.90	6.44	5.30	40.97	
	2	S49	6.80	6.61	5.70	20.88	31
		S67	6.90	6.38	5.10	40.63	

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

4.6.1.2.3. Índice de Plasticidad

El índice de plasticidad, resultado de la diferencia del LL y LP para las muestras dosificadas se exponen en la Tabla 4.26 (ANEXO 12, págs. 246-264).

TABLA 4.26. ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE MUESTRAS DOSIFICADAS

Muestra	Porcentaje de ceniza	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IP (%) Promedio
M3	10%	76	44	32	30
		73	44	29	
	20%	68	45	23	21
		65	45	20	
	30%	65	46	19	19
		62	44	18	
M4	10%	68	32	36	36
		68	33	35	
	20%	65	35	30	31
		68	36	32	
	30%	64	38	26	27
		66	38	28	
M5	10%	60	25	36	35
		60	26	34	
	20%	59	36	23	24
		56	30	26	
	30%	51	34	17	18
		50	31	19	

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

4.6.1.2.4. Índice de Liquidez

Para medir el índice de liquidez se utilizó los valores promedios tanto de contenido de humedad, como de límite líquido y plástico, consiguiendo valores negativos en todos los casos, ver Tabla 4.27.

TABLA 4.27. ÍNDICE DE LIQUIDEZ DE MUESTRAS DOSIFICADAS

Muestra	Porcentaje de ceniza	w (%)	LL (%)	LP (%)	Índice de Liquidez
M3	10%	0	75	44	-1.45
	20%	0	67	45	-2.13
	30%	0	64	45	-2.38
M4	10%	0	68	33	-0.90
	20%	0	67	36	-1.15
	30%	0	65	38	-1.39
M5	10%	0	60	25	-0.71
	20%	0	58	33	-1.37
	30%	0	51	32	-1.75

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

4.6.1.3. Actividad

Un aspecto importante es que el ensayo de granulometría por hidrómetro (ASTM D 7928-17) no permite la medición de suelos con materiales cementantes, por lo que no fue posible realizar tal procedimiento y como consecuencia, fue necesario calcular el porcentaje que pasa el tamiz N° 200 a partir de las muestras naturales 3, 4 y 5, para los diferentes porcentajes de ceniza, distribuyendo el % de arcilla según las muestras patrón. Se observa el resultado en la Tabla 4.28 (ANEXO 13, págs. 265-283), que contiene principalmente la actividad de los suelos dosificados.

TABLA 4.28. ACTIVIDAD DE MUESTRAS DOSIFICADAS

Muestra	Porcentaje de ceniza	Pasa N°200 (%)	IP (%)	% Arcilla	Actividad	Clasificación
M3	10%	93.8	30	41.61	0.721	ALTA
	20%	94.5	21	37.33	0.572	MEDIA
	30%	95.1	19	32.50	0.581	MEDIA
M4	10%	99.2	36	47.09	0.754	ALTA
	20%	99.3	31	42.11	0.741	ALTA
	30%	99.4	27	36.98	0.735	ALTA
M5	10%	96.1	35	45.06	0.784	ALTA
	20%	96.5	24	40.08	0.597	MEDIA
	30%	97.0	18	35.26	0.515	MEDIA

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

4.6.1.4. Índice de expansión

Esta propiedad física de los suelos, fue medida validando cada resultado con dos muestras dosificadas para cada ensayo, tal y como se observa en la Tabla 4.29 (ANEXO 14, págs. 284-320).

TABLA 4.29. ÍNDICE DE EXPANSIÓN DE MUESTRAS DOSIFICADAS

Muestra	Porcentaje de ceniza	Prueba No.	D1 (mm)	D2 (mm)	Altura (mm)	ΔH (mm)	Índice de expansión	IE Promedio	Clasificación
M3	10%	1	-5.05	-3.08	19.40	1.97	101.29	101	ALTA
			-5.05	-3.10	19.40	1.95	100.52		
		2	-3.03	-1.07	19.40	1.96	100.98		
			-3.03	-1.07	19.60	1.96	99.74		
	20%	1	-5.22	-4.05	19.40	1.17	60.31	62	MEDIA
			-5.16	-3.92	19.60	1.24	63.16		
		2	-3.12	-1.94	19.40	1.17	60.52		
			-3.13	-1.89	19.60	1.24	63.11		
	30%	1	-4.07	-3.01	19.40	1.06	54.38	57	MEDIA
			-4.09	-2.91	19.60	1.17	59.90		
		2	-3.02	-1.92	19.40	1.10	56.65		
			-3.02	-1.89	19.60	1.13	57.55		
M4	10%	1	-4.09	-2.73	19.40	1.36	69.85	79	MEDIA
			-4.05	-2.30	19.60	1.75	89.18		
		2	-3.17	-1.73	19.40	1.44	74.07		
			-3.12	-1.54	19.60	1.59	80.92		
	20%	1	-3.09	-1.76	20.00	1.33	66.65	68	MEDIA
			-3.27	-1.89	19.90	1.39	69.70		
		2	-3.02	-1.67	20.00	1.35	67.65		
			-3.02	-1.66	19.90	1.36	68.44		
	30%	1	-5.03	-3.84	19.40	1.19	61.29	60	MEDIA
			-5.02	-3.91	19.60	1.11	56.73		
		2	-3.33	-2.14	19.40	1.19	61.24		
			-3.30	-2.06	19.60	1.24	63.16		
M5	10%	1	-4.02	-2.78	19.40	1.24	63.81	57	MEDIA
			-4.05	-3.08	19.60	0.97	49.39		
		2	-3.02	-1.89	19.40	1.13	58.25		
			-3.04	-1.93	19.60	1.11	56.79		
	20%	1	-5.03	-4.02	19.40	1.01	52.11	52	MEDIA
			-5.05	-4.03	19.60	1.01	51.68		
		2	-3.03	-2.04	19.40	0.99	51.19		
			-3.02	-2.01	19.60	1.00	51.17		
	30%	1	-5.29	-4.42	20.00	0.87	43.45	48	BAJA
			-5.02	-3.98	19.90	1.04	52.26		
		2	-3.02	-2.07	20.00	0.95	47.65		
			-3.04	-2.12	19.90	0.92	46.23		

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

4.6.1.5. Densidad de sólidos

Asimismo, para la densidad de sólidos con la presencia de ceniza volcánica se hizo con dos muestras por cada ensayo, obteniendo valores muy similares visualizados en la Tabla 4.30 (ANEXO 15, págs. 321-330).

TABLA 4.30. DENSIDAD DE SÓLIDOS DE MUESTRAS DOSIFICADAS

Muestra	Porcentaje de ceniza	Gs	Gs Promedio
M3	10%	2.597	2.60
		2.594	
	20%	2.569	2.56
		2.555	
	30%	2.550	2.54
		2.537	
M4	10%	2.554	2.56
		2.559	
	20%	2.536	2.53
		2.530	
	30%	2.516	2.51
		2.512	
M5	10%	2.662	2.66
		2.652	
	20%	2.656	2.65
		2.652	
	30%	2.636	2.63
		2.631	

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

4.6.1.6. Permeabilidad

A diferencia de las muestras naturales, cuando se tuvo la mezcla con ceniza para el ensayo de permeabilidad, no se realizó por el método de carga variable pues se utilizó el método de carga constante 3 kg/cm² aportado por un compresor y las muestras fueron hechas con los resultados de al menos el 95% de compactación del suelo natural. Los resultados están en la Tabla 4.31 (ANEXO 16, págs. 331-349).

TABLA 4.31. PERMEABILIDAD DE SÓLIDOS DE MUESTRAS DOSIFICADAS

Muestra	Porcentaje de ceniza	Coefficiente de permeabilidad K	Clasificación	Relación de vacíos e	e promedio
M3	10%	1.00E-09	No permeable	0.789	0.79
		1.00E-09	No permeable	0.783	
	20%	1.00E-09	No permeable	0.661	0.66
		1.00E-09	No permeable	0.667	
	30%	1.00E-09	No permeable	0.646	0.65
		1.00E-09	No permeable	0.654	
M4	10%	1.00E-09	No permeable	0.804	0.80
		1.00E-09	No permeable	0.804	
	20%	1.00E-09	No permeable	0.579	0.58
		1.00E-09	No permeable	0.577	
	30%	1.00E-09	No permeable	0.493	0.50
		1.00E-09	No permeable	0.498	
M5	10%	1.00E-09	No permeable	0.744	0.74
		1.00E-09	No permeable	0.743	
	20%	1.00E-09	No permeable	0.565	0.57
		1.00E-09	No permeable	0.571	
	30%	1.00E-09	No permeable	0.517	0.55
		1.00E-09	No permeable	0.579	

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

4.6.2. ENSAYOS MECÁNICOS

4.6.2.1. Corte Directo

Los ensayos de las muestras dosificadas fueron realizados de igual manera que las naturales, es decir, con los tres especímenes para los esfuerzos normales de 0.5, 1.0 y 2.0 kg/cm², respectivamente, consiguiendo los resultados en la Tabla 4.32 (ANEXO 17, págs. 350-404). Además, en la citada tabla se indica la densidad seca de los ejemplares, que siempre se hace referencia a los resultados de compactación por lo menos de un 95%.

TABLA 4.32. CORTE DIRECTO DE MUESTRAS DOSIFICADAS

Muestra	Porcentaje de ceniza	Ys (g/cm ³)	θ (°)	θ (°) Promedio	c (kg/cm ²)	c (kg/cm ²) Promedio
M3	10%	1.53	38.69	38.3	1.84	1.84
		1.50	37.93		1.83	
	20%	1.55	40.61	40.6	1.95	1.94
		1.52	40.61		1.93	
	30%	1.56	49.69	48.2	1.91	1.94
		1.52	46.75		1.96	

TABLA 4.32. CONTINUACIÓN

M4	10%	1.62	39.69	39.2	1.88	1.95
		1.63	38.68		2.02	
	20%	1.65	44.27	45.7	2.15	2.20
		1.65	47.14		2.25	
	30%	1.72	48.73	49.6	2.18	2.21
		1.68	50.50		2.23	
M5	10%	1.60	36.91	37.8	1.84	1.83
		1.60	38.68		1.82	
	20%	1.63	40.41	41.1	1.89	1.93
		1.64	41.80		1.98	
	30%	1.61	48.47	49.9	1.99	1.98
		1.66	51.41		1.98	

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

4.6.2.2. Consolidación

Finalmente, para la medición de la consolidación de las mezclas con ceniza de arcillas expansivas, se ensayó un espécimen por cada porcentaje diferente, los cuales fueron también remoldeados como se especificó anteriormente. En resumen, se presenta los resultados en la Tabla 4.33 (ANEXO 18, págs. 405-468).

TABLA 4.33. CONSOLIDACIÓN DE MUESTRAS DOSIFICADAS

Muestra	Porcentaje de ceniza	γ_s (g/cm ³)	w (%)	σ'_c (kg/cm ²)	Cv (mm ² /seg)	e_o inicial	Cc	Cs
M3	10%	1.45	27	2.30	0.069	0.79	0.316	0.108
	20%	1.54	27	2.70	0.073	0.66	0.266	0.100
	30%	1.55	28	3.20	0.076	0.65	0.233	0.098
M4	10%	1.43	25	2.40	0.069	0.79	0.412	0.101
	20%	1.61	21	2.90	0.071	0.58	0.216	0.078
	30%	1.68	21	3.20	0.073	0.50	0.186	0.070
M5	10%	1.52	19	2.90	0.109	0.75	0.302	0.080
	20%	1.69	20	2.90	0.164	0.57	0.193	0.060
	30%	1.73	18	3.20	0.206	0.52	0.189	0.060

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Este capítulo se desarrolla analizando los resultados de cada ensayo realizado para las muestras naturales y las muestras con dosificaciones del 10, 20 y 30% en peso seco de ceniza volcánica, con los promedios de los subcapítulos 4.5 y 4.6. Se examina la influencia del agente químico estabilizante en tres muestras naturales diferentes de arcillas expansivas, respecto a su comportamiento físico-mecánico como parámetro de medición de sus propiedades más relevantes.

5.1.1. LÍMITES DE CONSISTENCIA

Existen cambios importantes en el límite líquido (LL), límite plástico (LP) e índice de plasticidad (IP) para las muestras analizadas. A continuación, se efectúa una comparación de estos resultados expuestos en la Tabla 5.1.

TABLA 5.1. RESULTADOS DE LÍMITES DE CONSISTENCIA Y CONTENIDO DE HUMEDAD

Muestra	Porcentaje de ceniza	w (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
M3	0%	20	89	37	52
	10%	0	75	44	30
	20%	0	67	45	21
	30%	0	64	45	19
M4	0%	20	83	30	53
	10%	0	68	33	36
	20%	0	67	36	31
	30%	0	65	38	27
M5	0%	15	67	24	42
	10%	0	60	25	35
	20%	0	58	33	24
	30%	0	51	32	18

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

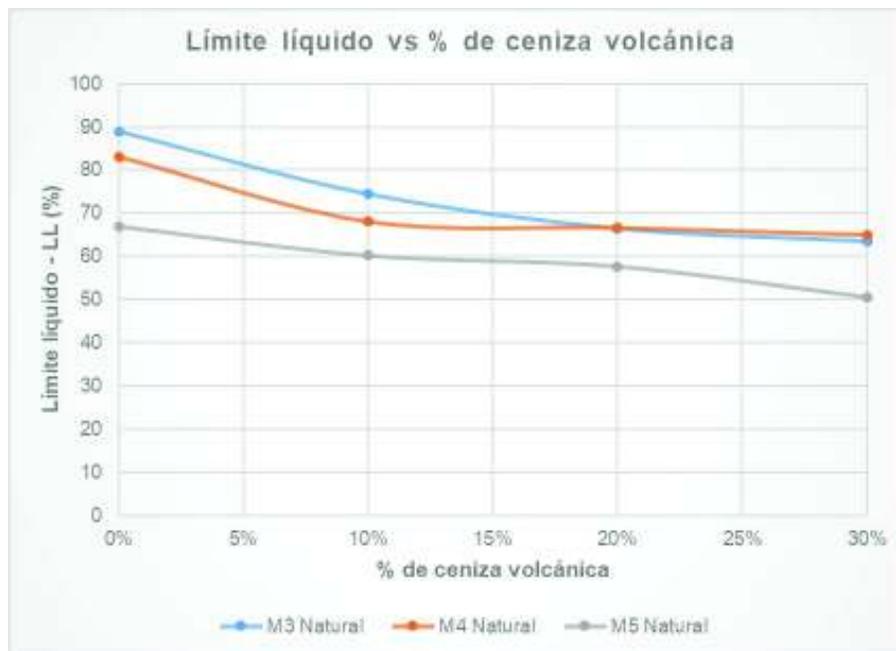
Se evidencia alteraciones no lineales, sino asintóticas en los límites estudiados por la presencia de la ceniza como se observa en las Gráficas 5.1, 5.2 y 5.3. Para

el límite líquido hay una tendencia a la reducción según se aumenta el porcentaje de estabilizante. Sin embargo, el límite plástico varía de forma ascendente a medida que se aumenta la ceniza y finalmente, el índice de plasticidad, que es la diferencia aritmética entre los límites líquido y plástico, disminuye. Para los tres límites analizados, se observa la influencia marcada del aditivo en los porcentajes del 10 y 20% con respecto al suelo natural (0%), pero pierde su eficacia de alteración cuando llega al 30% como se distingue en las Gráficas 5.4, 5.5 y 5.6.

5.1.1.1. Límite líquido (LL)

Para el límite líquido, se visualiza en la Gráfica 5.1., que para las 3 muestras (3, 4 y 5) se obtuvo una tendencia descendente de éste límite. Para los porcentajes de 0, 10, 20 y 30% de ceniza se aprecia la siguiente variación en los suelos. En el caso de la M3, varía con valores de 89 a 64%. Para la muestra M4, el límite fluctúa entre el 83 a 65% y, por último, para la muestra M5, los valores van en el orden de 67 a 51%.

