



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD
DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE
INGENIERÍA CIVIL**

**TRABAJO EXPERIMENTAL PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

Tema:

**“ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y
MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS
GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO”**

AUTOR: Jimmy Damián Macas Bustamante

TUTOR: Ing. Favio Portilla

Ambato – Ecuador

2019

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Yo, Ing. Fabio Portilla, certifico que el presente trabajo bajo el tema: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO, es de autoría del Sr. Jimmy Damián Macas Bustamante, el mismo que ha sido realizado bajo mi supervisión y tutoría. Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad.

Ambato, Diciembre del 2019



Ing. Fabio Portilla

AUTORÍA

Yo, Jimmy Damián Macas Bustamante con C.I: 110588010-6, egresado de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, certifico por medio de la presente que el trabajo con el tema: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO, es de mi completa autoría.

Ambato, Diciembre del 2019



Jimmy Damián Macas Bustamante

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Trabajo Experimental o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de mi Trabajo Experimental con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, Diciembre del 2019

Autor



Jimmy Damián Macas Bustamante

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del tribunal examinador aprueban el informe de investigación, sobre el tema: “ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO”, del egresado Jimmy Damián Macas Bustamante, de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Ambato, Diciembre del 2019

Para constancia firman.



Ing. Marisol Bayas



Ing. Lorena Pérez

DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico en primer lugar a Dios por haberme regalado la vida, por ser la luz que guía mi camino día tras día, por darme fe y fortaleza para seguir adelante en los momentos más difíciles y haber logrado culminar esta meta tan anhelada.

A mis Padres, Omar y Geovana, por su amor y apoyo incondicional, por ser un ejemplo de lucha, perseverancia y esfuerzo por estar conmigo en mi desarrollo como persona y como estudiante, les debo todo lo que soy.

A mi hermano Magner, por estar en los buenos, malos y peores momentos junto a mí, por brindarme su ayuda y apoyo incondicional.

A mi hermana Andrea y a mis abuelitos por toda la confianza y apoyo depositado en mí para la culminación de mis estudios.

AGRADECIMIENTO

A mis padres Omar y Geovana, la razón de mi vida y el motivo por el cual debo seguir adelante.

A mis hermanos Magner y Andrea, por cuidarme desde pequeño, enseñándome el valor del trabajo constante, y de lo importante que es la familia.

A mi tía Nancy, por cuidar de mí y sus consejos durante mi etapa Universitaria.

A mi familia, por dejar caer toda su confianza en mí.

A todos mis amigos que me brindaron un consejo y alentaron mis ganas de seguir adelante.

A mi tutor Ing. Mg. Favio Portilla, por brindarme su tiempo y conocimientos durante la realización de esta investigación.

ÍNDICE

A. PÁGINAS PRELIMINARES

PORTADA.....	i
CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA.....	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE.....	viii
LISTA DE TABLAS	xi
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
RESUMEN EJECUTIVO.....	xv
ABSTRACT.....	xvii

B. CONTENIDO

CAPÍTULO I.....	1
MARCO TEÓRICO	1
1.1 Antecedentes Investigativos.....	1
1.1.1 Antecedentes	1
1.1.2 Justificación	2
1.1.3 Fundamentación Teórica.....	4
1.1.3.1 Introducción	4
1.1.3.2 Características	4
1.1.3.2.1 Propiedades de los Granos	4
1.1.3.2.2 Propiedades del conjunto de partículas o agregado	6
1.1.3.3 Propiedades Índice	7
1.1.3.3.1 Relación de vacíos (e).....	8
1.1.3.3.2 Porosidad (η).....	8
1.1.3.3.3 Grado de Saturación de agua ($G_w\%$).....	9
1.1.3.3.4 Grado de Saturación de aire ($G_a\%$)	9
1.1.3.3.5 Contenido de humedad.....	9
1.1.3.3.6 Granulometría	10
1.1.3.3.7 Gravedad específica	11
1.1.3.3.8 Límites de Atterberg	12
1.1.3.3.8.1 Límite líquido (LL).....	12

1.1.3.3.8.2	Límite plástico (LP)	13
1.1.3.3.8.3	Índice plástico (IP)	13
1.1.3.3.8.4	Índice de liquidez (IL).....	14
1.1.3.4	Clasificación de los suelos	16
1.1.3.4.1	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)	16
1.1.3.4.2	Sistema de Clasificación de Suelos (AASHTO).....	18
1.1.3.5	Propiedades Mecánicas	19
1.1.3.5.1	Compactación.....	19
1.1.3.5.2	California Bearing Ratio (C.B.R)	22
1.1.3.6	Exploración geofísica.....	24
1.1.3.6.1	Introducción	24
1.1.3.6.2	Estudio de refracción sísmica.....	25
1.1.3.6.3	Estudio sísmico de perforaciones cruzadas.....	25
1.1.3.7	Resistividad eléctrica de los suelos	26
1.1.3.7.1	Principios básicos.....	26
1.1.3.7.2	Configuración de los electrodos y factores geométricos.....	33
1.1.3.7.2.1	Método de los cuatro electrodos	33
1.1.3.7.2.2	Configuración de los electrodos.....	35
1.1.3.7.3	Sondeo eléctrico vertical (VES).....	38
1.1.3.7.4	Método de interpretación	39
1.1.3.7.5	Factores que influyen en la resistividad de los suelos.....	40
1.1.3.7.6	Resistividad de algunos materiales naturales	42
1.1.3.8	Análisis de correlaciones	42
1.1.3.9	Correlación de dos variables	43
1.1.3.10	Correlación de variables múltiples.....	47
1.1.4	HIPÓTESIS	49
1.1.4.1	Señalamiento de variables de la hipótesis	49
1.1.4.1.1	Variable dependiente.....	49
1.1.4.1.2	Variable independiente	49
1.2	OBJETIVOS	49
1.2.1	Objetivo General:	49
1.2.2	Objetivos Específicos:.....	49
	CAPÍTULO II	51
	METODOLOGÍA	51
2.1	Nivel de Investigación	51
2.1.1	Investigación exploratoria.....	51

2.1.2	Investigación explicativa.....	51
2.1.3	Investigación descriptiva.....	51
2.1.4	Investigación de campo.....	51
2.1.5	Investigación experimental	52
2.1.6	Población.....	52
2.1.7	Muestra	53
2.2	Materiales y equipos	54
2.3	Métodos.....	57
2.3.1	Plan de recolección de Datos	57
2.3.1.1	Ensayos de campo.....	59
2.3.1.2	Ensayos de Laboratorio.....	62
2.3.2	Plan de procesamiento y Análisis de Información	65
CAPÍTULO III.....		70
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		70
3.1	Análisis y discusión de los resultados.....	70
3.1.1	Clasificación de los suelos	70
3.1.2	Determinación de propiedades físicas de los suelos	72
3.1.3	Resistividad eléctrica medida en campo	74
3.1.4	Correlaciones	80
3.2	Verificación de hipótesis.....	115
CAPÍTULO IV		119
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		119
4.1	Conclusiones	119
4.2	Recomendaciones	125
BIBLIOGRAFÍA.....		126
ANEXOS.....		129
Anexo N° 1. Zonas de trabajo en las parroquias urbanas del Cantón Ambato		129
Anexo N° 2. Puntos de recolección de muestras en la ZONA 1.....		130
Anexo N° 3. Tabla de distribución “t” de Student.....		131
Anexo N° 4. Tablas de ensayos de las propiedades Índices y Mecánicas		132

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de las partículas de suelo.....	5
Tabla 2. Tamaño de abertura en los tamices	11
Tabla 3. Gravedad específica relativa para algunos suelos	11
Tabla 4. Rangos de Índice de plasticidad según Atterberg	13
Tabla 5. Prefijos y sufijos de la SUCS.....	16
Tabla 6. Sistema de clasificación de suelos de la SUCS.....	17
Tabla 7. Sistema de clasificación de suelos de la AASHTO	18
Tabla 8. Comparación de los grupos de clasificación de suelos SUCS y AASHTO.....	19
Tabla 9. Estándar AASHTO T-99.....	21
Tabla 10. Modificado AASHTO T-180.....	22
Tabla 11. Valores de carga unitaria patrón	23
Tabla 12. Clasificación cualitativa y uso para valores de CBR	24
Tabla 13. Distintas configuraciones de electrodos.....	37
Tabla 14. Valores representativos de resistividad.....	42
Tabla 15. Descripción del suelo Mc2.....	53
Tabla 16. Peso total del suelo areno limoso.....	53
Tabla 17. Equipos y materiales utilizados	54
Tabla 18. Plan de recolección de datos	57
Tabla 19. Parámetros para resolver correlaciones múltiples por mínimos cuadrados (Lineal)	66
Tabla 20. Sistema de ecuaciones en Excel – Modelo lineal	66
Tabla 21. Parámetros para resolver correlaciones múltiples por mínimos cuadrados(logarítmico)	67
Tabla 22. Sistema de ecuaciones en Excel – Modelo logarítmico.....	67
Tabla 23. Parámetros para resolver correlaciones múltiples por mínimos cuadrados (potencial)	68
Tabla 24. Sistema de ecuaciones en Excel – Modelo potencial.....	68
Tabla 25. Parámetros para resolver correlaciones múltiples por mínimos cuadrados (exponencial).....	69
Tabla 26. Sistema de ecuaciones en Excel – Modelo exponencial	69
Tabla 27. Valores de SPT muestras E1-E10	74
Tabla 28. Propiedades de las muestras de suelo (E1-E10).....	79

Tabla 29. Ecuaciones de correlación entre 2 y 3 variables.	81
Tabla 30. Correlación límite plástico vs. Límite líquido	83
Tabla 31. Densidad seca máxima vs. Humedad óptima.....	84
Tabla 32. Densidad seca máxima vs. Límite Plástico vs. Límite Líquido	85
Tabla 33. Gravedad Específica vs. %Pasa Tamiz N°200.....	86
Tabla 34. Gravedad Específica vs. %Pasa Tamiz N°200 vs. Densidad seca in-situ	87
Tabla 35. Densidad Seca Máxima vs. Gravedad Específica vs. Humedad Óptima	88
Tabla 36. Humedad Natural vs. Resistividad Eléctrica.....	89
Tabla 37. Límite Líquido vs. Límite Plástico vs. Resistividad Eléctrica	90
Tabla 38. Gravedad Específica vs %Pasa TamizN°200 vs. Resistividad Eléctrica	91
Tabla 39. Densidad Seca in-situ vs. Humedad Natural vs. Resistividad Eléctrica	92
Tabla 40. Grado de Saturación de Aire vs. Resistividad Eléctrica.	93
Tabla 41. Grado de Saturación de Agua vs. Resistividad Eléctrica.....	94
Tabla 42. Humedad Óptima vs. Humedad Natural vs. Resistividad Eléctrica.....	95
Tabla 43. Humedad Óptima vs. %Pasa Tamiz N°200 vs. Resistividad Eléctrica.....	96
Tabla 44. Humedad Óptima vs. Gravedad Específica vs. Resistividad Eléctrica.....	97
Tabla 45. Densidad Seca Máxima vs Humedad óptima vs Resistividad Eléctrica	98
Tabla 46. Grado de Saturación de Aire vs Humedad Natural vs Resistividad Eléctrica	99
Tabla 47. Diámetro Efectivo vs. Resistividad Eléctrica	100
Tabla 48. SPT vs. Resistividad Eléctrica	101
Tabla 49. Velocidad Media de Onda Cortante vs. Resistividad Eléctrica	102
Tabla 50. SPT vs. Humedad Óptima vs. Resistividad Eléctrica	103
Tabla 51. Grado de Compactación vs. Límite Plástico vs. Resistividad Eléctrica.....	104
Tabla 52. Humedad Óptima vs. SPT vs. Resistividad Eléctrica	105
Tabla 53. CBR Mayor vs. Resistividad Eléctrica	106
Tabla 54. Grado de Compactación vs. Resistividad Eléctrica	107
Tabla 55. CBR Mayor vs. Humedad Natural vs. Densidad Seca in-situ.....	108
Tabla 56. CBR Mayor vs. Humedad Óptima vs. Densidad Seca in-situ.....	109
Tabla 57. CBR Mayor vs. Humedad Óptima vs. Índice Plástico.....	110
Tabla 58. CBR Mayor vs. %Pasa Tamiz N°200 vs. Límite Líquido	111
Tabla 59. CBR Mayor vs. Límite Líquido vs. Índice Plástico	112
Tabla 60. CBR Mayor vs. Índice de Liquidez vs. Índice Plástico	113
Tabla 61. Cuadro resumen de resultados	115

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Relación en tamaño de partículas de arena, limo y arcilla.....	5
Figura 2. Granos Voluminosos	6
Figura 3. Elemento unitario de la masa de suelo	8
Figura 4. Esquema de la copa de Casagrande	12
Figura 5. Curva de escurrimiento.....	12
Figura 6. Carta de plasticidad. (a)SUCS, (b) AASHTO	14
Figura 7. Curva de Compactación.....	20
Figura 8. (a)Molde para proctor estándar; (b)Molde para proctor modificado.....	22
Figura 9. Método geofísico de perforaciones cruzadas.....	26
Figura 10. (A) Definición básica de resistividad a través de un bloque homogéneo de longitud lateral L con una corriente aplicada I y caída de potencial entre caras opuestas de V. (B) El equivalente del circuito eléctrico, donde R es una resistencia.	27
Figura 11. Estudio de resistividad eléctrica: (a) método de Wenner; (b) Método empírico para determinar la resistividad y el espesor de cada capa.....	29
Figura 12. Secciones transversales planas de líneas de campo eléctrico alrededor de cargas puntuales: (a) positivo simple, (b) negativo simple, (c) dos iguales y opuestos, y (d) dos cargas positivas iguales.....	31
Figura 13. Curva típica de conductividad para suelos arcillosos	32
Figura 14. Líneas actuales y equipotenciales producidas por una fuente y entrada de corriente.	33
Figura 15. Configuración general de cuatro electrodos. Electrodo de corriente (A, B) y un par de electrodos potenciales (C, D).	34
Figura 16. Geometrías especiales de corriente y potenciales para (a) configuraciones de Wenner, (b) Schlumberger y (c) Doble dipolo.	35
Figura 17. Sondeo eléctrico vertical Wenner.....	38
Figura 18. Sondeo eléctrico vertical Schlumberger	39
Figura 19. Sondeo eléctrico vertical doble - dipolo	39
Figura 20. Configuración de electrodos (Vista en planta)	40
Figura 21. Mapa geológico de la ciudad de Ambato	52
Figura 22. Limpieza de capa vegetal	59

Figura 23. Ubicación de los electrodos en el suelo.....	59
Figura 24. Penetración del electrodo en el suelo.....	60
Figura 25. Empleo del telurómetro	60
Figura 26. Excavación del pozo a cielo abierto	61
Figura 27. Toma de muestra de suelo	61
Figura 28. Ensayo del cono de arena de Ottawa. a) Fijar la placa base metálica; b) realizar el agujero a 10cm de profundidad. c) Colocar el cono y verter la arena.....	62
Figura 29. Ensayo de la granulometría.	62
Figura 30. Ensayo de límite líquido.....	63
Figura 31. Ensayo de límite plástico.....	63
Figura 32. Ensayo de Gravedad específica	64
Figura 33. Ensayo de compactación	64
Figura 34. Ensayo de CBR.....	65
Figura 35. Rango granulométrico de las muestras de suelos E1-E10.....	71
Figura 36. Localización de los puntos en la carta de plasticidad.....	72
Figura 37. Contenido de humedad vs. Resistividad eléctrica	75
Figura 38. Curva de Gauss para correlaciones simples.....	117
Figura 39. Curva de Gauss para correlaciones múltiples.....	118

RESUMEN EJECUTIVO

TEMA: “ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO”

AUTOR: Jimmy Damián Macas Bustamante

FECHA: Noviembre/2019

El presente trabajo de investigación se realizó considerando diez puntos de la parroquia de Huachi Chico del cantón Ambato, el cual tiene como objetivo determinar correlaciones entre propiedades índice y mecánicas con la resistividad eléctrica de los suelos granulares entre las cuales están el contenido de humedad, la granulometría, límites de Atterberg, gravedad específica, compactación, ensayo de penetración estándar y CBR; el planteamiento de la hipótesis se puede comprobar mediante la realización de los ensayos en campo y en laboratorio.