GRÁFICA 5.1. LÍMITE LÍQUIDO SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA

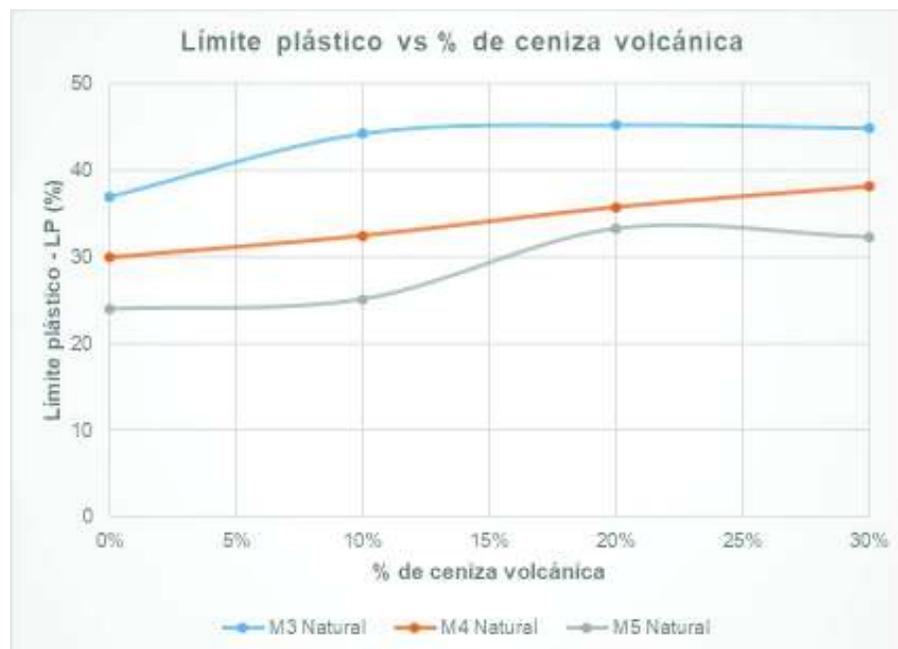


Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

5.1.1.2. Límite plástico (LP)

Para el límite plástico, representado en la Gráfica 5.2, se observa un comportamiento opuesto al límite líquido para las 3 muestras, debido a que se genera una tendencia ascendente. Para los porcentajes de 0, 10, 20 y 30% de ceniza se aprecia la siguiente variación en los suelos. En el caso de la M3, varía con valores de 37 a 45%. Para la muestra M4, el límite fluctúa entre el 30 a 38% y, por último, para la muestra M5, los valores van en el orden de 24 a 32%.

GRÁFICA 5.2. LÍMITE PLÁSTICO SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA

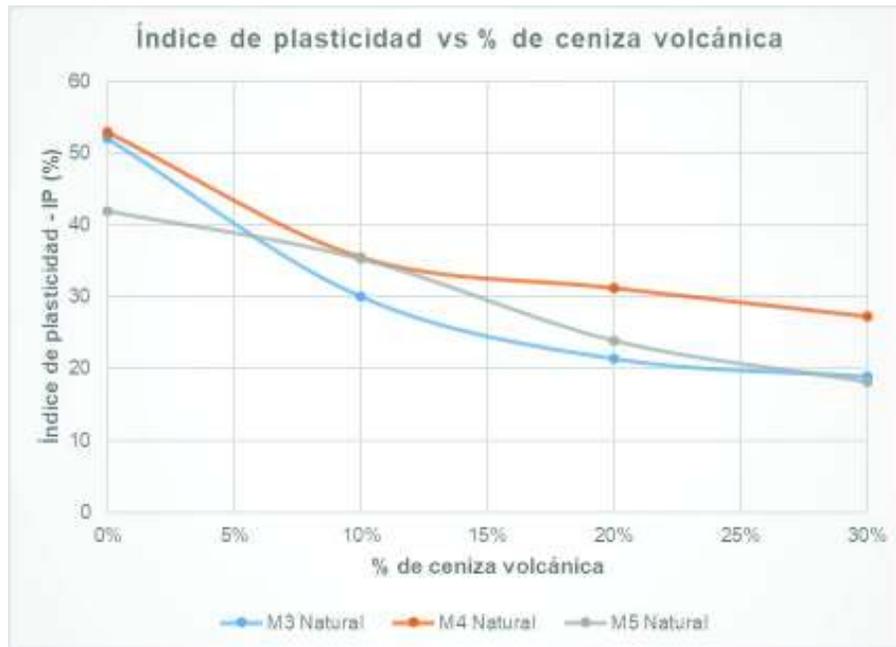


Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

5.1.1.3. Índice de plasticidad (IP)

En este apartado, en el análisis de índice de plasticidad, reproducido en la Gráfica 5.3, para las 3 muestras existe una tendencia descendente. Para los porcentajes de 0, 10, 20 y 30% de ceniza se aprecia la siguiente variación en los suelos. En el caso de la M3, varía con valores de 52 a 19%. Para la muestra M4, el límite fluctúa entre el 53 a 27% y, por último, para la muestra M5, los valores van en el orden de 42 a 18%, respectivamente.

GRÁFICA 5.3. ÍNDICE DE PLASTICIDAD SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA



Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

5.1.1.4. Variaciones del LL, LP e IP

Al finalizar los análisis de los resultados de los ensayos de límites de consistencia, se obtiene que la dosificación óptima es del 20% de ceniza volcánica.

TABLA 5.2. PORCENTAJE DE VARIACIÓN DE LÍMITES DE CONSISTENCIA SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA

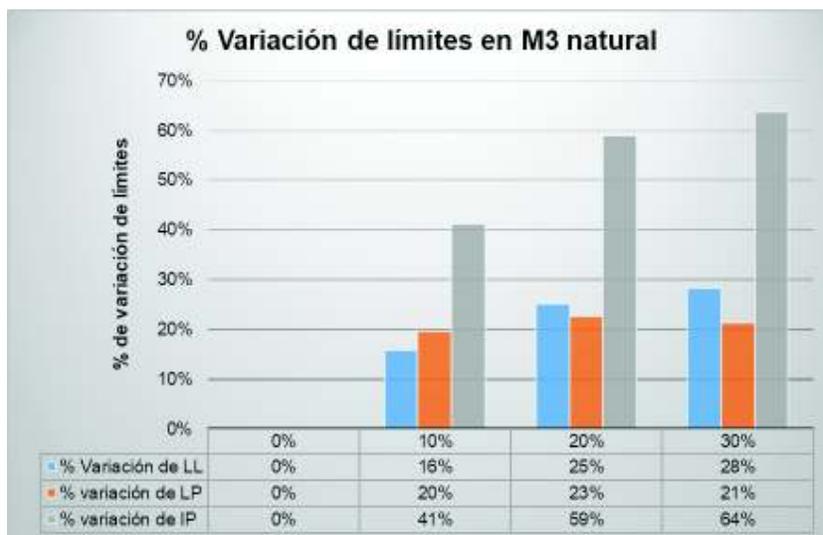
Muestra	Porcentaje de ceniza	% de variación de		
		Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
M3	0%	0%	0%	0%
	10%	16%	20%	41%
	20%	25%	23%	59%
	30%	28%	21%	64%
M4	0%	0%	0%	0%
	10%	18%	8%	32%
	20%	19%	19%	41%
	30%	21%	27%	48%
M5	0%	0%	0%	0%
	10%	10%	5%	16%
	20%	14%	39%	42%
	30%	24%	35%	56%

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

A partir del 20% de dosificación se observa que empieza una tendencia de curva estabilizada para los límites de consistencia, puesto que los porcentajes de variación, expuestos en la Tabla 5.2, no incrementan o disminuyen en forma representativa respecto a los suelos naturales.

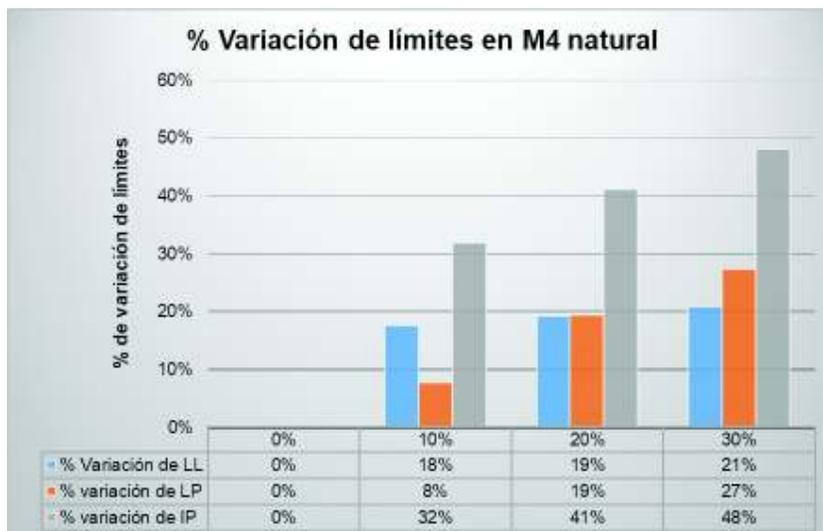
Gráficamente se colocan los porcentajes de variación de los LL, LP e IP para los suelos M3, M4 y M5, en la Gráfica 5.4, 5.5 y 5.6, respectivamente.

GRÁFICA 5.4. PORCENTAJE DE VARIACIÓN DE LÍMITES DE CONSISTENCIA PARA EL SUELO M3 NATURAL



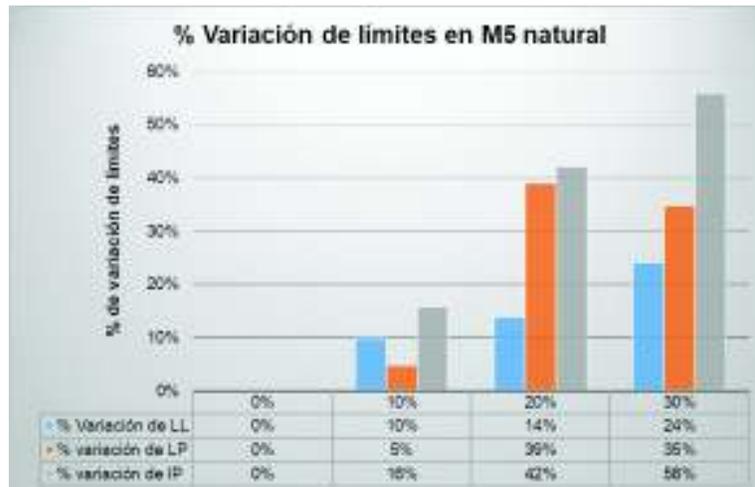
Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

GRÁFICA 5.5. PORCENTAJE DE VARIACIÓN DE LÍMITES DE CONSISTENCIA PARA EL SUELO M4 NATURAL



Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

GRÁFICA 5.6. PORCENTAJE DE VARIACIÓN DE LÍMITES DE CONSISTENCIA PARA EL SUELO M5 NATURAL



Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

5.1.1.5. Índice de liquidez (IL)

Cuando se tienen suelos con contenido de humedad menores al límite plástico, es común tener el índice de liquidez con valores inferiores a uno o negativos como en depósitos con suelos muy sobreconsolidados o en este caso de estudio, tal y como se visualiza en la Tabla 5.3, dado que el índice de liquidez es la relación entre la diferencia del contenido de humedad y el límite plástico con el índice de plasticidad, es decir, Ec. 4.4.

TABLA 5.3. RESULTADOS DE ÍNDICES DE LIQUIDEZ SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA

Muestra	Porcentaje de ceniza	Índice de Liquidez
M3	0%	-0.32
	10%	-1.45
	20%	-2.13
	30%	-2.38
M4	0%	-0.19
	10%	-0.90
	20%	-1.15
	30%	-1.39
M5	0%	-0.22
	10%	-0.71
	20%	-1.37
	30%	-1.75

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

5.1.2. ACTIVIDAD

Según el análisis de la actividad de los suelos presentes en la Tabla 5.4, se encuentra una reducción de hasta dos niveles en la escala de clasificación (de muy alta a media) una vez aplicado el agente químico de ceniza volcánica en distintos porcentajes. La disminución de la actividad se justifica por la disminución del índice plástico presente en los suelos y también, la reducción del porcentaje de la fracción del tamaño de arcilla, debido a que las partículas de ceniza empiezan a ocupar los espacios del suelo.

TABLA 5.4. RESULTADOS DE PORCENTAJE PASANTE DEL N°200 Y ACTIVIDAD SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA

Muestra	Porcentaje de ceniza	Pasa N°200 (%)	IP (%)	% Arcilla	Actividad	Clasificación
M3	0%	93.1	52	44.00	1.182	MUY ALTA
	10%	93.8	30	41.61	0.721	ALTA
	20%	94.5	21	37.33	0.572	MEDIA
	30%	95.1	19	32.50	0.581	MEDIA
M4	0%	99.1	53	49.75	1.065	MUY ALTA
	10%	99.2	36	47.09	0.754	ALTA
	20%	99.3	31	42.11	0.741	ALTA
	30%	99.4	27	36.98	0.735	ALTA
M5	0%	95.7	42	47.52	0.884	ALTA
	10%	96.1	35	45.06	0.784	ALTA
	20%	96.5	24	40.08	0.597	MEDIA
	30%	97.0	18	35.26	0.515	MEDIA

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

5.1.3. ÍNDICE DE EXPANSIÓN

Otro parámetro de caracterización de la expansión de suelos arcillosos, es el llamado índice de expansión que se encuentra descrito en la Tabla 5.5. Se descubre que es posible la reducción de hasta tres niveles en la escala de clasificación de este ensayo (de MUY ALTA a BAJA) con el aditivo de estudio. Para los porcentajes de 0, 10, 20 y 30% de ceniza se aprecia la siguiente variación en los suelos. En el caso de la M3, varía con valores de 176 a 57. Para la muestra M4, el límite fluctúa entre el 136 a 60, y, por último, para la muestra M5, los valores van en el orden de 83 a 48.

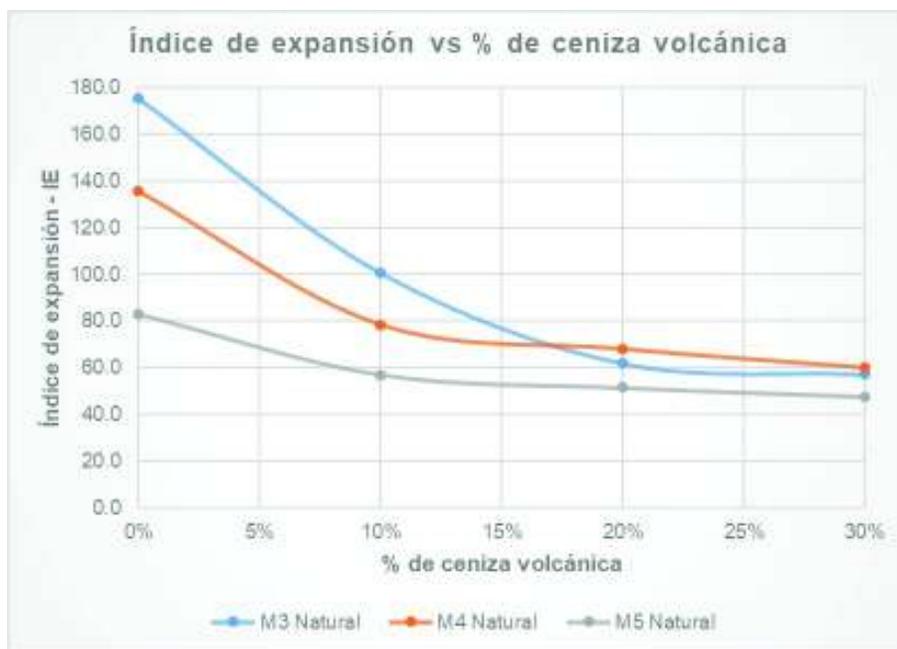
TABLA 5.5. RESULTADOS DEL ÍNDICE DE EXPANSIÓN Y SU CLASIFICACIÓN SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA

Muestra	Porcentaje de ceniza	Índice de Expansión	% de reducción	Clasificación
M3	0%	176	0%	MUY ALTA
	10%	101	43%	ALTA
	20%	62	65%	MEDIA
	30%	57	67%	MEDIA
M4	0%	136	0%	MUY ALTA
	10%	79	42%	MEDIA
	20%	68	50%	MEDIA
	30%	60	56%	MEDIA
M5	0%	83	0%	MEDIA
	10%	57	31%	MEDIA
	20%	52	38%	MEDIA
	30%	48	42%	BAJA

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

Se presenta en la Gráfica 5.7, el índice de expansión según el porcentaje de ceniza para los tres diferentes suelos. Observándose que existe una marcada convergencia del índice de expansión cuando se coloca del 20 al 30% de aditivo, es decir, a este intervalo, se le podría clasificar como máximo de uso en la práctica al marcar una tendencia constante.

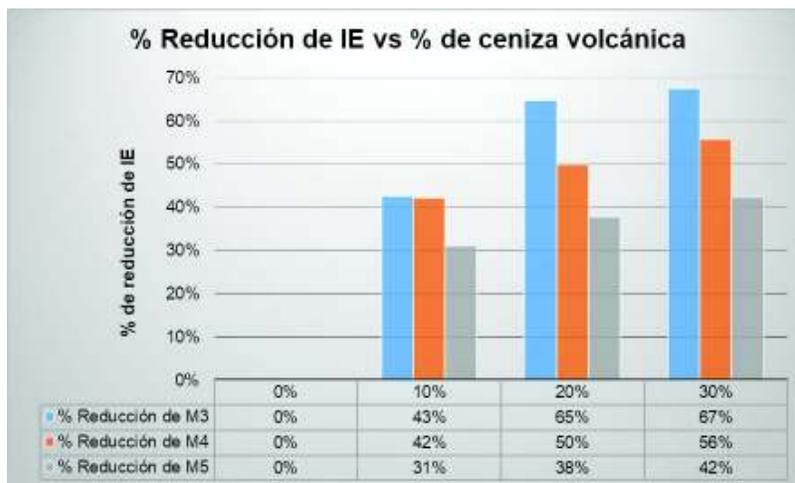
GRÁFICA 5.7. ÍNDICE DE EXPANSIÓN SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA



Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

En la Gráfica 5.8, se justifica en porcentajes la baja reducción del índice de expansión que se demuestra en el intervalo del 20 al 30% de aditivo como máximo de uso.

GRÁFICA 5.8. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DEL ÍNDICE DE EXPANSIÓN PARA LOS SUELOS M3, M4 Y M5 NATURALES



Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

5.1.4. DENSIDAD DE SÓLIDOS

La propiedad física de densidad de sólidos es de suma importancia al momento de la caracterización de suelos, los tres suelos naturales estudiados entran en el rango típico de suelos arcillosos de alta plasticidad, representado en la Tabla 5.6.

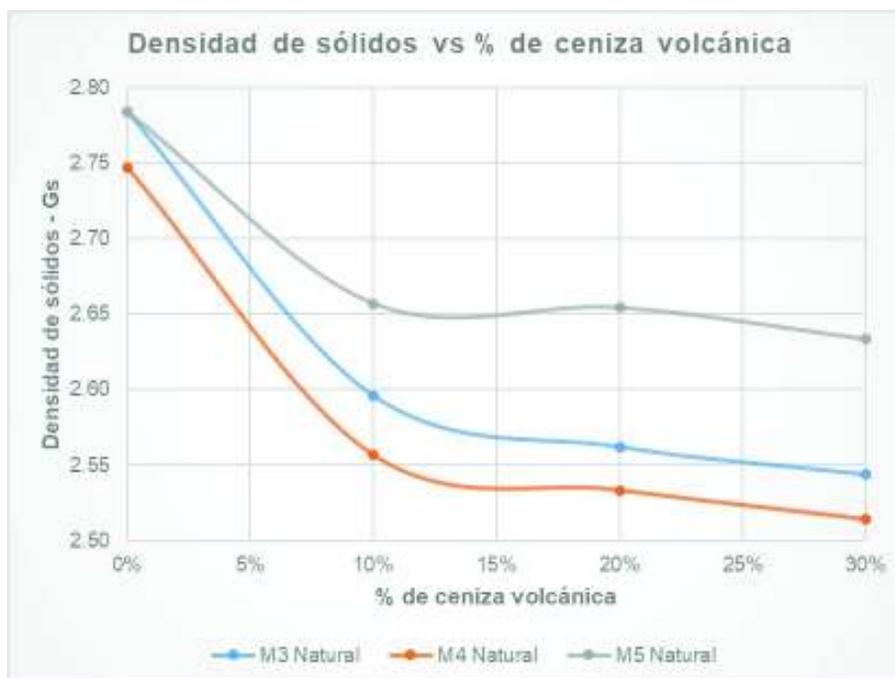
TABLA 5.6. RESULTADOS DE LA DENSIDAD DE SÓLIDOS SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA

Muestra	Porcentaje de ceniza	Gs	% de variación
M3	0%	2.78	0%
	10%	2.60	7%
	20%	2.56	8%
	30%	2.54	9%
M4	0%	2.75	0%
	10%	2.56	7%
	20%	2.53	8%
M5	0%	2.78	0%
	10%	2.66	5%
	20%	2.65	5%
	30%	2.63	5%

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

Sin embargo, cuando se realiza la dosificación con ceniza volcánica que posee una densidad real de 2.66 g/cm^3 , la mezcla producida tiende a reducirse levemente, tal y como se visualiza en la Gráfica 5.9. Para los porcentajes de 0, 10, 20 y 30% de ceniza se aprecia la siguiente variación en los suelos. En el caso de la M3, varía con valores de 2.78 a 2.54. Para la muestra M4, el límite fluctúa entre el 2.75 a 2.51, y, por último, para la muestra M5, los valores van en el orden de 2.78 a 2.63.

GRÁFICA 5.9. DENSIDAD DE SÓLIDOS SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA



Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

En el porcentaje de variación para la densidad de sólidos provocado por la adición de la ceniza, se observa en la Gráfica 5.10 que prácticamente ya no existe variación alguna a partir del 20% de dosificación en el suelo, dado que al aumentar al 30%, apenas se presenta una variación del 0 al 1%, lo cual no es representativo en esta propiedad.

GRÁFICA 5.10. PORCENTAJE DE VARIACIÓN DE LA DENSIDAD DE SÓLIDOS PARA LOS SUELOS M3, M4 Y M5 NATURALES



Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

5.1.5. PERMEABILIDAD

En principio, para los suelos naturales se obtuvo coeficientes de permeabilidad, K , que iban en el orden de 1×10^{-6} en el caso más crítico, los mismos que clasificaban como suelos no permeables, debido a la naturaleza de las muestras que son arcillas cohesivas. Cuando se realizó nuevamente los ensayos de permeabilidad de suelos con dosificaciones de ceniza, se obtuvo coeficientes K del orden de 1×10^{-9} , donde a la muestra ensayada se le colocó una presión de 3 kg/cm^2 , reiterando la clasificación anterior de no permeables. Comprobándose así ya que las partículas de ceniza ingresan en el suelo arcilloso expansivo y ocupan los espacios vacíos que se encuentran en ellos.

Una reafirmación de lo estipulado anteriormente es que, en la medición de la relación de vacíos, e , se tuvo un aumento en su volumen de sólidos para cada muestra y se observa que disminuyen progresivamente con el aumento del porcentaje de ceniza, como se encuentra en la Tabla 5.7.

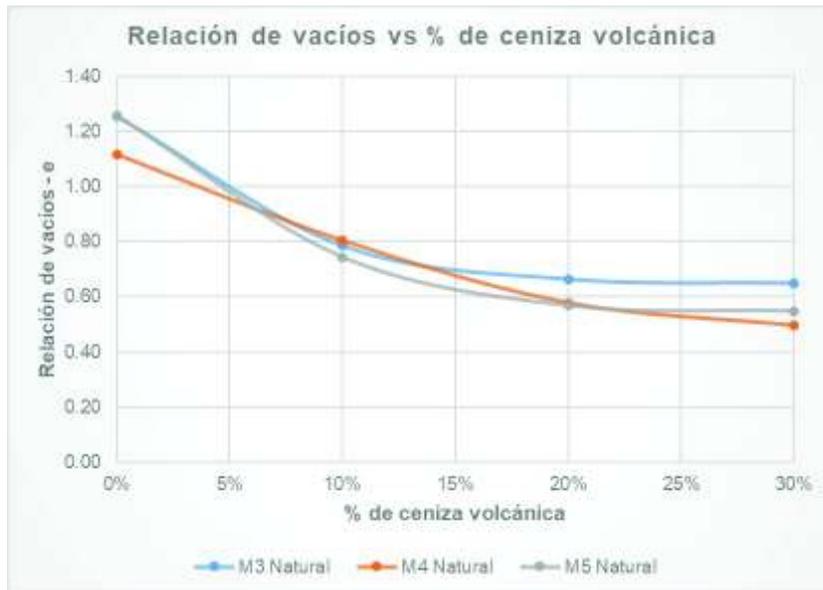
TABLA 5.7. RESULTADOS DE LA PERMEABILIDAD SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA

Muestra	Porcentaje de ceniza	Coefficiente de permeabilidad K	Clasificación	Relación de vacíos e	e promedio	% de reducción
M3	0%	4.93E-06	No permeable	1.239	1.26	0%
		3.52E-06	No permeable	1.274		
	10%	1.00E-09	No permeable	0.789	0.79	37%
		1.00E-09	No permeable	0.783		
	20%	1.00E-09	No permeable	0.661	0.66	47%
		1.00E-09	No permeable	0.667		
30%	1.00E-09	No permeable	0.646	0.65	48%	
	1.00E-09	No permeable	0.654			
M4	0%	1.15E-06	No permeable	1.104	1.12	0%
		1.69E-06	No permeable	1.130		
	10%	1.00E-09	No permeable	0.804	0.80	28%
		1.00E-09	No permeable	0.804		
	20%	1.00E-09	No permeable	0.579	0.58	48%
		1.00E-09	No permeable	0.577		
30%	1.00E-09	No permeable	0.493	0.50	56%	
	1.00E-09	No permeable	0.498			
M5	0%	2.40E-07	No permeable	1.266	1.26	0%
		1.41E-07	No permeable	1.248		
	10%	1.00E-09	No permeable	0.744	0.74	41%
		1.00E-09	No permeable	0.743		
	20%	1.00E-09	No permeable	0.565	0.57	55%
		1.00E-09	No permeable	0.571		
30%	1.00E-09	No permeable	0.517	0.55	56%	
	1.00E-09	No permeable	0.579			

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

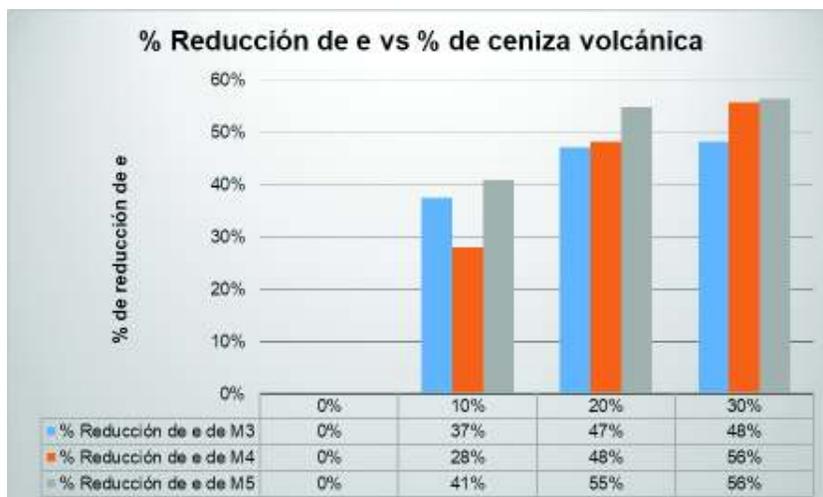
En la Gráfica 5.11, es posible visualizar la reducción de la relación de vacíos en los especímenes ensayados, la misma que tiene una tendencia decreciente continua en función del porcentaje de ceniza volcánica aplicada. Esta reducción se inclina a estabilizarse en el intervalo de 20 a 30% de dosificación para los tres diferentes suelos, dado que además en el análisis de la Gráfica 5.12 de porcentaje de reducción de esta variable se observan movimientos de valores mínimos no significativos.

GRÁFICA 5.11. RELACIÓN DE VACÍOS EN PERMEABILIDAD SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA



Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

GRÁFICA 5.12. PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE RELACIÓN DE VACÍOS PARA LOS SUELOS M3, M4 Y M5 NATURALES



Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

5.1.6. DIFRACCIÓN POR RAYOS X

Las composiciones mineralógicas de los suelos expansivos investigados corroboran el potencial de hinchamiento de las presentes arcillas antes analizadas en los apartados 5.1.2 y 5.1.3. Existió el hallazgo de presencia del mineral Montmorillonita ($(Na, Ca)_{0.3}(Al, Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2$) que se encuentra en el valor de

5% y la Caolinita $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$ en un 30% para los casos más desfavorables de las muestras naturales. Recordando que la actividad y el potencial de hinchamiento se basan en las grandes superficies específicas que aportan dichos minerales, sobre todo en la Montmorillonita. En la Tabla 5.8, 5.9 y 5.10 se realiza el cálculo de la distribución de la masa de la ceniza volcánica dentro de una muestra de suelo, obtenido a partir de los resultados de la difracción de rayos X para el suelo natural, observando la disminución de cada uno de los minerales.

TABLA 5.8. COMPOSICIÓN MINERAL CALCULADA PARA EL SUELO M3 NATURAL SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA

Mineral	Muestra 3 - Contenido (%)			
	Con 0% de ceniza	Con 10% de ceniza	Con 20% de ceniza	Con 30% de ceniza
Caolinita	30	29	28	27
Cuarzo	16	15	14	13
Grupo Plagioclasas (albita, andesina, anortita)	13	12	11	10
Diópsido	12	11	10	9
Mordenita	7	6	5	4
Muscovita	6	5	4	3
Magnetita	5	4	3	2
Gypsum	5	4	3	2
Cordierita	2	1	0	0
Montmorillonita	2	1	0	0
Hematita	1	0	0	0
Ferropargasita	1	0	0	0
Crossita	1	0	0	0
Ceniza volcánica	0	10	20	30

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

TABLA 5.9. COMPOSICIÓN MINERAL CALCULADA PARA EL SUELO M4 NATURAL SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA

Mineral	Muestra 4 - Contenido (%)			
	Con 0% de ceniza	Con 10% de ceniza	Con 20% de ceniza	Con 30% de ceniza
Caolinita	25	24	23	22
Cuarzo	20	19	18	17
Grupo Plagioclasas (albita, andesina, anortita)	15	14	13	12
Diópsido	13	12	11	10

TABLA 5.9. CONTINUACIÓN

Mordenita	8	7	6	5
Muscovita	5	4	3	2
Magnetita	3	2	1	0
Gypsum	2	1	0	0
Cordierita	1	0	0	0
Montmorillonita	2	1	0	0
Hematita	1	0	0	0
Ferropargasita	4	3	2	1
Crossita	1	0	0	0
Ceniza volcánica	0	10	20	30

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

TABLA 5.10. COMPOSICIÓN MINERAL CALCULADA PARA EL SUELO M5 NATURAL SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA

Mineral	Muestra 5 - Contenido (%)			
	Con 0% de ceniza	Con 10% de ceniza	Con 20% de ceniza	Con 30% de ceniza
Caolinita	15	14	13	12
Cuarzo	25	24	23	22
Grupo Plagioclasas (albita, andesina, anortita)	24	23	22	21
Diópsido	11	10	9	8
Mordenita	9	8	7	6
Muscovita	3	2	1	0
Magnetita	3	2	1	0
Gypsum	2	1	0	0
Cordierita	1	0	0	0
Montmorillonita	5	4	3	2
Hematita	1	0	0	0
Ferropargasita	2	1	0	0
Crossita	1	0	0	0
Ceniza volcánica	0	10	20	30

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

5.1.7. FLUORESCENCIA POR RAYOS X

Anteriormente se ha señalado que las arcillas en general se constituyen de importantes cantidades de sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3), que para las muestras de suelo estudiadas 3, 4 y 5 según los resultados de fluorescencia por rayos X de

la Tabla 5.11, alcanzan valores de aproximadamente de 60 hasta 70% de la suma de estos óxidos.