Una vez realizados los ensayos respectivos se comprobó que la hipótesis planteada es correcta y se puede establecer la correlación entre cada ensayo, posteriormente se realizó la tabulación, análisis e interpretación de los datos obtenidos en el trabajo de campo y laboratorio. Los valores obtenidos mediante los ensayos de resistividad con propiedades índices y mecánicas se analizaron estadísticamente por el método de mínimos cuadrados para establecer si existe correlación simple o múltiple entre las variables, en algunos casos no se trabajaron con todos los puntos debido a que generan valores de residuos cuadrados muy elevados respecto a la línea de tendencia generando una menor correlación.

Una vez analizados los resultados mediante el método de mínimos cuadrados se estableció que los coeficientes de determinación varían desde 58 por ciento hasta 94 por ciento, indicando que existen buenas y excelentes correlaciones respectivamente entre las propiedades. De esa manera se da la probabilidad de que las propiedades índices y mecánicas de un suelo puede ser determinado mediante la aplicación del método de resistividad eléctrica o viceversa.

ABSTRACT

The present investigation was made considering ten points of the Huachi Chico Parish of Ambato city, which aims to determine correlations between index and mechanical properties to the electrical resistivity of granular soils among which the moisture content, the granulometry, Atterberg limits, specific gravity, compaction, standard penetration test and CBR; the approach of the hypothesis can be verified by performing the field tests and laboratory.

Once the respective tests were made, it was found that the hypothesis is correct and it is possible to establish the correlation between each test performed, then the tabulation, analysis and interpretation of the data was obtained in the field and laboratory work. The values obtained by the tests of resistivity ratios and mechanical properties were analyzed statistically by the least squares method to establish whether there simple correlation or multiple between variables, in some cases not all the points were worked because they generate values waste squares very high relative to the trendline generating a lower correlation.

After analyzing the results by the least squares method was established that the determination coefficients vary from 58 percent to 94 percent, indicating that there are good and excellent correlations respectively between the properties. Thus the probability that the index and mechanical properties of soil can be determined by applying the method of electrical resistivity or vice versa occurs.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes Investigativos

1.1.1 Antecedentes

Según Khairul Anwar Hatta y Syed Baharom Azahar Syed Osman en su artículo publicado “Correlation of Electrical Resistivity and SPT-N value from Standard Penetration Test (SPT) of Sandy Soil”, indican que “Se establecieron correlaciones preliminares y que los resultados obtenidos muestran la posibilidad de utilizar un estudio de resistividad eléctrica como una alternativa a la prueba de penetración estándar SPT. Se necesitan más datos de pruebas de campo para ser recolectados en diferentes tipos de suelos a fin de establecer una correlación más precisa entre los valores N de SPT y la resistividad eléctrica del suelo.” [1]

Según Zeyad S. Abu-hassanein, Craig H. Benson, and Lisa R. Blotz establecen que “La resistividad eléctrica de la arcilla compactada es sensible al contenido de agua de moldeo, el esfuerzo de compactación y la saturación inicial. Se produce una resistividad eléctrica más baja para condiciones compactas de iones que resultan en una saturación inicial más alta; es decir, si otros factores son iguales, aumentar el contenido de agua de moldeo o el esfuerzo de compactación da como resultado una mayor saturación inicial y una menor resistividad eléctrica.” [2]

Según A. Samouëlian, I. Cousin, A. Tabbagh, A. Bruand, G. Richard consideran que “La prospección de resistividad eléctrica es un método muy atractivo para la caracterización del suelo. Contrariamente a las mediciones y observaciones clásicas de la ciencia del suelo que perturban el suelo al azar o mediante perforaciones y muestreos regulares, la resistividad eléctrica no es destructiva y puede proporcionar mediciones continuas en un amplio rango de escalas.”, “Permite mejorar nuestra comprensión de la estructura del suelo y su funcionamiento en diversos campos, como la agronomía, la pedología, la geología, la arqueología y la ingeniería civil.” [3]

Según Syed Baharom, Syed Osman, Fahad Irfan Siddiqui, Mohammad Yaakob Behan en su artículo publicado “Relationship of Plasticity Index of Soil with Laboratory and

Field Electrical Resistivity Values”, indican que “El índice de plasticidad tiene una correlación significativa con los valores de resistividad eléctrica de campo y laboratorio para todas las muestras de suelo. Se encontró que las muestras de suelo de arena limosa se caracterizan por un índice de plasticidad más alto y valores de resistividad más bajos, mientras que las muestras de suelo arenoso tienen un índice de plasticidad más bajo y valores de resistividad más altos. La menor resistividad en el suelo limoso probablemente se atribuyó principalmente a los mayores contenidos de mineral de arcilla, mientras que la mayor resistividad en el suelo arenoso fue el resultado del mineral predominantemente de cuarzo.” [4]

El fin de esta investigación es realizar los ensayos necesarios para determinar correlaciones entre las propiedades índice y mecánicas de los suelos granulares de la ciudad de Ambato, de modo que el método de resistividad eléctrica pueda ser utilizado por la comunidad ingenieril de la zona de forma confiable y además sentar una base para futuras investigaciones.

1.1.2 Justificación

La correcta determinación de las propiedades ingenieriles de los suelos, tanto índice como mecánicas son de especial prioridad en un proyecto de construcción ya que de estas propiedades dependerán en gran medida las decisiones que se tomen en una posible etapa de diseño, reforzamiento o rehabilitación. [5]

Comúnmente la obtención de estos parámetros se hace mediante ensayos de campo y laboratorio, con muestras obtenidas a través de métodos de extracción en sitio como calicatas y ensayos de penetración estándar SPT. Todo el proceso de exploración, muestreo, transporte, ensayo, y análisis de resultados que demanda un sondeo de suelos requiere de un tiempo considerablemente grande; por lo que resulta ser un factor de retraso para los proyectos, así como de encarecimiento [6], [7] en especial cuando el terreno de estudio se encuentra en zonas de difícil acceso o es de topografía agreste.

A pesar de que la Norma Ecuatoriana de la Construcción exige un número y profundidad mínima de sondeos por unidad de construcción [5], es por las razones antes mencionadas que en obra suelen suponerse las propiedades del suelo en base a

la mal llamada experiencia del constructor o se estiman de forma empírica; lo que en una zona de riesgo sísmico alto como la ciudad de Ambato resulta preocupante. [8]

Varios métodos geofísicos como la refracción sísmica, georradars, electromagnetismo, etc. Se han ido popularizando con el tiempo dentro del campo de la ingeniería por ser no invasivos, no destructivos, de rápida ejecución y por ser relativamente económicos. [6] [7] [9] De estos métodos la resistividad eléctrica ha sido investigada por varios autores como una alternativa atractiva a los métodos destructivos de común ejecución; obteniendo correlaciones altas en cuanto a ángulo de fricción, [6] contenido de humedad [6] [9] [10] valor N de SPT [1], índice plástico, [6] [7] densidad en suelo suelto y compactado, etc. [6] [9] Por lo que concluyen los autores que se puede usar este método como una herramienta eficaz para determinar dichas propiedades del suelo de forma rápida y precisa.

No obstante para poder hacer de este método algo útil en la ciudad de Ambato, es necesario ejecutar los ensayos precisados para determinar tanto la validez de las correlaciones para los suelos presentes en la región, como las ecuaciones que representen dichas correlaciones con el fin de obtener los resultados más cercanos a la realidad. [11]

En función de la topografía, de la información disponible, se considera necesario efectuar la exploración con diez SONDEOS. En las ubicaciones planificadas en la parroquia HUACHI CHICO, se realizarán la medición de la resistividad eléctrica con el telurómetro, las sondas se introducirán hasta 1 metro de profundidad según los ensayos de penetración estándar realizados en tesis anteriores. [12]

De acuerdo con la planificación, se ubicarán los sondeos con el propósito de determinar las propiedades índices y mecánicas del suelo. La ubicación de los ensayos efectuadas E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8, E9 y E10 para el estudio de suelos del proyecto se detallarán en el *Anexo 1*.