Otro aspecto a analizar es la reacción puzolánica que se da en la mezcla de la arcilla expansiva y la ceniza volcánica, puesto que la sílice y alúmina que aporta el suelo arcilloso al tener interacción con la ceniza y agua, consiguen formar silicatos y aluminatos de calcio hidratados, reacción que se asemeja al fraguado del cemento portland o cal. La composición de elementos de la ceniza se expone en la Tabla 5.11, llamada muestra 6, que se asemeja en comportantes y proporciones a los constituyentes principales del cemento como SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 con casi un 85% sumados. Además, que contiene cal (CaO) en un 6.26%.

La aseveración anterior de la reacción, se justifica con los resultados obtenidos en los ensayos tanto físicos como mecánicos, debido a que el suelo tiende a actuar como un conglomerado y ya no como un suelo suelto, así, mejorando altamente sus propiedades.

TABLA 5.11. COMPOSICIÓN DE ELEMENTOS - ÓXIDOS DEL SUELO M3, M4, M5 Y DE CENIZA VOLCÁNICA

Elemento	Muestra				Óxido	Muestra	Muestra	Muestra	Muestra
	3	4	5	6		3	4	5	6
	Contenido (%)					Valor Calculado (%)			
<i>Si</i>	26.70	22.45	23.32	27.90	SiO_2	57.13	43.08	49.88	59.69
<i>Al</i>	9.33	7.30	7.36	9.59	Al_2O_3	17.63	13.79	13.91	18.12
<i>Fe</i>	4.82	3.94	3.50	4.75	Fe_2O_3	6.89	5.63	5.01	6.79
<i>Na</i>	1.47	1.47	1.08	3.25	Na_2O	1.96	1.98	1.46	4.38
<i>K</i>	1.43	0.83	0.86	1.63	CaO	1.74	4.49	3.39	6.26
<i>Ca</i>	1.24	3.21	2.42	4.47	K_2O	1.73	0.99	1.03	1.96
<i>Mg</i>	1.03	0.82	0.80	1.97	MgO	1.71	1.36	1.33	3.26
<i>Ti</i>	0.41	0.32	0.32	0.56	TiO_2	0.68	0.53	0.53	0.93
<i>P</i>	0.05	0.09	0.06	0.13	P_2O_5	0.11	0.21	0.13	0.29
<i>S</i>	0.50	0.34	0.05	0.12	Mn_2O_3	-	-	0.01	0.17
<i>Mn</i>	-	-	0.01	0.12					

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

5.1.8. CORTE DIRECTO

El ensayo de corte directo proporciona información relevante en términos de las propiedades mecánicas de una muestra analizada como es el ángulo de fricción interna y la cohesión expuestas en la Tabla 5.12.

TABLA 5.12. RESULTADOS DE ÁNGULO DE FRICCIÓN Y COHESIÓN SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA

Muestra	Porcentaje de ceniza	θ (°)	% de variación	c (kg/cm ²)	% de variación
M3	0%	31.0	0%	0.23	0%
	10%	38.3	24%	1.84	699%
	20%	40.6	31%	1.94	742%
	30%	48.2	56%	1.94	742%
M4	0%	18.3	0%	0.30	0%
	10%	39.2	115%	1.95	550%
	20%	45.7	150%	2.20	633%
	30%	49.6	172%	2.21	636%
M5	0%	18.3	0%	0.51	0%
	10%	37.8	107%	1.83	258%
	20%	41.1	125%	1.93	279%
	30%	49.9	173%	1.98	289%

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

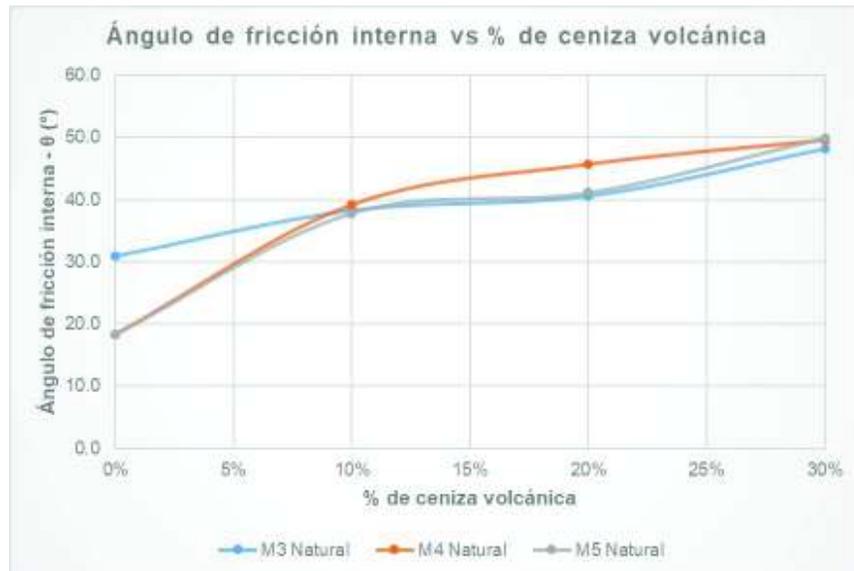
5.1.8.1. Ángulo de fricción interna

La influencia de la ceniza sobre los suelos se ve reflejada en los aumentos del ángulo de fricción interna que adquieren los especímenes ensayados, debido a los cambios internos que sufren las muestras al pasar de materiales sueltos a conglomerados en la reacción puzolánica que se da en la mezcla.

En la Gráfica 5.13, se observa con facilidad un marcado incremento no lineal de esta variable, llegando a alcanzar en todos los casos valores superiores a los 45°.

Para los porcentajes de 0, 10, 20 y 30% de ceniza se aprecia la siguiente variación en los suelos. En el caso de la M3, varía con valores de 31 a 48°. Para la muestra M4, el límite fluctúa entre el 18 a 50°, y, por último, para la muestra M5, los valores van en el orden de 18 a 50°.

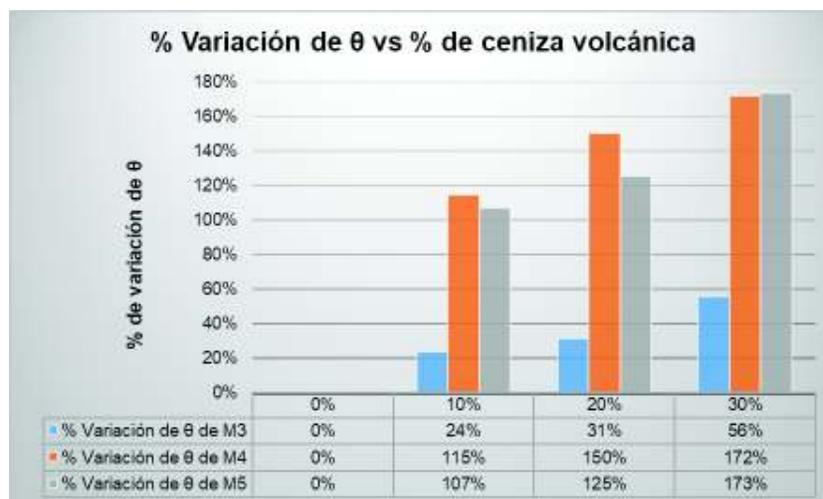
GRÁFICA 5.13. ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA SEGÚN PORCENTAJE DE CENIZA



Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

Además, se analiza un factor importante que es el porcentaje de variación según sea la adición del estabilizante. Los resultados expuestos en la Gráfica 5.14, dictan que a pesar de que con 30% de aditivo se alcanzan los mayores valores de porcentaje de variación, con 20% se obtiene valores muy similares con aumentos que son de 31, 150 y 125% para las muestras M3, M4 y M5, los mismos que son considerados elevados y que favorecen al suelo tratado.

GRÁFICA 5.14. PORCENTAJE DE VARIACIÓN DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA PARA LOS SUELOS M3, M4 Y M5 NATURALES

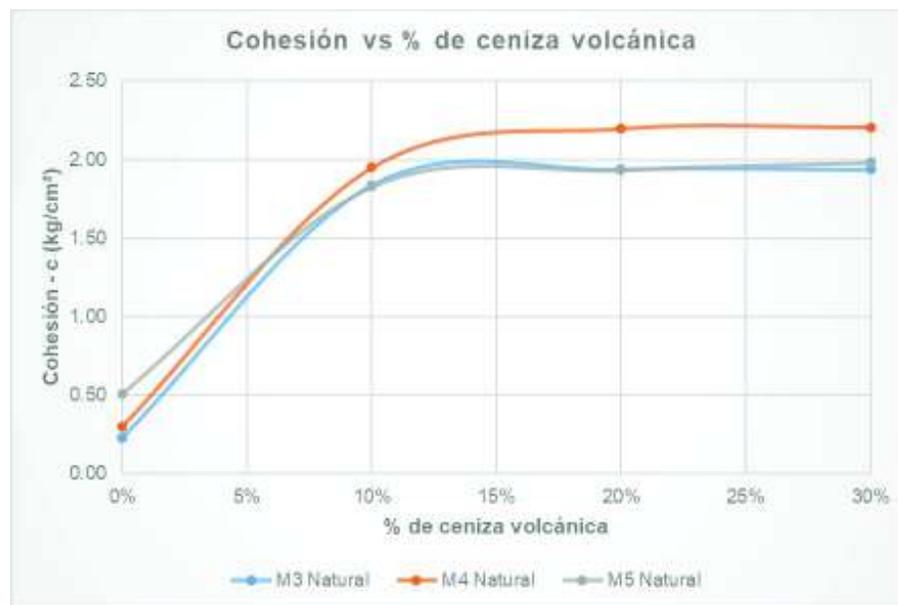


Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

5.1.8.2. Cohesión

Sumado al ángulo de fricción interno, la cohesión es un parámetro que también mide el esfuerzo cortante en el plano de fallo de los suelos. La Gráfica 5.15, indica un aumento con gran rapidez para el 10% de ceniza aplicado con respecto al suelo natural, sin embargo, cuando se aplica un intervalo del 20 a 30% de aditivo, la reacción del suelo tiende claramente a estabilizar los resultados de la cohesión, como se muestra en la Tabla 5.12.

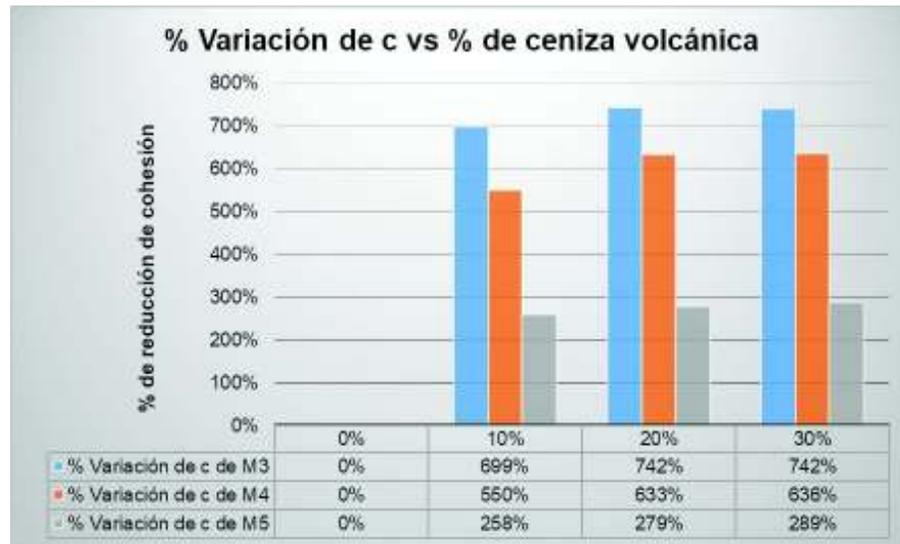
GRÁFICA 5.15. COHESIÓN SEGÚN PORCENTAJE DE CENIZA



Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

De igual forma, al momento de analizar los porcentajes de variación de este parámetro mecánico del suelo en la Gráfica 5.16, es posible afirmar que el porcentaje de estabilización máximo para la aplicación de estos suelos es del 20%, dado que se alcanzan porcentajes de aumento como del 742, 633 y 279% en la cohesión para las muestras M3, M4 y M5, los cuales no difieren relevantemente del 30% de aditivo.

GRÁFICA 5.16. PORCENTAJE DE VARIACIÓN DE LA COHESIÓN PARA LOS SUELOS M3, M4 Y M5 NATURALES



Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

5.1.9. CONSOLIDACIÓN

La consolidación y los asentamientos se encuentran íntimamente ligados cuando se trata de suelos arcillosos. La medición de este parámetro es de suma importancia debido a que en este tipo de suelos, los asentamientos por consolidación pueden llegar a ser varias veces mayor que los asentamientos elásticos y provocar afectaciones en las construcciones a largo plazo.

Dentro de los asentamientos por consolidación existen los de consolidación primaria y secundaria, siendo el primero de interés en este estudio por tener mayores proporciones en los suelos arcillosos sobreconsolidados.

En la realización del ensayo es necesario resaltar que, para los estados de carga de las muestras naturales, se mantuvo de 2 a 3 días dado que en arcillas expansivas este comportamiento generalmente es normal por su gran hinchamiento y que contrasta con el 1 día de carga de las muestras dosificadas, lo mismo que indicó una reducción inmediata en tiempo para llegar a la consolidación secundaria, mostrando todos los resultados en la Tabla 5.13.

En principio, el resultado arrojado por este ensayo muestra que, las muestras de suelo naturales y dosificadas son suelos sobreconsolidados por dos razones, el

índice de sobreconsolidación, OCR, es mayor a uno porque la presión vertical efectiva presente, σ' , es menor a la unidad y la presión de preconsolidación, σ'_c , se obtuvo entre valores de 2.0 y 3.0 kg/cm² aproximadamente para todos los casos. La segunda razón se basa en el índice de liquidez, mencionado en el apartado 5.1.1.5, con valores negativos característicos a suelos sobreconsolidados.

El coeficiente de consolidación, C_v , obtenido presenta valores ascendentes cuando se aplica la adición del estabilizante de ceniza en el suelo natural, por ejemplo, en la muestra 5, empieza con aproximadamente 0.072 mm²/seg y finaliza con 0.206 mm²/seg, al pasar de 0% de ceniza al 30%. Como consecuencia, el incremento de C_v , produce disminución en el tiempo de consolidación, t .

La relación de vacíos inicial, e_0 , tiene una similar tendencia de disminución a medida que se agrega el aditivo, tal y como se analizó para la permeabilidad en el subcapítulo de 5.1.5, esto ratifica el ingreso de las partículas de ceniza volcánica en el suelo arcilloso ocupando sus espacios vacíos.

El asentamiento de consolidación primaria, S_p , está en función de variables como la altura de la muestra, H y la variación de la relación de vacíos, Δe . Exitosamente, la variación de relación de vacíos y alturas tanto para carga, descarga y el último estado de descarga, decaen paulatinamente cuando se agrega el estabilizante, este resultado es de crucial importancia en el estudio por la razón que al ser estas variables directamente proporcionales al asentamiento de consolidación primaria, será beneficioso su disminución a favor de la estabilización.

El índice de compresión, C_c e índice de abultamiento, C_s , posee un comportamiento similar al antes descrito para el asentamiento de consolidación primaria, S_p , dado que disminuye con la presencia de mayor porcentaje de ceniza para todas las muestras analizadas. Mencionando que los índices C_c y C_s son también directamente proporcionales en el cálculo del asentamiento de consolidación primaria, S_p , por lo que favorecen al comportamiento del suelo.