El telurómetro es un equipo profesional para efectuar mediciones en Sistemas de Puesta a Tierra en parámetros de resistencia y resistividad. La resistividad del suelo es la propiedad que tiene éste para conducir electricidad, es conocida además como la resistencia específica del terreno. El telurómetro es un equipo que mide la resistencia y resistividad por el método de *Wenner*. Consiste en medir la resistividad del suelo,

para esto se insertarán 4 electrodos en el suelo. Los cuatro electrodos se colocan en línea recta y a una misma profundidad de penetración, las mediciones de resistividad dependerán de la distancia entre electrodos y de la resistividad del terreno. [13]

1.1.3 Fundamentación Teórica

1.1.3.1 Introducción

Los suelos son conjuntos de partículas agrupadas de diversas formas. Las características individuales de las partículas y su acomodamiento en el conjunto dependen de los procesos de meteorización de las rocas originales y de los procesos posteriores de conformación de los depósitos. La acción de estos procesos ha generado una gran variedad de suelos que pueden ser establecidos y caracterizados según una serie de propiedades que indican sus diferencias y permiten el agrupamiento de los mismos según características propias. A estas propiedades se las denominan "propiedades índice" y se determinan mediante la ejecución de ensayos sobre muestras representativas. El comportamiento de un suelo depende de las características de los granos que lo constituyen y del acomodo de éstos en el conjunto, pudiendo entonces separar las "propiedades índice" en dos grupos: propiedades de los granos y propiedades del conjunto de partículas. [14]

1.1.3.2 Características

1.1.3.2.1 Propiedades de los Granos

Tamaño de las partículas

La composición granulométrica de un suelo es el porcentaje en peso de cada parte de material mineral, que se obtiene por separación de las partículas minerales en dos clases más por tamaño mutuamente excluyentes. Las propiedades tanto de las partículas gruesas como finas del suelo difieren considerablemente, no existe una división natural marcada de ninguna clase de tamaño de partícula. Sin embargo, para propósitos prácticos se han establecido algunos límites. Generalmente los suelos se separan por lo menos tres clases según su tamaño como son: arena, limo y arcilla. El

procedimiento usado para medir la composición granulométrica es el análisis granulométrico. [15]

Tabla 1. Clasificación de las partículas de suelo

Organización	Tamaño del grano (mm)			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
MIT	> 2	2 – 0.06	0.06 – 0.002	< 0.002
USDA	> 2	2 – 0.05	0.05 – 0.002	< 0.002
AASHTO	76.2 - 2	2–0.075	0.075–0.002	< 0.002
USCS	76.2 – 4.75	4.75–0.075	Finos < 0.075	

Fuente: Portilla y Pillajo (2001)

Todas las clasificaciones por tamaño tienen en común el límite de dos micras (0.002 mm) para el fragmento de arcilla y no están de acuerdo en la medida de la subdivisión del fragmento arena.

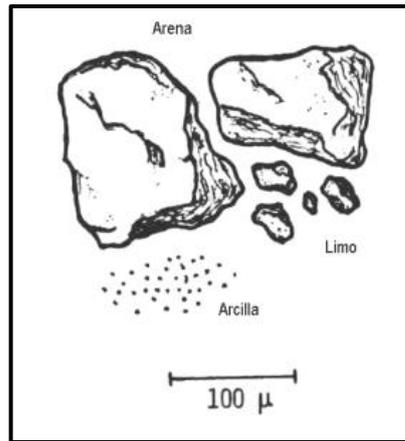


Figura 1. Relación en tamaño de partículas de arena, limo y arcilla

Fuente: *Propiedades índice de los suelos.*

Autor(es): L. Ruks y F.García (2004)

Forma de las partículas

La forma de las partículas de un suelo tiene una influencia importante en sus propiedades físicas. Las partículas se examinan a simple vista o con una lupa, incluso con un microscopio para las más finas. Se describen haciendo referencia a su configuración geométrica, la forma en sí y a su redondeamiento. Las formas más comunes son las siguientes:

- a) Granos voluminosos: se corresponden a las fracciones gruesas de un suelo, pudiendo ser descriptos como se muestra en la siguiente figura:

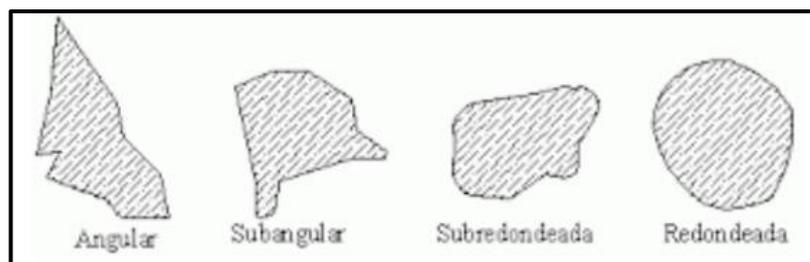


Figura 2. Granos Voluminosos
 Fuente: *Propiedades índice de los suelos.*
 Autor(es): L. Ruks y F.García(2004)

- b) Granos escamosos o lajosos: son partículas planas donde el ancho y el largo prevalecen sobre el espesor, características de suelos de granos finos, generalmente, constituidos por micas y minerales arcillosos.
- c) Granos alargados y finos: son partículas donde una dimensión prevalece sobre las restantes. Estas partículas están constituidas por minerales arcillosos, ciertas cenizas volcánicas y por materiales orgánicos como las turbas. [15]

1.1.3.2.2 Propiedades del conjunto de partículas o agregado

Estructura de los suelos

En suelos con partículas grandes las fuerzas que intervienen para formar la estructura son bien conocidas y sus efectos son simples de calificar a simple vista. Pero en suelos con partículas más pequeñas (Limos y arcillas) las fuerzas que intervienen en el proceso de estructuración son de carácter más complejo, y las estructuras son parcialmente verificables por métodos indirectos. Tradicionalmente se han considerado las estructuras simples, panaloide y floculenta como las básicas en los suelos reales. [16]

- a) Estructura simple. - Es aquella producida cuando la fuerza gravitacional sobresale en el orden de las partículas, es típica de suelos de grano grueso, las partículas se disponen apoyándose directamente una sobre otra y cada partícula posee varios puntos de apoyo. El comportamiento mecánico e hidráulico queda definido por dos características: La compacidad relativa y la orientación de los mantos.
- b) Estructura floculenta. - También llamada de orden superior, es un arreglo muy complejo de las partículas muy finas (menores de 0.0002mm), dependen de la formación de los panales que al depositarse se juntan y forman una especie de red. La fuerza de gravedad no actúa. Produciéndose el movimiento Browniano, es decir

el zigzagueo que impide que los flóculos formados se sedimenten. El volumen sólido puede no representar más de un 5-10%.

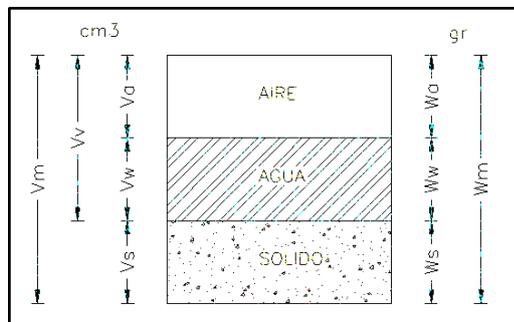
- c) Estructura panaloide. – Es típica en granos de pequeño tamaño (0.002mm o menores) en suelos limosos que son depositados en agua y, en ocasiones en aire. La gravitación hace que se sedimenten, pero en este transcurso otra partícula puede añadirse y el conjunto de ellas podrá llegar a formar una celda, con cantidad importante de vacíos, a modo de panal. Los vacíos presentes hacen que estos suelos tengan alto porcentaje de porosidad.
- d) Estructuras compuestas. - Cuando se produce la sedimentación simultánea de partículas finas y otras más gruesas, se forman estructuras con un esqueleto constituido por los granos gruesos y con los flóculos de partículas finas rellenando parcialmente las aberturas. Los flóculos de unión entre partículas gruesas están altamente comprimidos en los contactos con esos granos, confiriendo de esta forma la resistencia al conjunto. El material que llena los vacíos del esqueleto se mantiene blando y suelto pues soporta menores presiones. Si el conjunto se remueve, se destruye el esqueleto resistente mezclándose con las partes no consolidadas haciéndose entonces muy compresibles.
- e) Estructura dispersa. - Cualquier perturbación que pueda existir, como deformación por esfuerzo cortante, tiende en general a disminuir los ángulos entre las diferentes láminas de material. Las presiones osmóticas tienden a hacer que las partículas se separen.
- f) Estructura en “castillo de naipes”. - La partícula de suelo posee carga negativa pero en sus aristas existe una concentración de carga positiva que hace que esa zona localizada se atraiga con la superficie de cualquier partícula vecina, tomando esto en consideración se han propuesto para las arcillas una estructura denominada en “castillo de naipes” o floculada. Le corresponde al suelo un importante volumen de vacíos. [16]

1.1.3.3 Propiedades Índice

Para poder determinar las distintas propiedades índice volumétricas y gravimétricas de los suelos se parte del llamado cubo unitario el mismo que está separado en tres fases:

sólido, agua y aire, el cual representa en esquema de una muestra de suelo. Éste relaciona proporciones en masa y volumen como se muestra en la figura siguiente.

Figura 3. Elemento unitario de la masa de suelo



Autor: Jimmy Macas

Donde:

V_a : Volumen del aire

W_a : Masa del aire

V_w : Volumen del agua

W_w : Masa del agua

V_s : Volumen del sólido

W_s : Masa del sólido

V_v : Volumen de vacío

W_m : Masa del suelo

V_m : Volumen de la masa de suelo

1.1.3.3.1 Relación de vacíos (e)

Se define como la relación entre el volumen de espacios vacíos y el volumen de las partículas sólidas en una masa de suelo. Su rango puede ir de $0.35 < e < \infty$.

La relación de vacíos se determina mediante la siguiente fórmula.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad \text{Ec.(1)}$$

En suelos compactos, las partículas sólidas tienen un alto grado de acomodo y la capacidad de deformación será pequeña. En suelos poco compactos el volumen de vacíos y la capacidad de deformación serán mayores.

1.1.3.3.2 Porosidad (η)

Se define como la relación entre el volumen de espacios vacíos de un suelo y el volumen total de la muestra, es una relación expresada en porcentaje. Se entiende

como la probabilidad de encontrar vacíos en el volumen total de una muestra de suelo. Para un sólido perfecto la porosidad tiene un valor de 0, el menor porcentaje de porosidad significa que el suelo está altamente densificado, mientras que un alto porcentaje significa que el suelo tiene gran cantidad de vacíos por lo tanto es altamente comprensible. El rango de porosidad es $0 < \eta < 100\%$. La porosidad se determina con la fórmula siguiente.

$$\eta = \frac{V_v}{V_m} * 100\% \quad \text{Ec.(2)}$$

1.1.3.3.3 Grado de Saturación de agua ($G_w\%$)

Se define como la relación entre el volumen de agua y el volumen de los vacíos, está expresado en porcentaje. El rango del grado de saturación de agua va desde 0 hasta 100%. Significando que valores cercanos al 0% representan un suelo más seco mientras que valores cercanos al 100% serán suelos más saturados. Se lo determina mediante la siguiente fórmula:

$$G_w = \frac{V_w}{V_v} * 100\% \quad \text{Ec.(3)}$$

1.1.3.3.4 Grado de Saturación de aire ($G_a\%$)

Se define como la relación entre el volumen de aire y el volumen de los vacíos, está expresado en porcentaje. Y su utilización está limitada a los factores de consolidación de los suelos. Se lo determina mediante la siguiente fórmula:

$$G_a = \frac{V_a}{V_v} * 100\% \quad \text{Ec.(4)}$$

1.1.3.3.5 Contenido de humedad

La humedad de un suelo se representa en forma porcentual, es la cantidad de agua que tiene una masa de suelo comparada con el peso seco de la misma. Si la determinación de éste se hace en un suelo tal como se obtuvo en el terreno, se denomina “Humedad Natural”.

Las gravas y suelos arenosos pueden tener valores de humedad natural de 15 a 20%. Los suelos limosos y arcillosos sobre el 50 a 80% y no es raro tener humedades naturales del 500% en turbas y suelos orgánicos. Algunos suelos orgánicos pueden descomponerse durante el secado al horno a la temperatura de 110°C. De acuerdo a ASTM, un secado a 60°C es más apropiado para dichos suelos. [11]

Se obtiene la humedad de la muestra a partir de la siguiente expresión:

$$\omega\% = (W_h - W_s)/W_s \quad \text{Ec.(5)}$$

Donde:

Wh= Masa de la muestra húmeda.

Ws= Masa de la muestra seca.

1.1.3.3.6 Granulometría

Se denomina análisis granulométrico al proceso de separar un agregado en fracciones constituidas por partículas de tamaños comprendidos entre determinados límites.

Para suelos grueso-granulares el análisis se hace por medio de un juego de mallas, la más fina de las cuales tiene los agujeros de 0.074mm (N°200). Como este tamaño es muy cercano al límite entre limo y arena, comúnmente se usa tal malla para separar el material grueso del fino-granular, cuando solo se desea un análisis aproximado. Determinado el peso de cada fracción se expresa su participación en la muestra como un porcentaje referido al peso total de esta última.

La serie de tamices indicada por la norma ASTM D 422 se conforma por los siguientes indicados en la tabla 2, donde se pueden suprimir eventualmente de algunos tamices de acuerdo con las características del suelo a analizar. [17]

Tabla 2. Tamaño de abertura en los tamices

Tamiz N°	Abertura (mm)	Tamiz N°	Abertura (mm)
3''	75.000	N°16	1.180
2''	50.000	N°20	0.850
1 ½''	37.500	N°30	0.600
1''	25.000	N°40	0.425
¾''	19.000	N°50	0.300
3/8''	9.500	N°60	0.250
N°4	4.750	N°100	0.150
N°8	2.360	N°140	0.106
N°10	2.000	N°200	0.075

Fuente: Manual de laboratorio de suelos. Medellín-Colombia.
 Autor: Antonio Arango (2006)

1.1.3.3.7 Gravedad específica

Se define como la relación entre el peso de los sólidos del suelo y el peso del agua, cuando el volumen de los sólidos del suelo es igual al volumen de agua. La gravedad específica de las partículas minerales de un suelo varía entre límites estrechos (2.60 - 2.90) y en suelos con abundante hierro pueden llegar a 3. Con la presencia de materia orgánica puede dar valores más bajos. Este método se utiliza para determinar el peso específico de las partículas sólidas que pasan el tamiz N.º 4. Se determina el volumen de las partículas por medio de la diferencia entre el peso de un picnómetro lleno de agua hasta la marca de aforo y el peso de éste conteniendo la muestra sumergida con el nivel de agua también hasta la marca de aforo.

Tabla 3. Gravedad específica relativa para algunos suelos

Tipo de suelo	Gravedad específica (Gs)
Arena	2.65 a 2.67
Arena limosa	2.67 a 2.70
Arena inorgánica	2.70 a 2.80
Suelos con micas o hierro	2.75 a 3.00
Suelos orgánicos	Variable, puede ser inferior a 2

Fuente: F. Portilla y Pillajo (2001)

1.1.3.3.8 Límites de Atterberg

1.1.3.3.8.1 Límite líquido (LL)

Se define como el contenido de humedad expresado en porcentaje con respecto al peso seco de la muestra. Con el cual el suelo cambia de estado semilíquido al plástico. Los suelos plásticos tienen en el límite líquido una resistencia muy pequeña al esfuerzo de corte, según Atterberg es de 25 gr/cm^2 . La cohesión del suelo en el límite líquido es prácticamente nula. [18]

Para determinar el límite líquido se realiza el ensayo de “Copa de Casagrande” y como resultado de este ensayo la curva de escurrimiento representada como una gráfica en escala logarítmica ubicando en sus abscisas el número de golpes de la copa y en las ordenadas el contenido de humedad. El límite líquido se encuentra proyectando los 25 golpes en la gráfica.