TABLA 5.13. CONSOLIDACIÓN SEGÚN EL PORCENTAJE DE CENIZA

Muestra	Porcentaje de ceniza	Ys (g/cm ³)	Yh (g/cm ³)	w (%)	Δe_o (Carga)	Δe_o (Descarga)	Δe_o (Último Est. Descarga)	Δh (Carga)	Δh (Último Est. Descarga)	Δh (Descarga)	$\sigma'c$ (kg/cm ²)	Cv (mm ² /seg)	e _o inicial	Cc	Cs
M3	0%	1.25	1.67	34	0.57	0.26	0.16	5.12	1.42	2.33	2.90	0.030	1.24	0.329	0.088
		1.22	1.63	33	0.46	0.28	0.17	4.07	1.50	2.43	3.10	0.039	1.28	0.312	0.096
		1.45	1.85	27	0.48	0.25	0.13	5.19	1.44	2.75	2.30	0.069	0.79	0.316	0.108
M3	20%	1.54	1.96	27	0.35	0.22	0.11	4.06	1.34	2.59	2.70	0.073	0.66	0.266	0.100
		1.55	1.98	28	0.30	0.21	0.11	3.64	1.33	2.49	3.20	0.076	0.65	0.233	0.098
		1.27	1.72	35	0.45	0.45	0.32	4.20	2.93	4.16	2.90	0.019	1.16	0.369	0.121
M4	0%	1.33	1.76	32	0.50	0.47	0.34	4.80	3.30	4.50	2.50	0.065	1.07	0.345	0.116
		1.43	1.79	25	0.51	0.35	0.24	5.71	2.67	3.92	2.40	0.069	0.79	0.412	0.101
		1.61	1.95	21	0.26	0.18	0.10	3.29	1.21	2.18	2.90	0.071	0.58	0.216	0.078
M4	30%	1.68	2.04	21	0.20	0.15	0.08	2.62	1.00	1.94	3.20	0.073	0.50	0.186	0.070
		1.24	1.66	34	0.49	0.32	0.19	4.38	1.73	2.85	2.20	0.073	1.25	0.322	0.116
		1.28	1.69	33	0.50	0.32	0.20	4.57	1.81	2.95	1.90	0.071	1.18	0.312	0.115
M5	10%	1.52	1.81	19	0.34	0.21	0.12	3.92	1.36	2.39	2.90	0.109	0.75	0.302	0.080
		1.69	2.03	20	0.31	0.13	0.07	3.89	0.82	1.62	2.90	0.164	0.57	0.193	0.060
		1.73	2.04	18	0.29	0.13	0.06	3.69	0.79	1.59	3.20	0.206	0.52	0.189	0.060

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS ECONÓMICO

6.1. COSTO-BENEFICIO DE MÉTODOS TRADICIONALES

Los procesos que tienen como fin la estabilización de suelos, propician el incremento de las posibilidades de uso de bancos de materiales, en vez de desecharlos como inútiles por no satisfacer los requerimientos necesarios para su uso en la construcción, se posibilita la utilización mediante un tratamiento adecuado. Por lo tanto, es necesario el desarrollo de estudios que utilicen materiales antes ignorados que muchas veces pueden estar en el propio sitio de construcción.

Se efectúa la comparación de los costos de estabilización de suelos utilizándose diferentes aditivos tradicionales en el medio nacional como el cemento, cal y polímeros. Según la base de datos de diferentes estudios realizados anteriormente en provincias como Pichincha, Manabí, Guayas y Azuay se indica en la siguiente Tabla 6.1, el costo directo para la estabilización de 1 m³ de suelo.

TABLA 6.1. RESUMEN DE ESTABILIZACIÓN CON DIFERENTES ADITIVOS

Rubro	Unidad	Costo Directo (\$)
Estabilización con 9% de cemento tipo MH	m ³	\$ 24.49
Estabilización de arcilla con 7% de cemento.	m ³	\$ 30.62
Estabilización de arcilla con 7% de cal.	m ³	\$ 25.92
Estabilización de suelos expansivos con 1.5% de polímeros	m ³	\$ 20.46
Estabilización de arcilla con el 16% de cal	m ³	\$ 25.45

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

A continuación, en las Tablas 6.2 a 6.6., se expone en detalle el análisis de costos unitarios (APU's) referente a cada tipo de estabilización, los cuales ya fueron comprobados por lo menos a nivel de laboratorio.

TABLA 6.2. APU 01 - ESTABILIZACIÓN CON 9% DE CEMENTO TIPO MH

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS				UNIDAD:	m ³
RUBRO:	Estabilización con 9% cemento tipo MH				
EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (A)	TARIFA (B)	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO (R)	COSTO D=C*R
Motoniveladora 130 g	1.00	35.60	\$ 35.60	0.012	\$ 0.43
Rodillo vibratorio liso cs-431	1.00	34.89	\$ 34.89	0.012	\$ 0.42
Tanquero de agua	1.00	22.15	\$ 22.15	0.012	\$ 0.27
				SUBTOTAL M	1.112
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (A)	JORNAL/HR (B)	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO (R)	COSTO D=C*R
Peón	4.00	4.75	\$ 19.00	0.014	\$ 0.27
Chofer licencia tipo E	1.00	6.51	\$ 6.51	0.020	\$ 0.13
Ayudante de maquinaria	2.00	4.80	\$ 9.59	0.022	\$ 0.21
Operador de motoniveladora	1.00	7.34	\$ 7.34	0.030	\$ 0.22
Operador de rodillo autopropulsado	1.00	7.17	\$ 7.17	0.024	\$ 0.17
				SUBTOTAL N	0.999
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	P. UNITARIO (B)	COSTO C=A*B	
Cemento tipo HH	kg	129.69	\$ 0.17	\$ 21.48	
				SUBTOTAL O	21.477
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	COSTO/KM (B)	TARIFA (C)	COSTO D=A*B*C
Material mejoramiento de	m ³	1.20	15.00	0.05	\$ 0.90
				SUBTOTAL P	\$ -
				SUBTOTAL P	0.9000
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					24.488
INDIRECTOS Y UTILIDADES %				0%	-
OTROS INDIRECTOS %				25%	6.1200
COSTO TOTAL DEL RUBRO					30.608
VALOR OFERTADO					\$ 30.61

PRECIOS NO INCLUYEN I.V.A

Fuente: (Clavijo & Jurado, 2016)

TABLA 6.3. APU 02 - ESTABILIZACIÓN CON 7% DE CEMENTO

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS				UNIDAD:	m ³
RUBRO:	Estabilización de arcilla con 7% de cemento.				
EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (A)	TARIFA (B)	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO (R)	COSTO D=C*R
Motoniveladora	1.00	45.00	\$ 45.00	0.035	\$ 1.58
Compactador tipo rodillo	1.00	40.00	\$ 40.00	0.035	\$ 1.41
Tanquero	1.00	25.00	\$ 25.00	0.035	\$ 0.88
SUBTOTAL M					3.872
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (A)	JORNAL/HR (B)	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO (R)	COSTO D=C*R
OEP 1. Op. Motoniveladora	1.00	3.02	\$ 3.02	0.035	\$ 0.11
OEP 2. Op. Rodillo Autopr	1.00	3.02	\$ 3.02	0.035	\$ 0.11
Chofer licencia tipo D	1.00	4.16	\$ 4.16	0.035	\$ 0.15
Ayudante maquinaria	1.00	2.86	\$ 2.86	0.035	\$ 0.10
			\$ -	0.035	\$ -
SUBTOTAL N					0.460
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	P. UNITARIO (B)	COSTO C=A*B	
Material de préstamo Inc. Transporte	m ³	1.00	\$ 11.25	\$ 11.25	
Agente estabilizante cemento	kg	94.00	\$ 0.16	\$ 15.04	
				\$ -	
				\$ -	
SUBTOTAL O					26.290
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	COSTO/KM (B)	TARIFA (C)	COSTO D=A*B*C
					\$ -
					\$ -
SUBTOTAL P					-
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					30.622
INDIRECTOS Y UTILIDADES %				0%	-
OTROS INDIRECTOS %				0%	-
COSTO TOTAL DEL RUBRO					30.622
VALOR OFERTADO					\$ 30.62

PRECIOS NO INCLUYEN I.V.A

Fuente: (Sánchez, 2014)

TABLA 6.4. APU 03 – ESTABILIZACIÓN CON 7% DE CAL

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS				UNIDAD:	m ³
RUBRO:		Estabilización de arcilla con 7% de cal.			
EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (A)	TARIFA (B)	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO (R)	COSTO D=C*R
Motoniveladora	1.00	45.00	\$ 45.00	0.035	\$ 1.58
Compactador tipo rodillo	1.00	40.00	\$ 40.00	0.035	\$ 1.41
Tanquero	1.00	25.00	\$ 25.00	0.035	\$ 0.88
SUBTOTAL M					3.872
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (A)	JORNAL/HR (B)	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO (R)	COSTO D=C*R
OEP 1. Op. Motoniveladora	1.00	3.02	\$ 3.02	0.035	\$ 0.11
OEP 2. Op. Rodillo Autopr	1.00	3.02	\$ 3.02	0.035	\$ 0.11
Chofer licencia tipo D	1.00	4.16	\$ 4.16	0.035	\$ 0.15
Ayudante maquinaria	1.00	2.86	\$ 2.86	0.035	\$ 0.10
SUBTOTAL N					0.460
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	P. UNITARIO (B)	COSTO C=A*B	
Material de préstamo Inc. Transporte	m ³	1.00	\$ 11.25	\$ 11.25	
Agente estabilizante cal	kg	94.00	\$ 0.11	\$ 10.34	
SUBTOTAL O					21.590
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	COSTO/KM (B)	TARIFA (C)	COSTO D=A*B*C
					\$ -
					\$ -
SUBTOTAL P					-
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					25.922
INDIRECTOS Y UTILIDADES %				0%	-
OTROS INDIRECTOS %				0%	-
COSTO TOTAL DEL RUBRO					25.922
VALOR OFERTADO					\$ 25.92

PRECIOS NO INCLUYEN I.V.A

Fuente: (Sánchez, 2014)

TABLA 6.5. APU 04 - ESTABILIZACIÓN DE SUELOS EXPANSIVOS CON 1.5% DE POLÍMEROS

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS				UNIDAD:	m ³
RUBRO:	Estabilización de suelos expansivos con 1.5% de polímeros				
EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (A)	TARIFA (B)	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO (R)	COSTO D=C*R
Herramienta menor (5% de M.O)					\$ 0.01
Motoniveladora	1.00	40.00	\$ 40.00	0.0200	\$ 0.80
Rodillo Vibratorio	1.00	45.00	\$ 45.00	0.0200	\$ 0.90
Tanquero	1.00	25.00	\$ 25.00	0.0200	\$ 0.50
				SUBTOTAL M	2.212
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (A)	JORNAL/HR (B)	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO (R)	COSTO D=C*R
Operador motoniveladora OP C1	1.00	3.82	\$ 3.82	0.020	\$ 0.08
Operador de rodillo vibratorio OP C2	1.00	3.64	\$ 3.64	0.020	\$ 0.07
Chofer licencia tipo D CH C1	1.00	5.00	\$ 5.00	0.020	\$ 0.10
			\$ -	0.020	\$ -
				SUBTOTAL N	0.249
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	P. UNITARIO (B)	COSTO C=A*B	
Polímero	LT	15.00	\$ 1.20	\$ 18.00	\$ -
				SUBTOTAL O	18.000
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	COSTO/KM (B)	TARIFA (C)	COSTO D=A*B*C
					\$ -
					\$ -
				SUBTOTAL P	-
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					20.462
INDIRECTOS Y UTILIDADES %				0%	-
OTROS INDIRECTOS %				0%	-
COSTO TOTAL DEL RUBRO					20.462
VALOR OFERTADO					\$ 20.46

PRECIOS NO INCLUYEN I.V.A

Fuente: (Ayala, 2017)

TABLA 6.6. APU 05 - ESTABILIZACIÓN DE ARCILLA CON EL 16% DE CAL

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS				UNIDAD:	m ²
RUBRO:	Estabilización de arcilla con el 16% de cal e=40 cm				
EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (A)	TARIFA (B)	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO (R)	COSTO D=C*R
Estabilizadora	1.00	70.00	\$ 70.00	0.0035	\$ 0.25
Distribuidor de cal	1.00	45.00	\$ 45.00	0.0035	\$ 0.16
Motoniveladora	1.00	40.00	\$ 40.00	0.0035	\$ 0.14
Rodillo 1	1.00	30.00	\$ 30.00	0.0035	\$ 0.11
Rodillo 2	1.00	30.00	\$ 30.00	0.0035	\$ 0.11
Tanquero	1.00	24.00	\$ 24.00	0.0035	\$ 0.08
SUBTOTAL M					0.837
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (A)	JORNAL/HR (B)	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO (R)	COSTO D=C*R
EOC1	2.00	3.66	\$ 7.32	0.004	\$ 0.03
EOC2	1.00	3.48	\$ 3.48	0.004	\$ 0.01
Chofer	4.00	4.79	\$ 19.16	0.004	\$ 0.07
Ayudantes	4.00	3.30	\$ 13.20	0.004	\$ 0.05
Mecánico equipo pesado	1.00	3.66	\$ 3.66	0.004	\$ 0.01
SUBTOTAL N					0.164
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	P. UNITARIO (B)	COSTO C=A*B	
Agua	m ³	0.10	\$ 1.00	\$ 0.10	
Material de subrasante	m ³	0.41	\$ 0.50	\$ 0.21	
Cal viva al 16%	saco	1.41	\$ 4.20	\$ 5.92	
SUBTOTAL O					6.227
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	COSTO/KM (B)	TARIFA (C)	COSTO D=A*B*C
Transporte de cal	m ³ /km	15.00	0.04	1.00	\$ 0.60
SUBTOTAL P					0.6000
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					7.827
INDIRECTOS Y UTILIDADES %					0%
OTROS INDIRECTOS %					30%
COSTO TOTAL DEL RUBRO					10.177
VALOR OFERTADO					\$ 10.18

PRECIOS NO INCLUYEN I.V.A

Fuente: (Castillo, 2017)

6.2. COSTO-BENEFICIO DEL MÉTODO INVESTIGADO

En principio, es necesario recordar que los materiales de una estabilización química tradicional como las expuestas en el apartado 6.1., son típicos de la construcción nacional y por lo tanto, la accesibilidad a nivel comercial es más que factible. Sin embargo, la producción de ceniza no es un proceso de carácter comercial a nivel artesanal o industrial y más aún, ceniza del volcán Tungurahua que es de interés en esta investigación.

Es por ello que, en este estudio se realiza una estimación del costo de producción de la ceniza volcánica pensando en su uso comercial como nuevo aditivo en los suelos expansivos.

6.2.1. CÁLCULO DEL COSTO UNITARIO DE LA CENIZA

Para obtener el costo unitario es indispensable definir el yacimiento de la veta de ceniza que contenga características afines como su granulometría, contenido de humedad natural y densidad. Sólo de ésta manera se puede igualar los parámetros utilizados en laboratorio con los que puedan ser aplicados en el campo.

Como se mencionó en el capítulo 3.2.2., durante los últimos 15 años por la actividad eruptiva del volcán se ha emitido más de 112 m³ de ceniza, la cual se dispersó en las provincias de Tungurahua, Chimborazo y sus alrededores. No existen zonas definidas de hallazgos de vetas de cenizas, pero sí es posible encontrar una densidad marcada de las mismas en el sector de Guadalupe, cercano al Observatorio Vulcanológico del Tungurahua (OVT) del IG-EPN, igualmente lugares próximos a la quebrada llamada Achupashal en Tungurahua.

Fue necesario generar los procesos y subprocesos de la producción de la ceniza volcánica a escala artesanal, la cual incluye todas las etapas, desde el desbanque con maquina hasta el empaquetado en fundas de 25 kg. Para la creación de los APU's exhibidos en las Tablas 6.8 a 6.14, se desarrolló una metodología de trabajo a través de la valoración de equipos, mano de obra y materiales con su respectivo rendimiento en función de las condiciones de obra.