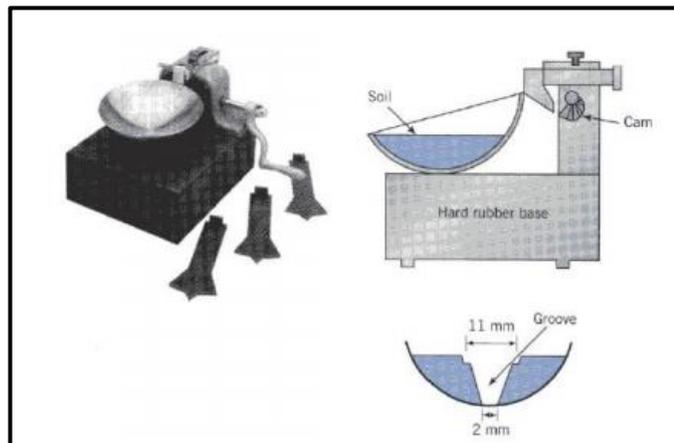


Figura 4. Esquema de la copa de Casagrande

Fuente: *Mecánica de suelos y cimentaciones*

Autor: Crespo Villalaz (2017)

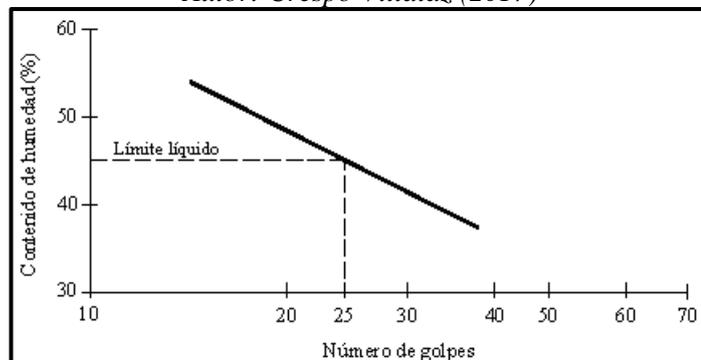


Figura 5. Curva de escurrimiento

Fuente: Jimmy Macas

1.1.3.3.8.2 Límite plástico (LP)

Se define como el contenido de humedad, expresado en porcentaje con respecto al peso seco de la muestra secada al horno, para el cual los suelos cohesivos pasan de un estado semisólido a un estado plástico es decir cuando el suelo empieza a perder cohesión por falta de humedad. Del suelo resultante del ensayo de límite líquido se mezcla bien hasta obtener una muestra moldeable y se hace una pequeña bola que debe rodillarse en seguida en la palma de la mano hasta obtener un filamento de diámetro resultante de 2 a 3 mm, éste deberá presentar fisuras ya llegado a este diámetro. Los suelos que no pueden rodillarse con ningún contenido de humedad se consideran como no plásticos (N.P). [18]

1.1.3.3.8.3 Índice plástico (IP)

Es la diferencia numérica entre el límite líquido y el límite plástico y representa la extensión en la cual un suelo es plástico. El índice plástico depende generalmente de la cantidad de arcilla del suelo. Tiene su principal aplicación en la carta de plasticidad, que es un gráfico de IP vs. LL (figura 6) y que sirve para clasificar los suelos. [17] [18] Atterberg estableció los distintos valores para el índice de plasticidad según los siguientes materiales:

Tabla 4. Rangos de Índice de plasticidad según Atterberg

Suelo	Índice plástico
Desmenuzable	$IP < 1$
Débilmente plástico	$1 < IP < 7$
Medianamente plástico	$7 < IP < 15$
Altamente plástico	$IP > 15$

*Fuente: Mecánica de suelos, fundamentos de la mecánica de suelos.
Autor(es): J. Badillo y R. Rodríguez (2005)*

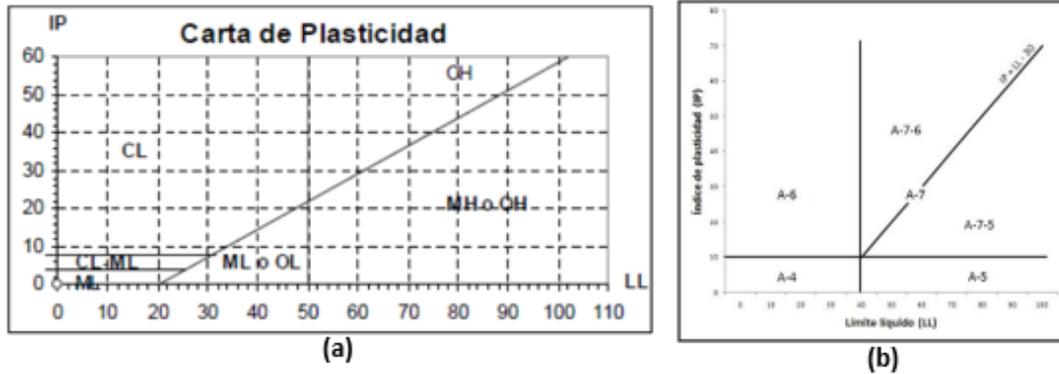


Figura 6. Carta de plasticidad. (a)SUCS, (b) AASHTO
Fuente: SUCS y AASHTO (2017)

1.1.3.3.8.4 Índice de liquidez (IL)

También se lo conoce como la relación Agua-plasticidad, es utilizado para medir a escala el contenido de humedad natural de una muestra de suelo, respecto a los límites líquido y plástico (Indirectamente sirve para tener una medida aproximada de la resistencia del material). Se lo determina mediante la siguiente ecuación:

$$IL = \frac{W_{nat} - LP}{IP} \quad \text{Ec.(6)}$$

Donde:

W_{nat} = Contenido de humedad natural

LP= Límite plástico

IP= Índice plástico

El índice de liquidez se lo expresa como porcentaje y puede utilizarse como evaluar el comportamiento de un depósito de suelo si éste se encuentra alterado.

$IL < 0$; Demuestra fractura rígida al ser sometido a corte, el suelo estará en estado sólido a semi sólido.

$0 < IL < 1$; El suelo está en estado plástico.

$IL > 1$; Demuestra un estado líquido y muy viscoso al ser sometido a corte, el suelo está en estado líquido.

Densidad de campo

Existen distintos métodos para determinar la densidad de campo de un suelo en algunos casos a falta de cohesión en algunos suelos no permite el manipuleo directo de las muestras sin que las mismas se alteren. El procedimiento consiste en excavar un hoyo en el suelo, determinar el peso del material extraído, su humedad y el volumen del hoyo.

Método del cono de arena de Ottawa

Una arena de granos de tamaño uniforme se acomodará prácticamente de igual manera si se la vierte siempre bajo condiciones normalizadas. Conociendo el peso específico de la arena vertida en esas condiciones y el peso total de arena empleada para llenar el hoyo se obtendrá el volumen de éste. El equipo de ensayo, en posición de trabajo, consiste en un recipiente cilíndrico con un doble cono vinculados por una válvula de paso libre. El equipo se completa con una placa metálica con un orificio central del mismo diámetro que el embudo. No es conveniente utilizar arena muy fina pues puede trabar el libre movimiento de la válvula de paso y provocar vibraciones que modificarían el acomodamiento de la arena al caer en el pozo. La arena debe estar seca y limpia. [14]

$$V_m = \frac{W_{sand}}{\gamma_{sand}} \quad \text{Ec.(7)}$$

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m} \quad \text{Ec.(8)}$$

Donde:

W_{sand} = Masa de la arena en el hueco

γ_{sand} = Peso específico de la arena de Ottawa

γ_m = Peso específico del suelo

W_m = Masa del suelo extraído

V_m = Volumen del hueco

1.1.3.4 Clasificación de los suelos

Se han desarrollado algunos métodos para la clasificación de los suelos, cada uno de estos tiene su campo de aplicación según la necesidad y uso que los haya fundamentado. Y así se tiene la clasificación de suelos según su tamaño de sus partículas, la clasificación de la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (AASHTO), el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), etc. Lo fundamental es el hecho de que cualquier clasificación que quiera abarcar las necesidades correspondientes debe estar basada en las propiedades mecánicas de los suelos.