En la Tabla 6.7., se visualiza un resumen de los rubros (procesos) para la valoración del costo de producción de la ceniza del volcán Tungurahua. El valor obtenido de 246.09 representa el costo unitario en dólares por m³ de material.

TABLA 6.7. RUBROS PARA ESTIMACIÓN DE COSTO DE PRODUCCIÓN CENIZA VOLCÁNICA

Rubro	Costo Unitario (\$/m ³)
Desbanque de ceniza volcánica con maquinaria	5.47
Desalojo de ceniza volcánica con volqueta y cargadora frontal	6.60
Transporte de ceniza volcánica en volquetas hasta 10 km	2.39
Bodega provisional con cubierta metálica	48.89
Secado de ceniza volcánica con horno industrial eléctrico	70.17
Tamizado de ceniza volcánica	64.84
Empaquetado en fundas de 25 kg	47.73
	246.09

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

Para el posterior análisis de costos de la estabilización con ceniza, se calcula el costo de este material por cada kg. Con la relación simple de la densidad, se procede de la siguiente manera:

$$\text{Densidad de la ceniza volcánica: } D = \frac{m}{V} = 2660 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (6.1)$$

m : masa de la ceniza, kg.

V : volumen de la ceniza, m³.

Por lo que a partir del costo de 1 m³ de ceniza, se obtiene:

$$\text{Costo de ceniza} = \frac{246.09 \frac{\$}{\text{m}^3}}{2660 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0.093 \frac{\$}{\text{kg}} = 9.25 \frac{\text{ctvos}}{\text{kg}}$$

TABLA 6.8. APU 06 - DESBANQUE DE CENIZA VOLCÁNICA CON MAQUINARIA

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS				UNIDAD:	m ³
RUBRO:		Desbanque de ceniza volcánica con maquinaria			
EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (A)	TARIFA (B)	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO (R)	COSTO D=C*R
Herramienta menor (5% de M.O)					\$ 0.05
Retroexcavadora	1.00	35.00	\$ 35.00	0.100	\$ 3.50
SUBTOTAL M					3.553
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (A)	JORNAL/HR (B)	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO (R)	COSTO D=C*R
Operador equipo pesado C1 G1	1.00	6.00	\$ 6.00	0.100	\$ 0.60
Ayudante de maquinaria (Estruc. Ocup. C3)	1.00	4.50	\$ 4.50	0.100	\$ 0.45
SUBTOTAL N					1.050
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	P. UNITARIO (B)	COSTO C=A*B	
				\$	-
				\$	-
				\$	-
				\$	-
SUBTOTAL O					-
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	COSTO/KM (B)	TARIFA (C)	COSTO D=A*B*C
					\$ -
					\$ -
SUBTOTAL P					-
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					4.603
INDIRECTOS Y UTILIDADES %				19%	0.870
OTROS INDIRECTOS %				0%	-
COSTO TOTAL DEL RUBRO					5.473
VALOR OFERTADO					\$ 5.47

PRECIOS NO INCLUYEN I.V.A

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

TABLA 6.9. APU 07 - DESALOJO DE CENIZA VOLCÁNICA CON VOLQUETA Y CARGADORA FRONTAL

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS				UNIDAD:	m ³
RUBRO:	Desalojo de ceniza volcánica con volqueta y cargadora frontal				
EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (A)	TARIFA (B)	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO (R)	COSTO D=C*R
Herramienta menor (5% de M.O)					\$ 0.06
Cargadora frontal	1.00	35.00	\$ 35.00	0.067	\$ 2.35
Volqueta de 12 m ³	1.00	30.00	\$ 30.00	0.067	\$ 2.01
SUBTOTAL M					4.412
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (A)	JORNAL/HR (B)	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO (R)	COSTO D=C*R
Operador equipo pesado C1 G1	1.00	6.00	\$ 6.00	0.067	\$ 0.40
Chofer licencia tipo E	1.00	6.50	\$ 6.50	0.067	\$ 0.44
Ayudante de maquinaria (Estruc. Ocup. C3)	1.00	4.50	\$ 4.50	0.067	\$ 0.30
SUBTOTAL N					1.139
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	P. UNITARIO (B)	COSTO C=A*B	
				\$	-
				\$	-
				\$	-
				\$	-
SUBTOTAL O					-
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	COSTO/KM (B)	TARIFA (C)	COSTO D=A*B*C
					\$ -
					\$ -
SUBTOTAL P					-
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					5.551
INDIRECTOS Y UTILIDADES %				19%	1.050
OTROS INDIRECTOS %				0%	-
COSTO TOTAL DEL RUBRO					6.601
VALOR OFERTADO					\$ 6.60

PRECIOS NO INCLUYEN I.V.A

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

TABLA 6.10. APU 08 - TRANSPORTE DE CENIZA VOLCÁNICA EN VOLQUETAS HASTA 10 KM

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS				UNIDAD:	m ³
RUBRO:	Transporte de ceniza volcánica en volquetas hasta 10 km				
EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (A)	TARIFA (B)	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO (R)	COSTO D=C*R
Volqueta de 12 m ³	1.00	30.00	\$ 30.00	0.055	\$ 1.65
				SUBTOTAL M	1.650
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (A)	JORNAL/HR (B)	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO (R)	COSTO D=C*R
Chofer licencia tipo E	1.00	6.50	\$ 6.50	0.055	\$ 0.36
				SUBTOTAL N	0.358
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	P. UNITARIO (B)	COSTO C=A*B	
				\$	-
				\$	-
				\$	-
				SUBTOTAL O	-
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	COSTO/KM (B)	TARIFA (C)	COSTO D=A*B*C
					\$ -
					\$ -
				SUBTOTAL P	-
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					2.008
INDIRECTOS Y UTILIDADES %				19%	0.380
OTROS INDIRECTOS %				0%	-
COSTO TOTAL DEL RUBRO					2.388
VALOR OFERTADO					\$ 2.39

PRECIOS NO
INCLUYEN I.V.A

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

TABLA 6.11. APU 09 - BODEGA PROVISIONAL CON CUBIERTA METÁLICA

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS				UNIDAD:	m ³
RUBRO:		Bodega provisional con cubierta metálica			
EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (A)	TARIFA (B)	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO (R)	COSTO D=C*R
Herramienta menor (5% de M.O)					\$ 0.60
SUBTOTAL M					0.600
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (A)	JORNAL/HR (B)	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO (R)	COSTO D=C*R
Albañil (Estruc. Ocup. D2)	1.00	5.00	\$ 5.00	0.750	\$ 3.75
Peón (Estruc. Ocup. E2)	2.00	4.00	\$ 8.00	0.750	\$ 6.00
Maestro de obra (Estruc. Ocup. C1)	0.50	6.00	\$ 3.00	0.750	\$ 2.25
SUBTOTAL N					12.000
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	P. UNITARIO (B)	COSTO C=A*B	
Clavos (2" - 2 1/2" - 3" - 3 1/2")	kg	0.32	\$ 2.50	\$ 0.80	
Alfajia 6x6x250 cm	u	0.80	\$ 2.50	\$ 2.00	
Puntal de madera eucalipto	ml	1.60	\$ 1.12	\$ 1.79	
Tabla de monte 30 cm	u	4.00	\$ 2.27	\$ 9.08	
Tiras 2.5x2.5x250 cm	u	1.60	\$ 0.49	\$ 0.78	
Viga de eucalipto 15x15 cm	ml	0.40	\$ 4.61	\$ 1.84	
Cubierta metálica e=0.06mm	m ²	0.80	\$ 15.23	\$ 12.18	
SUBTOTAL O					28.484
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	COSTO/KM (B)	TARIFA (C)	COSTO D=A*B*C
					\$ -
					\$ -
SUBTOTAL P					-
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					41.084
INDIRECTOS Y UTILIDADES %				19%	7.810
OTROS INDIRECTOS %				0%	-
COSTO TOTAL DEL RUBRO					48.894
VALOR OFERTADO					\$ 48.89

PRECIOS NO INCLUYEN I.V.A

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

TABLA 6.12. APU 10 - SECADO DE CENIZA VOLCÁNICA CON HORNO INDUSTRIAL ELÉCTRICO

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS				UNIDAD:	m ³
RUBRO:	Secado de ceniza volcánica con horno industrial eléctrico				
EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (A)	TARIFA (B)	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO (R)	COSTO D=C*R
Herramienta menor (5% de M.O)					\$ 0.16
Horno industrial eléctrico de hasta 125 kg	3.00	1.31	\$ 3.92	14.187	\$ 55.56
				SUBTOTAL M	55.721
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (A)	JORNAL/HR (B)	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO (R)	COSTO D=C*R
Peón (Estruc. Ocup. E2)	1.00	4.00	\$ 4.00	0.500	\$ 2.00
Albañil (Estruc. Ocup. D2)	0.50	5.00	\$ 2.50	0.500	\$ 1.25
				SUBTOTAL N	3.250
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	P. UNITARIO (B)	COSTO C=A*B	
				\$	-
				\$	-
				\$	-
				\$	-
				SUBTOTAL O	-
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	COSTO/KM (B)	TARIFA (C)	COSTO D=A*B*C
					\$ -
					\$ -
				SUBTOTAL P	-
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					58.971
INDIRECTOS Y UTILIDADES %				19%	11.200
OTROS INDIRECTOS %				0%	-
COSTO TOTAL DEL RUBRO					70.171
PRECIOS NO INCLUYEN I.V.A				VALOR OFERTADO	\$ 70.17

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

TABLA 6.13. APU 11 - TAMIZADO DE CENIZA VOLCÁNICA

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS				UNIDAD:	m ³	
RUBRO:	Tamizado de ceniza volcánica					
EQUIPOS						
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (A)	TARIFA (B)	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO (R)	COSTO D=C*R	
Herramienta menor (5% de M.O)					\$ 0.28	
SUBTOTAL M					0.281	
MANO DE OBRA						
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (A)	JORNAL/HR (B)	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO (R)	COSTO D=C*R	
Peón (Estruc. Ocup. E2)	2.00	4.00	\$ 8.00	0.703	\$ 5.63	
SUBTOTAL N					5.625	
MATERIALES						
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	P. UNITARIO (B)	COSTO C=A*B		
Zaranda N°200 artesanal de 80x80 cm	m ²	2.00	\$ 24.29	\$ 48.58		
SUBTOTAL O					48.580	
TRANSPORTE						
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	COSTO/KM (B)	TARIFA (C)	COSTO D=A*B*C	
					\$ -	
					\$ -	
SUBTOTAL P					-	
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					54.486	
				INDIRECTOS Y UTILIDADES %	19%	10.350
				OTROS INDIRECTOS %	0%	-
COSTO TOTAL DEL RUBRO					64.836	
VALOR OFERTADO					\$ 64.84	

PRECIOS NO
INCLUYEN I.V.A

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

TABLA 6.14. APU 12 - EMPAQUETADO EN FUNDAS DE 25 KG

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS				UNIDAD:	m ³
RUBRO:	Empaquetado en fundas de 25 kg				
EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (A)	TARIFA (B)	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO (R)	COSTO D=C*R
Herramienta menor (5% de M.O)					\$ 0.16
SUBTOTAL M					0.160
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (A)	JORNAL/HR (B)	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO (R)	COSTO D=C*R
Ayudante (Estruc. Ocup. E2)	1.00	4.00	\$ 4.00	0.800	\$ 3.20
SUBTOTAL N					3.200
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	P. UNITARIO (B)	COSTO C=A*B	
Selladora de fundas plásticas pedal industrial	u	0.05	\$ 150.00	\$ 7.50	
Fundas de empaque plástica 50x40x15 cm	u	117.00	\$ 0.25	\$ 29.25	
SUBTOTAL O					36.750
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	COSTO/KM (B)	TARIFA (C)	COSTO D=A*B*C
					\$ -
					\$ -
SUBTOTAL P					-
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					40.110
INDIRECTOS Y UTILIDADES %				19%	7.620
OTROS INDIRECTOS %				0%	-
COSTO TOTAL DEL RUBRO					47.730
VALOR OFERTADO					\$ 47.73

PRECIOS NO
INCLUYEN I.V.A

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

6.2.2. APU's DE ESTABILIZACIÓN CON CENIZA VOLCÁNICA

En la Tabla 6.15., se describen el resumen de los rubros para la estabilización con ceniza a diferentes porcentajes utilizados en este estudio, para posteriormente identificar el porcentaje más óptimo a nivel económico entre los valores de 17.02, 32.04 y 47.07 \$/m³. Como se observa, únicamente se mencionan los costos directos por rubro, excluyendo al porcentaje de indirecto y utilidades, esto se hace por facilidad de comparar con otros tipos de estabilización en condiciones similares.

TABLA 6.15. RESUMEN DEL COSTO DIRECTO DE ESTABILIZACIÓN CON CENIZA AL 10, 20 Y 30%

Rubro	Unidad	Costo Directo (\$)
Estabilización de arcilla expansiva con 10% de ceniza volcánica	m ³	\$ 17.02
Estabilización de arcilla expansiva con 20% de ceniza volcánica	m ³	\$ 32.04
Estabilización de arcilla expansiva con 30% de ceniza volcánica	m ³	\$ 47.07

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

Los detalles de los APU's con diferentes dosificaciones se encuentran en la Tabla 6.16, 6.17 y 6.18., resaltando que la única variación es la cantidad de ceniza utilizada en porcentaje del peso seco del suelo natural.

Una descripción breve de los procesos utilizados en las estabilizaciones propuestas se revisa en la sección 3.3.3.2.

TABLA 6.16. APU 13 - ESTABILIZACIÓN DE ARCILLA EXPANSIVA CON 10% DE CENIZA VOLCÁNICA

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS				UNIDAD:	m ³
RUBRO:	Estabilización de arcilla expansiva con 10% de ceniza volcánica				
EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (A)	TARIFA (B)	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO (R)	COSTO D=C*R
Herramienta menor (5% de M.O)					\$ 0.04
Motoniveladora	1.00	35.00	\$ 35.00	0.013	\$ 0.46
Tanquero de agua	1.00	25.00	\$ 25.00	0.013	\$ 0.33
Rodillo pata de cabra	1.00	35.00	\$ 35.00	0.013	\$ 0.46
Rodillo vibratorio liso	1.00	35.00	\$ 35.00	0.013	\$ 0.46
				SUBTOTAL M	1.271
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (A)	JORNAL/HR (B)	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO (R)	COSTO D=C*R
Operador equipo pesado C1 G1	3.00	6.00	\$ 18.00	0.013	\$ 0.23
Ayudante de maquinaria (Estruc. Ocup. C3)	2.00	4.50	\$ 9.00	0.013	\$ 0.12
Chofer licencia tipo E	1.00	6.50	\$ 6.50	0.013	\$ 0.08
Peón (Estruc. Ocup. E2)	4.00	4.00	\$ 16.00	0.013	\$ 0.21
Albañil (Estruc. Ocup. D2)	1.00	5.00	\$ 5.00	0.013	\$ 0.07
Maestro de obra (Estruc. Ocup. C1)	0.10	6.00	\$ 0.60	0.013	\$ 0.01
				SUBTOTAL N	0.716
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	P. UNITARIO (B)	COSTO C=A*B	
Ceniza volcánica del Tungurahua	kg	162.41	\$ 0.09	\$ 15.02	
Agua	m ³	0.10	\$ 0.07	\$ 0.01	
				SUBTOTAL O	15.032
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	COSTO/KM (B)	TARIFA (C)	COSTO D=A*B*C
					\$ -
					\$ -
				SUBTOTAL P	-
		TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)			17.019
		INDIRECTOS Y UTILIDADES %			22%
		OTROS INDIRECTOS %			0%
		COSTO TOTAL DEL RUBRO			20.759
		VALOR OFERTADO			\$ 20.76

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

TABLA 6.17. APU 14 - ESTABILIZACIÓN DE ARCILLA EXPANSIVA CON 20% DE CENIZA VOLCÁNICA

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS				UNIDAD:	m ³	
RUBRO:	Estabilización de arcilla expansiva con 20% de ceniza volcánica					
EQUIPOS						
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (A)	TARIFA (B)	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO (R)	COSTO D=C*R	
Herramienta menor (5% de M.O)					\$ 0.04	
Motoniveladora	1.00	35.00	\$ 35.00	0.013	\$ 0.46	
Tanquero de agua	1.00	25.00	\$ 25.00	0.013	\$ 0.33	
Rodillo pata de cabra	1.00	35.00	\$ 35.00	0.013	\$ 0.46	
Rodillo vibratorio liso	1.00	35.00	\$ 35.00	0.013	\$ 0.46	
				SUBTOTAL M	1.271	
MANO DE OBRA						
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (A)	JORNAL/HR (B)	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO (R)	COSTO D=C*R	
Operador equipo pesado C1 G1	3.00	6.00	\$ 18.00	0.013	\$ 0.23	
Ayudante de maquinaria (Estruc. Ocup. C3)	2.00	4.50	\$ 9.00	0.013	\$ 0.12	
Chofer licencia tipo E	1.00	6.50	\$ 6.50	0.013	\$ 0.08	
Peón (Estruc. Ocup. E2)	4.00	4.00	\$ 16.00	0.013	\$ 0.21	
Albañil (Estruc. Ocup. D2)	1.00	5.00	\$ 5.00	0.013	\$ 0.07	
Maestro de obra (Estruc. Ocup. C1)	0.10	6.00	\$ 0.60	0.013	\$ 0.01	
				SUBTOTAL N	0.716	
MATERIALES						
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	P. UNITARIO (B)	COSTO C=A*B		
Ceniza volcánica del Tungurahua	kg	324.81	\$ 0.09	\$ 30.05		
Agua	m ³	0.10	\$ 0.07	\$ 0.01		
				SUBTOTAL O	30.057	
TRANSPORTE						
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	COSTO/KM (B)	TARIFA (C)	COSTO D=A*B*C	
					\$ -	
					\$ -	
				SUBTOTAL P	-	
		TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)			32.044	
		INDIRECTOS Y UTILIDADES %			22%	7.0500
		OTROS INDIRECTOS %			0%	-
		COSTO TOTAL DEL RUBRO			39.094	
		VALOR OFERTADO			\$ 39.09	

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

TABLA 6.18. APU 15 - ESTABILIZACIÓN DE ARCILLA EXPANSIVA CON 30% DE CENIZA VOLCÁNICA

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS				UNIDAD:	m ³
RUBRO:	Estabilización de arcilla expansiva con 30% de ceniza volcánica				
EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (A)	TARIFA (B)	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO (R)	COSTO D=C*R
Herramienta menor (5% de M.O)					\$ 0.04
Motoniveladora	1.00	35.00	\$ 35.00	0.013	\$ 0.46
Tanquero de agua	1.00	25.00	\$ 25.00	0.013	\$ 0.33
Rodillo pata de cabra	1.00	35.00	\$ 35.00	0.013	\$ 0.46
Rodillo vibratorio liso	1.00	35.00	\$ 35.00	0.013	\$ 0.46
				SUBTOTAL M	1.271
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (A)	JORNAL/HR (B)	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO (R)	COSTO D=C*R
Operador equipo pesado C1 G1	3.00	6.00	\$ 18.00	0.013	\$ 0.23
Ayudante de maquinaria (Estruc. Ocup. C3)	2.00	4.50	\$ 9.00	0.013	\$ 0.12
Chofer licencia tipo E	1.00	6.50	\$ 6.50	0.013	\$ 0.08
Peón (Estruc. Ocup. E2)	4.00	4.00	\$ 16.00	0.013	\$ 0.21
Albañil (Estruc. Ocup. D2)	1.00	5.00	\$ 5.00	0.013	\$ 0.07
Maestro de obra (Estruc. Ocup. C1)	0.10	6.00	\$ 0.60	0.013	\$ 0.01
				SUBTOTAL N	0.716
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	P. UNITARIO (B)	COSTO C=A*B	
Ceniza volcánica del Tungurahua	kg	487.22	\$ 0.09	\$ 45.07	
Agua	m ³	0.10	\$ 0.07	\$ 0.01	
				SUBTOTAL O	45.082
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD (A)	COSTO/KM (B)	TARIFA (C)	COSTO D=A*B*C
					\$ -
					\$ -
				SUBTOTAL P	-
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					47.069
INDIRECTOS Y UTILIDADES %				22%	10.3600
OTROS INDIRECTOS %				0%	-
COSTO TOTAL DEL RUBRO					57.429
VALOR OFERTADO					\$ 57.43

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

6.3. ANÁLISIS EN FUNCIÓN DEL COSTO-BENEFICIO

Una vez obtenido el costo aproximado de la producción de ceniza y posteriormente, haber calculado el proceso de estabilización de arcillas expansivas con dosificaciones de ceniza del 10, 20 y 30% en peso seco del suelo, es factible efectuar una comparación del costo directo los diferentes métodos de estabilización para 1 m³ de suelo propuestos. Como anteriormente se mencionó, se recopiló información de estudios recientemente efectuados con metodologías similares y así en la Tabla 6.19 se perciben los resultados, además de indicar el porcentaje relativo de cada método en relación al más costoso.

TABLA 6.19. COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN SEGÚN EL COSTO DIRECTO

Rubro	Unidad	Costo Directo (\$)	Porcentaje relativo (%)
Estabilización de arcilla expansiva con 10% de ceniza volcánica	m ³	\$ 17.02	36%
Estabilización de arcilla expansiva con 20% de ceniza volcánica	m ³	\$ 32.04	68%
Estabilización de arcilla expansiva con 30% de ceniza volcánica	m ³	\$ 47.07	100%
Estabilización con 9% de cemento tipo MH	m ³	\$ 24.49	52%
Estabilización de arcilla con 7% de cemento.	m ³	\$ 30.62	65%
Estabilización de arcilla con 7% de cal.	m ³	\$ 25.92	55%
Estabilización de suelos expansivos con 1.5% de polímeros	m ³	\$ 20.46	43%
Estabilización de arcilla con el 16% de cal e=40 cm	m ³	\$ 25.45	54%

Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

En la Gráfica 6.1., se visualiza la misma información a través de barras. Claramente la dosificación al 30% resulta ser la más costosa con un valor de \$47.07 y opuestamente, la del 10% es la de menor costo con \$17.02, sin embargo, ésta última no cumple satisfactoriamente en su comportamiento físico-mecánico para todos los ensayos efectuados.

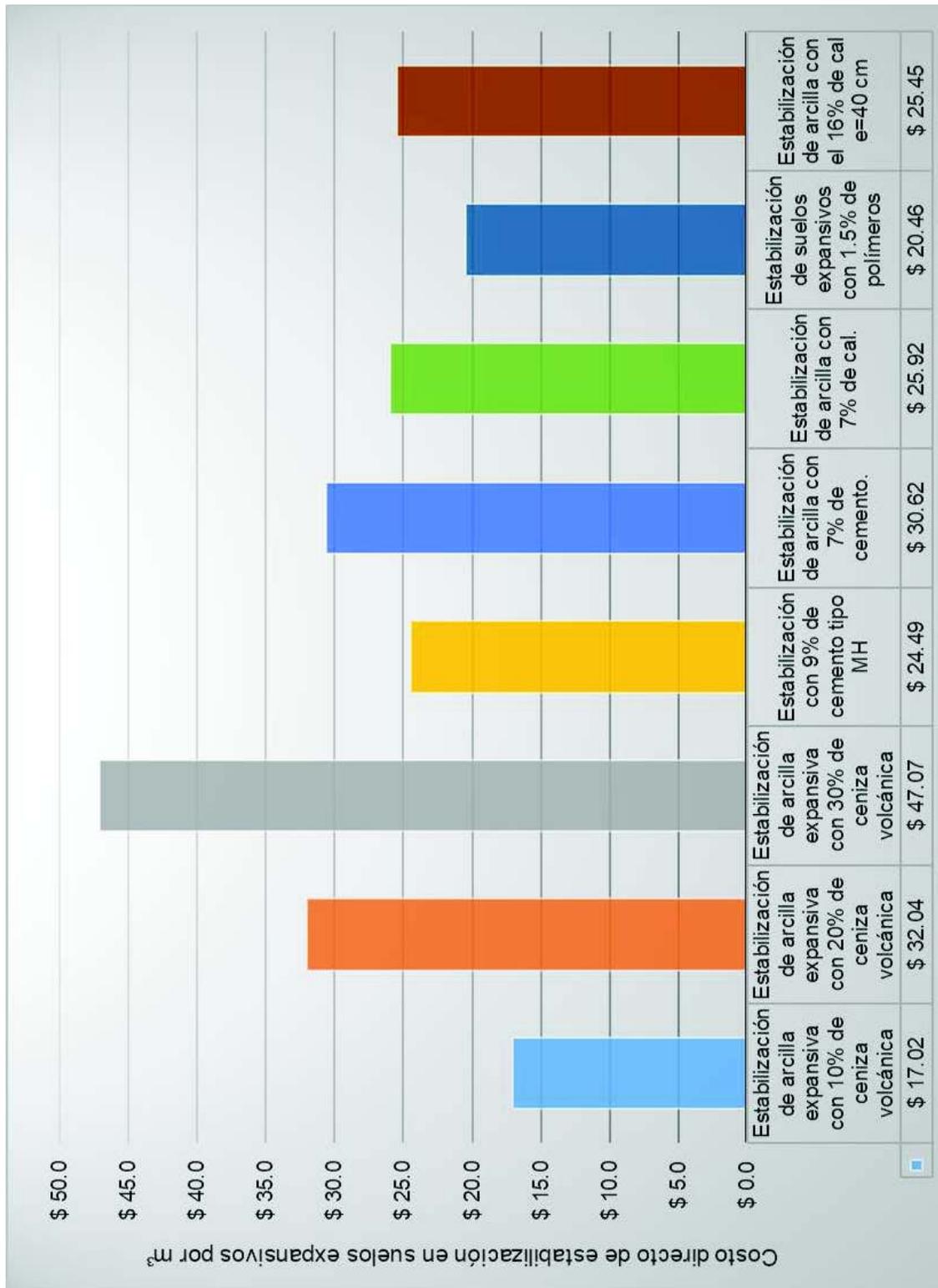
La dosificación óptima hallada es la del 20% con un costo directo de \$32.04, esto responde no solamente a un análisis económico de precios, debido a que con este porcentaje de mezcla se reafirma lo señalado en la sección 5.3., del texto,

que fue posible demostrar ser la más adecuada en todas las variables analizadas, cumpliendo fielmente con su objetivo, que es la estabilización de la arcilla expansiva.

Adicionalmente, se debe señalar que a pesar de que la dosificación óptima encontrada no es la de menor costo con respecto a otras, en donde se usa como aditivo al cemento, cal o polímeros en diferentes porcentajes, sí es posible obtener mayores beneficios no cuantificables de la mezcla propuesta en esta investigación. También, se aclara que los valores calculados para las 3 diferentes mezclas del estudio se realizaron con el principio de explotar a la ceniza de forma comercial, sin embargo, no se debe olvidar la posibilidad de apenas recoger este material en futuras erupciones, lo que provocaría una reducción importante en sus costos y así, poder considerarlos como materiales de construcción y no desperdicios.

Los beneficios no cuantificables que se pueden sumar son claramente el menor impacto ambiental, pues al no ser un producto industrial contaminante la huella de carbono producida es prácticamente nula con respecto a materiales como la cal o el cemento, además del uso adecuado de suelos existentes en los lugares específicos de la construcción, evitando la importación de estos.

GRÁFICA 6.1. COSTO DIRECTO DE ESTABILIZACIÓN POR M³ SEGÚN LOS MÉTODOS INVESTIGADOS Y TRADICIONALES



Elaborado por: (Buitrón & Enríquez, 2018)

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

- En general fue posible efectuar el estudio de la estabilización de arcillas expansivas de la provincia de Manabí con ceniza del volcán Tungurahua en diferentes dosificaciones de 10, 20 y 30% en peso del suelo seco. Así, se analizaron las propiedades físico - mecánicas para poder interpretar la influencia de cada porcentaje en la búsqueda de la mejora de estos parámetros.
- La dosificación óptima hallada en la investigación es del 20% para los suelos arcillosos expansivos, avalada en los resultados de las propiedades como consistencia, actividad, índice de expansión, permeabilidad, análisis mineralógicos por rayos X, resistencia al corte directo, consolidación y costo-beneficio que aporta el método alternativo de estabilización.
- El costo de la ceniza producida se calculó en 9.25 ctvos/kg, valor en principio superior a materiales industrializados conocidos en el mercado como el cemento o la cal. Cuando se traslada el costo a la estabilización por m³, se obtuvieron valores de 17.02, 32.04, 47.07 \$/m³ que igualmente son mayores a los métodos tradicionales de estabilización. Sin embargo, los costos calculados fueron estimados para el escenario más desfavorable que es una escala de producción desde el desbanque en la veta de ceniza. Este escenario podría invertirse por los fenómenos naturales recurrentes en el país como la emisión de ceniza y a partir de esta investigación empezar a ver a este tipo de materiales como aptos en el uso de la construcción civil y ya no como desperdicios.
- Se descubrió la presencia de Montmorillonita en 5% y Caolinita en hasta 30% para los suelos naturales estudiados con el ensayo de difracción de rayos X. Cuando se habla de minerales que provocan la expansión en arcillas, la Montmorillonita muchas veces es el principal promotor del efecto

por su extensa superficie específica. La relación existente con el potencial de expansión se apoya firmemente con los resultados de actividad y de índice de expansión, los mismos que al recibir el tratamiento con ceniza volcánica redujeron desde escalas de Muy Alta a Media y de Muy Alta a Baja, respectivamente, afirmando que la influencia del aditivo es significativa.

- El grado de reproducibilidad y repetitividad de los ensayos resultaron efectivos cuando se aplicaron las condiciones exigidas en las normas ASTM. Sin embargo, no fue posible cuantificarlas en términos de sesgos o límites de confianza, dado que para efectuarlo con pruebas F (Snedecor) o T (Student) se proponen metodologías que necesitan un número de muestras muy superior al estudiado, si se tomaran tales valores de muestras la investigación se tornaría inviable por recursos materiales y humanos.
- Se evidenció claramente que, a pesar de realizar los ensayos de las muestras naturales sobre bloques inalterados, en aquellas fracciones pequeñas de suelo hubo cambios relativamente significativos por la misma naturaleza heterogénea del suelo, una constatación de lo mencionado fue en la permeabilidad, que, pese a que clasificaron como no permeables, la muestra M5 registró resultados distantes pero coherentes.
- Según el Sistema de Clasificación Unificada de Suelos (SUCS) los suelos naturales 3, 4 y 5 se identificaron como muestras de MH-CH, CH y CH, respectivamente. Es decir, suelos arcillosos de alta plasticidad, los que son susceptibles a cambios de volumen por su facilidad de absorción de agua y no recomendables en el uso común para cimentaciones o uso vial.
- Los límites de consistencia, límite líquido (LL), límite plástico (LP) e índice de plasticidad (IP) tuvieron cambios representativos según fue el porcentaje de ceniza utilizado. Se determinó que el LL y el IP disminuyen en función de la ceniza mezclada, sin embargo, el comportamiento del LP es opuesto, éste incrementa según sea la cantidad de aditivo. Para la dosificación del 20% de ceniza en los suelos 3, 4 y 5 se generó un

porcentaje de disminución del 25, 19 y 14% para el LL, así como 59, 41 y 42% para el IP. Finalmente, para el LP el porcentaje de aumento en estas condiciones fue de 23, 19 y 39% para los suelos citados.