1.1.3.4.1 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

Fue creado por Arthur Casagrande como una modificación más general a su sistema de clasificación propuesto en 1942 para aeropuertos. En la tabla 6 se presenta la clasificación de suelos del sistema unificado, se observa los suelos de partículas gruesas y los suelos de partículas finas se distinguen mediante el tamizado del suelo por la malla N°200. Los suelos gruesos son los que se retienen y los finos son los que pasan dicha malla, y así un suelo se considera grueso si más del 50% del material se queda retenido y el suelo se considera fino si más del 50% del material pasa la malla. Los suelos se identifican por símbolos de grupo, que constan de un prefijo y un sufijo. Los prefijos con las iniciales de los nombres ingleses de los seis principales tipos de suelos, y los sufijos son subdivisiones en dichos grupos. [18]

Tabla 5. Prefijos y sufijos de la SUCS

Prefijo		Sufijo	
Símbolo	Definición	Símbolo	Definición
G	Grava	P	Pobremente Graduado (tamaños de partículas uniforme)
S	Arena	W	Bien Graduado (tamaños de partículas diversos)
M	Limo	H	Alta plasticidad
C	Arcilla	L	Baja plasticidad
O	Orgánico		

*Fuente: Mecánica de suelos y cimentaciones
Autor: Crespo Villalaz (2017)*

Tabla 6. Sistema de clasificación de suelos de la SUCS

		Símbolo	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO				
SUELO DE PARTÍCULAS GRUESAS Más del 50% del material es retenido en el tamiz N°200	Más del 50% de la fracción gruesa es RETENIDA por la malla N°4 (Para clasificación visual puede usarse 1/2 cm. Como equivalente a la abertura de la malla N°4)	ARENAS Más del 50% de la fracción gruesa PASA por la malla N°4	ARENA LIMPIA (Poco o nada de partículas finas)	SW	Arenas bien graduadas, arenas con gravas, con poco o nada de finos	DETERMÍNESE LOS PORCENTAJES DE GRAVA Y ARENA DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA, DEPENDIENDO DEL PORCENTAJE DE FINOS (fracción que pasa por la malla N°200) LOS SUELOS GRUESOS SE CLASIFICAN COMO SIGUE: Menos del 5%: GW,GP,SW,SP, Más de 12%:GM,GC,SM,SC, 5%al 12%: Casos de frontera que requieren el uso del símbolo dobles **	Coeficiente de uniformidad Cu: mayor de 4 Coeficiente de curvatura Cc: entre 1 y 3. $Cu = D_{60}/D_{10}$ $Cc = (D_{30}^2)/(D_{10} \times D_{60})$	
				SP	Arenas mal graduadas, arenas con gravas, con poco o nada de finos.		NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA GW	
		GRAVAS CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas)	GM	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo.	Límites de Atterberg debajo de la "Línea A" o IP. Menor que 4		Arriba de la "Línea A" y con IP. Entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles.	
			GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla.	Límites de Atterberg arriba de la "Línea A" con IP. Mayor que 7.			
		GRAVAS LIMPIAS (Poco o nada de partículas finas)	GW GP	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos Gravas mal graduadas, mezclas de gravas y arena con poco o nada de finos	Cu mayor de 6 Cc entre 1 y 3			
					No satisfacen todos los requisitos de graduación para Sw			
		GRAVAS CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas)	SM	Arenas limosas, mezclas de arenas y limo	Límites de Atterberg debajo de la "línea A" o IP. Menor que 4		Arriba de la "Línea A" y con IP. Entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles.	
			SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla	Límites de Atterberg arriba de la "Línea A" con IP. Mayor que 7.			
		SUELO DE PARTÍCULAS FINAS Más del 50% del material pasa en el tamiz N°200	Las partículas de 0.074mm de diámetro (tamiz N°200) son, aproximadamente, las más pequeñas visibles a simple vista	LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido menor de 50	ML		Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos	EQUIVALENCIA DE SÍMBOLOS G=gravas; M=limo; O=suelos orgánicos; W=bien graduados; S=arenas; C=arcillas; P.I.=turbas; P= mal graduados; L=baja comprensibilidad; H=alta comprensibilidad
					CL		Arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres.	CARTA DE PLASTICIDAD Para clasificación de suelos de partículas finas en el laboratorio.
OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad							
LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido mayor de 51	MH			Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, limos elásticos.				
	CH			Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas.				
SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS	OH			Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad				
	PI			Turbas y otros suelos altamente orgánicos.				

Fuente: Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS).

1.1.3.4.2 Sistema de Clasificación de Suelos (AASHTO)

Este sistema de clasificación es ampliamente usado en lo que es la ingeniería de vías, y busca principalmente juzgar la aceptabilidad de un suelo para ser usado como material de subbase y base de un pavimento basándose en la medición numérica de la calidad del suelo determinado el índice de grupo (IG). Se basa como el sistema SUCS su clasificación en la granulometría por tamizado y en los límites plástico y líquido. La clasificación se basa en buscar la primera columna de izquierda a derecha que haga que todos los requisitos en el suelo encajen dentro de los rangos definidos de acuerdo con la granulometría por tamizado y los límites de consistencia (Ver tabla 7)

A continuación, se muestra el sistema de clasificación AASHTO. El suelo es clasificado en siete grupos. Los suelos de los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares, donde menor o igual al 35% de las partículas pasan por el tamiz N° 200. Los suelos donde mayor del 35% pasan este tamiz están clasificados en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7. Estos son principalmente limos y arcillas. [11]

Tabla 7. Sistema de clasificación de suelos de la AASHTO

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa el tamiz N°200)							Materiales Limo-arcillosos (más de 35% pasa el tamiz N°200)			
	A-1		A-3*	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
Clasificación de grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Tamizado, % que pasa											
N°. 10 (2.00mm)	≤50	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
N°. 40 (425µm)	≤30	≤50	≥51	...	...	...	...	...	...	...	...
N°. 200 (75µm)	≤15	≤25	≤10	≤35	≤35	≤35	≤35	≥36	≥36	≥36	≥36
Consistencia											
Límite líquido	...		N.P	≤40	≥41	≤40	≥41	≤40	≥41	≤40	>41
Índice de plasticidad	≤6			≤10	≤10	≥11	≥11	≤10	≤10	≥11	≥11
Índice de grupo	0		0	0		≤4		≤8	≤12	≤20	≤20
Tipos de materiales característicos	Cantos, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limo-arcillas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Clasificación	Excelente a bueno							Regular a malo			
* La colocación de A-3 antes de A-2 en el proceso de eliminación de izquierda a derecha no necesariamente indica superioridad de A-3 sobre A-2											
** El índice de plasticidad del subgrupo A-7-5 es igual o menor que LL-30. El índice de plasticidad del subgrupo A-7-6 es mayor que LL-30											

Fuente: AASHTO

A continuación, se presenta una comparativa entre los grupos de clasificación.

Tabla 8. Comparación de los grupos de clasificación de suelos SUCS y AASHTO

Fuente: F. Portilla y Pillajo (2001)

1.1.3.5 Propiedades Mecánicas

1.1.3.5.1 Compactación

La compactación del suelo no es más que una forma de densificar el suelo por medios mecánicos y además es mejorar sus propiedades mecánicas, aumentando su resistencia y su capacidad de carga, así como reducir su compresibilidad y asentamientos. La compactación se puede definir como el proceso de densificación del suelo mediante la aplicación de una carga dinámica, lo que causa una disminución del aire en los poros debido a un reacomodo de las partículas de suelo. [17]

Cuando una masa de suelo se somete a cargas estáticas o dinámicas, se produce una transferencia de esfuerzos y subsiguientes deformaciones cambiando su volumen. El objetivo de la compactación en laboratorio es determinar el contenido de agua óptimo en el cual cada partícula de suelo está rodeada de agua para alcanzar la densidad de suelo máxima. Se puede considerar este proceso de laboratorio para densificar suelos como el mismo estado que se obtiene cuando los terraplenes en el campo se compactan con equipos de rodillo. El contenido de humedad óptimo de un tipo de suelo es solamente para una presión de compactación o un esfuerzo de compactación dado. Existen dos parámetros fundamentales en la compactación de los suelos:

PESO VOLUMÉTRICO MÁXIMO Y CONTENIDO ÓPTIMO DE HUMEDAD.

En el gráfico siguiente se muestran la curva típica de un ensayo de compactación y determinación de los parámetros fundamentales $\gamma_{m\acute{a}x}$ y $\omega_{opt}\%$.