- La granulometría por lavado de las muestras naturales 3, 4 y 5, aportaron información sobre el porcentaje que pasó del tamiz N°200 que fue de 90.1, 88.3 y 89.2%, significando que casi la totalidad del suelo graduado en tamices son menores al tamaño de 0.075mm, siendo un material muy fino, característico de las arcillas. Además, en la granulometría por hidrómetro se calculó el porcentaje de arcilla menor a un tamaño de $2\mu\text{m}$ que fue de 44, 49.75 y 47.52%, resultados valiosos para la obtención de la actividad.
- Un parámetro esencial en el estudio fue el índice de expansión que para los suelos naturales 3, 4 y 5 con la dosificación del 20% de ceniza se alcanzó un porcentaje de disminución del 65, 50 y 38% respectivamente, demostrando así su eficacia ante este tipo de suelos y expansividad, pues se reduce directamente las deformaciones.
- En la caracterización física de los suelos, las densidades de sólidos de las muestras naturales presentaron valores entre 2.75 a 2.78, acordes a las arcillas de alta plasticidad. La compactación como propiedad mecánica de los suelos para las muestras 3, 4 y 5 se alcanzó una densidad seca máxima de 1.53, 1.64 y 1.63 g/cm^3 con contenidos de humedad óptimos de 25.36, 19.66 y 17.56% respectivamente, conforme a suelos de este tipo.
- En el ensayo de permeabilidad, para todas las muestras, tanto naturales como dosificadas se clasificaron como no permeables, siendo este un indicador positivo para la evacuación de agua. A la par con este parámetro estuvo la relación de vacíos, que básicamente cuando se aumenta el porcentaje de ceniza, disminuye la relación de vacíos debido a la ocupación de las partículas de ceniza en la masa de suelo natural.
- En corte directo, el ángulo de fricción interno para las muestras 3, 4 y 5 con la dosificación del 20% de ceniza se consiguió un porcentaje de aumento del 31, 150 y 125% respectivamente. Agregando que la cohesión para los mismos suelos con igual dosificación se consiguió porcentajes de aumento del 742, 633 y 279%, respectivamente para los suelos citados. Ambas

variables son una muestra de la mejora mecánica a la que reaccionan las arcillas expansivas por de la ceniza volcánica.

- Los asentamientos por consolidación primaria son de vital importancia para el estudio de arcillas expansivas sobreconsolidadas y sus efectos en las estructuras por las deformaciones. Fue posible calcular que las muestras naturales, así como las dosificadas son todas sobreconsolidadas con un $OCR > 1$. Además, que se tienen variables como la presión de preconsolidación σ'_c , coeficiente de consolidación C_v , relación de vacíos inicial e_0 , las variaciones de relación de vacíos Δe y de alturas ΔH en todos sus estados (carga, descarga y el último estado de descarga) obedecen a una tendencia que disminuyen sus valores si aumenta el porcentaje de ceniza mezclado, favoreciendo de esta forma directamente a la reducción del asentamiento primario en beneficio de la estabilización.

7.2. RECOMENDACIONES

- Los resultados y análisis de cada ensayo elaborado están direccionados particularmente a suelos expansivos de la provincia de Manabí con la ceniza del volcán Tungurahua, no es posible generalizar todavía el uso y el potencial de efectividad, por lo que se recomienda ampliar la gama de suelos en la zona y a la aplicación en campo para corroborar el efecto de estabilización provocado.
- En base a este estudio y a diversas investigaciones sobre el tipo de suelo de la provincia de Manabí, se conoce que la misma posee una variedad de arcillas expansivas y, por lo tanto, es necesario realizar estudios de suelos con profundidad, siempre que se realicen construcciones para reducir estas amenazas, volverlas más seguras y económicas.
- Se debe proteger las muestras inalteradas con mucho cuidado desde el mismo proceso de extracción y almacenaje, sobre todo para que no pierdan el contenido de humedad natural, consistencia o sufra roturas, garantizando de cierta forma que los resultados de estos especímenes no van a diferir en gran escala con la realidad.

- Es necesario el continuo seguimiento de investigaciones que utilicen nuevos materiales para la estabilización de suelos expansivos, los cuales tengan un efecto positivo tanto en el mejoramiento del suelo y que sean amigables con el medio ambiente para la resolución de problemas geotécnicos en nuestro país.
- Cuando se efectúa la granulometría de los suelos por lavado, es muy útil y eficaz realizar la granulometría por hidrómetro para así poder obtener los porcentajes de arcilla que sean menores a los del tamiz N°200, principalmente porque hay una cantidad importante de estos cuando se trata de suelos arcillosos.
- Se recomienda continuar con el estudio de métodos de estabilización alternativos en el territorio nacional, con el uso de una cantidad mayor de muestras extraídas para alcanzar un radio de alcance de reproducibilidad mayor y pueda ser más representativo, sin embargo, deberá realizarse un equilibrio entre las muestras y la cantidad de ensayos a efectuar.
- Sería importante la generación de nuevos planes de extracción de ceniza, el mismo que aportará una disminución valiosa en el costo de la estabilización estudiado. Con seguridad, los planes podrán reproducirse cuando exista un exceso del material natural investigado.
- Realizar el estudio del efecto en el tiempo de la ceniza volcánica en suelos expansivos para valorar su desgaste o permanencia en las propiedades físico - mecánicas de los especímenes.
- En el ensayo de consolidación para los suelos arcillosos expansivos, cuando se utiliza el método de Casagrande en el cálculo del tiempo t_{90} , es indispensable graficar los resultados cada día en cada estado de carga o descarga, en caso de no hacerlo, posiblemente no se tenga la información verídica si la muestra llegó o no a la consolidación secundaria, invalidando el reporte de datos generado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI Committee 230. (1991). ACI 230.1R. State of the Art Report on Soil Cement.

Acosta, K. (2015). Ubicación del contacto bioestratigráfico plioceno-pleistoceno al noroeste de San José - sur de la provincia de Manabí (Tesis de pregrado). Universidad de Guayaquil. Ecuador. Recuperado de: <http://repositorio.uq.edu.ec/handle/redug/11722>

Aguilera, E. & Dueñas, W. (2007). Las erupciones explosivas del volcán Tungurahua de julio y agosto de 2006. Evaluación del funcionamiento del sistema de prevención y atención de emergencias volcánicas.

Al-Rawas, A., Hago, A. & Al-Sarmi, H. (2005). Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman. Building and Environment, 40, 681-687.

ASTM INTERNATIONAL. (2010). ASTM D2216-10. Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass.

ASTM INTERNATIONAL. (2015). ASTM D854-10. Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer.

ASTM INTERNATIONAL. (2017). ASTM D7928-17. Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis.

ASTM INTERNATIONAL. (2017). ASTM D4318-17. Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.

ASTM INTERNATIONAL. (2011). ASTM D2487-11. Standard Practice for Classification of soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classifications System).

ASTM INTERNATIONAL. (2006). ASTM D2334-06. Permeability of Granular Soils (Constant Head).

ASTM INTERNATIONAL. (2011). ASTM D4829-11. Expansion Index of Soils.

ASTM INTERNATIONAL. (2012). ASTM D1557-12. *Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56.00 ft-lbf/ft³ (2.700 kN-m/m³))*.

ASTM INTERNATIONAL. (2011). ASTM D3080-11. *Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*.

Ayala, G. (2017). *Estabilización y control de suelos expansivos utilizando polímeros (Tesis de pregrado)*. Universidad de Especialidades Espíritu Santo. Ecuador. Recuperado de: <http://repositorio.uees.edu.ec/123456789/1945>

Baldock, J. W. (1982). *Geología del Ecuador. Boletín de la Explicación del Mapa Geológico de la República del Ecuador Escala 1:1,000.000*. Ministerio de Recursos Naturales y Energéticos, Dirección General de Geología y Minas. Quito.

Bauzá, J. (2015). *El tratamiento de los suelos arcilloso con cal. Comportamiento mecánico y evolución a largo plazo ante cambios de humedad (Tesis doctoral)*. Universidad de Sevilla. España. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11441/32957>

Camacho, J., Reyes, O., Mayorga, C. & Méndez, D. (2006). *Evaluación de aditivos usados en el tratamiento de arcillas expansivas*. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 16(2). 45-53.

Carretero, M. & Pozo, M. (2007). *Mineralogía Aplicada Salud y Medio Ambiente (1era ed.)*. España: International Thomson Editores Spain Paraninfo S.A.

Castillo, B. (2017). *Estabilización de Suelos Arcillosos de Macas con Valores de CBR menores al 5% y Límites Líquidos superiores al 100%, para utilizarlos como Subrasantes en Carreteras (Tesis de posgrado)*. Universidad de Cuenca. Recuperado de: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/26917>

Clavijo, D. & Jurado, C. (2016). *Estabilización de suelos con cemento tipo MH para mejorar las características físicas y mecánicas del material de subsuelo de la zona de talleres y cocheras de la PLMQ, sector Quitumbe (Tesis de pregrado)*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Ecuador. Recuperado de: <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/13191>

Crespo, C. (2004). *Mecánica de suelos y Cimentaciones*. (5ta ed.). México: Editorial Limusa.

Das, B. (2001). *Principios de Ingeniería de Cimentaciones* (4ta ed.). México: International Thomson Editores, S.A.

Das, B. (2012). *Principios de Ingeniería de Cimentaciones* (7ma ed.). México: Cengage Learning Editores.

Das, B. (2015). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (4ta ed.). México: Cengage Learning Editores.

Driscoll, R. & Crilly, M. (2000). *Subsidence damage to domestic buildings: Lessons learned and questions asked. Foundation for the Built Environment Report 1*. London: Construction Communications Ltd.

Gobierno Provincial de Manabí. (2017). Obtenido del Gobierno Provincial de Manabí Website: <http://www.manabi.gob.ec/cantones>

Guevara, A., (2015). *Estudio de las propiedades de las cenizas del volcán Tungurahua, Ecuador, para identificar los factores que determinan su impacto en suelos y cultivos*. (Tesis doctoral). Université catholique de Louvain. Bélgica.

Higuera, C., Gómez, J. & Pardo, Ó. (2012). *Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio*. *Revista Facultad de Ingeniería, UPTC*, 21(32), 21-40.

Huezo, H. & Orellana, A. (2009). *Guía básica para estabilización de Suelos con cal en caminos de baja intensidad vehicular en El Salvador* (Tesis de pregrado). Universidad de El Salvador. El Salvador. Recuperado de: <http://ri.ues.edu.sv/2138/>

Instituto Geofísico IG-EPN. (2017). Obtenido de Instituto Geofísico Website: <http://www.igeptn.edu.ec/ovt>

Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional IG-EPN. (2017). *Volcán Tungurahua*. Escuela Politécnica Nacional. Recuperado de: <http://www.igeptn.edu.ec/tungurahua>

Instituto Oceanográfico de la Armada INOCAR. (2012). *Derrotero de las Costas Ecuatorianas. CAPÍTULO I: Información General de la República del Ecuador*. Recuperado de: https://www.inocar.mil.ec/docs/derrotero/derrotero_cap_1.pdf

Jones, L. & Jefferson, I. (2012). *Expansive Soils. ICE manual of geotechnical engineering. Volume 1, geotechnical engineering principles, problematic soils and site investigation*. London, UK, ICE Publishing, 413-441.

Juárez B. & Rico, A. (1995). *Mecánica de suelos (3era ed.)*, Tomo I. México: Editorial Limusa.

Le Pennec, J., Samaniego, P., Eissen, J., Hall. M., Molina. I., Robin. C., Mothes. P., Yepes. H., Ramón. P. & Monzier. M. (2005). *Los Peligros Volcanicos asociados con el Tungurahua*. 2da. ed. Instituto Geofísico de Escuela Politécnica Nacional IG-EPN y Institut de recherche pour le développement IRD. Corporación Editora Nacional. Quito

León, C. (2016). *Caracterización geomorfológica de la franja costera de punta gorda (Tesis de pregrado)*. Universidad de Guayaquil. Ecuador. Recuperado de: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/reduq/11671>

Luna, G. (2014). *Estudio del Hormigón*. Quito: Editorial Edicumbre.

Mora, G. (2013). *Estudio de problemas geotécnicos asociados a la presencia de arcillas expansivas en la carretera Rocafuerte-Tosagua, provincia de Manabí-Ecuador. Análisis de posibles tratamientos de mejora del terreno y recomendaciones constructivas (Tesis de posgrado)*. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Madrid. Recuperado de: <https://es.scribd.com/doc/185519323/Arcillas-Expansivas-en-La-Carretera-Rocafuerte-Tosagua-Mejora-Del-Terreno-y-Recomendaciones-Constructivas>

Nieto, J. & Parra, P. (1985). *Las arcillas expansivas: sus propiedades y estabilización (Tesis de pregrado)*. Escuela Politécnica Nacional. Quito.

Norma Técnica Ecuatoriana. (1982). NTE INEN0686-82. *Mecánica de Suelos. Toma de Muestras Alteradas*.

Norma Técnica Ecuatoriana. (2010). NTE INEN0697-82. Áridos. Determinación del material más fino que pasa por el tamiz con aberturas de 75 μm (No. 200), Mediante lavado.

Paladines, A. (1989). Zonificación geotectónica y metalogenia del Ecuador. Quito: Mañana Editores.

Petry, T. & Armstrong, C. (1989). Stabilization of Expansive Clay Soils. Transportation Research Record, 1219, 103-112.

Presupuestos de construcción, ConstruData. (2018). Obtenido de ConstruData Website: <http://www.construdata.com/>

Sánchez, M. (2014). Estabilización de suelos expansivos con cal y cemento en el sector Cacical del cantón Tosagua provincia de Manabí (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Quito. Recuperado de: <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/11180>

Schmid, R. (1981). Descriptive nomenclature and classification of pyroclastic deposits and fragments. Geologische Rundschau, 70, 794-799.

Sociedad Española de Arcillas. (2017). Obtenido del archivo de imágenes de la Sociedad Española de Arcillas Website: <http://sea-arcillas.si2.ninja/galeria/>

Terzaghi, K. & Peck, R. (1973). Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica (2da ed.), España: Editorial El Ateneo S.A.

Tigle, J. & Santoni, R. (2003). Stabilization of Clay Soils with Nontraditional Additives. Transportation Research Record, 1819, 72-84.

ANEXOS

ANEXO N.º 1:
DENSIDAD REAL DE LA CENIZA VOLCÁNICA

ANEXO N°. 2:
CLASIFICACIÓN DE SUELOS DE MUESTRAS NATURALES

**ANEXO N° 3:
GRANULOMETRÍA POR HIDRÓMETRO DE MUESTRAS
NATURALES**

ANEXO N°. 4:
ÍNDICE DE EXPANSIÓN DE MUESTRAS NATURALES

ANEXO N°. 5:
DENSIDAD DE SÓLIDOS DE MUESTRAS NATURALES

ANEXO N°. 6:
PERMEABILIDAD CON CARGA VARIABLE DE MUESTRAS
NATURALES

ANEXO N°. 7:
DIFRACCIÓN POR RAYOS X DE MUESTRAS NATURALES
(MUESTRA 3, 4 Y 5) Y CENIZA VOLCÁNICA (MUESTRA 6)

**ANEXO N° 8:
ESPECTROMETRÍA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X DE
MUESTRAS NATURALES (MUESTRA 3, 4 Y 5) Y CENIZA
VOLCÁNICA ((MUESTRA 6)**

ANEXO N°. 9:
COMPACTACIÓN DE MUESTRAS NATURALES

ANEXO N° 10:
CORTE DIRECTO DE MUESTRAS NATURALES

ANEXO N°. 11:
CONSOLIDACIÓN DE MUESTRAS NATURALES

ANEXO N° 12:
CLASIFICACIÓN DE SUELOS DE MUESTRAS DOSIFICADAS

ANEXO N°. 13:
GRANULOMETRÍA COMPLETA PARA ACTIVIDAD DE
MUESTRAS DOSIFICADAS

ANEXO N°. 14:
ÍNDICE DE EXPANSIÓN DE MUESTRAS DOSIFICADAS

ANEXO N°. 15:
DENSIDAD DE SÓLIDOS DE MUESTRAS DOSIFICADAS

ANEXO N° 16:
PERMEABILIDAD CON CARGA CONSTANTE DE MUESTRAS
DOSIFICADAS

ANEXO N° 17:
CORTE DIRECTO DE MUESTRAS DOSIFICADAS

ANEXO N°. 18:
CONSOLIDACIÓN DE MUESTRAS DOSIFICADAS