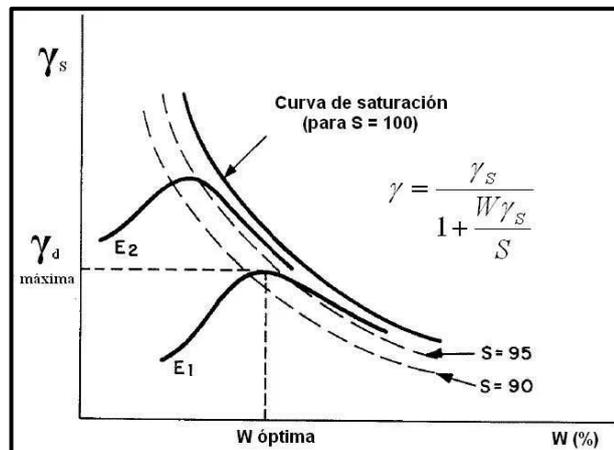


Figura 7. Curva de Compactación
 Fuente: *Manual de laboratorio de mecánica de suelos*
 Autor: Antonio Arango (2006)

Energía de Compactación

La energía de compactación usada puede ser calculada como la relación entre el número de repeticiones de un efecto mecánico sobre un volumen dado, se ha logrado correlacionando maquinarias de campo con efectos de equipos en laboratorio. Teniendo en cuenta que en el campo existe cierta pérdida de energía de compactación por lo cual la maquinaria deberá ajustarse a un mejor rendimiento para alcanzar la densidad máxima obtenida en el laboratorio.

$$Ec = \frac{N * n * w * h}{V} \quad \text{Ec.(9)}$$

Donde:

- | | |
|-------------------------------|----------------------------------|
| Ec = Energía de compactación | n = Número de capas |
| N = Número de golpes por capa | w = Masa del martillo |
| h = Altura de caída | V = Volumen del suelo compactado |

Proctor Estándar y Proctor Modificado

En 1933 el Dr. Richard Proctor encontró que aplicando a un suelo cierta energía de compactación el peso volumétrico obtenido varía con el contenido de humedad según

una curva cómo se puede observar en la figura 7. Proctor propuso la prueba de compactación, la prueba original consistía en colocar 3 capas iguales de suelo humedecido en un cilindro con un volumen determinado ($1/30 \text{ pie}^3$) y darle 25 golpes a cada capa con un pistón de 2,5 kilogramos cayendo desde una altura de 30 cm, las dimensiones del cilindro así como los elementos en la prueba se encuentran normalizados.

Al aumentar la energía de compactación para un mismo suelo aumenta su peso volumétrico seco máximo y disminuye su medio humedad óptima. El objetivo de la prueba es la determinación del peso por unidad de volumen de un suelo que ha sido compactado por un procedimiento establecido para diferentes contenidos de humedad. [18] El método de compactación en laboratorio consiste en compactar el suelo en tres o cinco capas dentro de un molde especificado por medio de golpes de un martillo que se deja caer desde una altura determinada

La AASHTO acogió la propuesta del Dr. Proctor y ha propuesto diferentes métodos para realizar los ensayos de compactación; MÉTODOS ESTÁNDAR Y MÉTODOS MODIFICADOS y cada uno a su vez tiene especificaciones agrupadas en: A, B, C, y D. Cuando se requiere menor trabajo o energía de compactación se usará el método estándar (AASHTO T-99). Cuando se requiere mayor trabajo o energía de compactación se usará el método modificado (AASHTO T-180).

Tabla 9. Estándar AASHTO T-99

Ensayo :	Estándar AASHTO T-99		Para suelos friccionantes			
Masa Pistón:	5.5	lb	Grava - Arenosos			
Altura de caída:	12	in	Areno - Limosos y Limosos no Plásticos			
Métodos	A		B	C	D	
Material que pasa	Tamiz #4		Tamiz #4	Tamiz 3/4"	Tamiz 3/4"	
Diámetro de molde (plg)	4		6	4	6	
Número de capas	3		3	3	3	
Número de golpes	25		56	25	56	
Volumen estandar (pie^3)	1/30		1/13	1/30	1/13.33	
Energía de compactación (Lb.pie/ pie^3)	12375.00		12316.92	12375.00	12316.92	

*Fuente: Manual de Laboratorio de Suelos I.
Autor(a): Lorena Pérez*

Tabla 10. Modificado AASHTO T-180

Ensayo :	Estandar AASHTO T-180		Para suelos friccionantes	
Masa Pistón:	10	lb	Grava - Arenosos	
Altura de caída:	18	in	Areno - Limosos y Limosos no Plásticos	
Métodos	A	B	C	D
Material que pasa	Tamiz #4	Tamiz #4	Tamiz 3/4"	Tamiz 3/4"
Diámetro de molde (plg)	4	6	4	6
Número de capas	5	5	5	5
Número de golpes	25	56	25	56
Volumen estandar (pie3)	1/30	1/13	1/30	1/13.33
Energía de compactación (Lb.pie/pie3)	56249.98	55985.98	56249.98	55985.98

*Fuente: Manual de Laboratorio de Suelos I.
Autor(a): Lorena Pérez*



Figura 8. (a) Molde para proctor estándar; (b) Molde para proctor modificado
Autor: Jimmy Macas

1.1.3.5.2 California Bearing Ratio (C.B.R)

Los métodos de diseño de pavimentos relacionan el valor de la capacidad de soporte del suelo o CBR con el módulo resiliente del material. El “California Bearing Ratio” es un ensayo simple utilizado para obtener un índice de resistencia de suelo como subrasante, base, subbase o afirmado. Para subrasantes finas (limosas, arcillosas o arenosas) el valor de CBR debe estar asociado a su densidad de campo, y para materiales de base, subbase y afirmado el CBR puede estar asociado a la máxima densidad seca del proctor modificado. Se proponen tres métodos para determinar el CBR.

CBR en muestras inalteradas. – Recomendado para subrasantes de suelos finos. Se obtiene una muestra inalterada de campo y se la protege para que no pierda sus condiciones de humedad y en el laboratorio se realiza el ensayo de penetración en condición natural y saturada.

CBR in situ. – Se mide directamente la deformación del suelo ante una carga aplicada.

CBR en muestras remoldeadas. – Recomendado para subrasantes granulares, material de base, subbase y afirmado. Las muestras se deben ensayar en su condición natural y saturada en donde esta última es la más desfavorable.

El CBR es la relación porcentual entre la resistencia la penetración requerida para que un pistón de 3plg² de área penetre 0.1 plg dentro de un suelo entre 1000lb/plg² que es una de las resistencias a la penetración de una muestra patrón. En ocasiones el CBR calculado para una penetración de 0.2 plg con una resistencia a la penetración de 1500lb/plg² puede ser mayor al obtenido para una penetración de 0.1plg, cuando esto ocurre se debe realizar un nuevo ensayo, si los resultados se repiten se reporta este valor como el CBR representativo de la muestra. [19]

$$CBR (\%) = \frac{Carga\ unitaria\ del\ ensayo}{Carga\ unitaria\ patrón} * 100 \quad Ec.(10)$$

Los valores de carga unitaria patrón son los siguientes

Tabla 11. Valores de carga unitaria patrón

PENETRACIÓN		CARGA UNITARIA PATRÓN		
mm	Pulgada	PSI	Mpa	Kg/cm ²
2.54	0.1	1000	6.90	70
5.08	0.2	1500	10.30	105
7.62	0.3	1900	13.10	133
10.16	0.4	2300	15.80	162
12.7	0.5	2600	17.90	183

*Fuente: Diseño moderno de pavimentos asfálticos
Autor(es): S. Minaya y A. Ordóñez (2006)*

Los ensayos de CBR se aplican usualmente sobre muestras compactadas al contenido de humedad óptimo para el suelo determinado utilizando el ensayo de compactación estándar o modificado. A menudo se compactan dos moldes de suelo: uno para penetración inmediata y otro para penetración después de dejarlo saturar por un periodo de 4 días; este último se sobrecarga con un peso similar al del pavimento, pero no menor que 4.5 kg. Es necesario durante este periodo tomar registros de expansión para tiempos escogidos.

El ensayo sobre la muestra saturada cumple dos propósitos:

- Proporcionar información sobre la expansión esperada en el suelo bajo la estructura de pavimento cuando el suelo se sature.
- Obtener indicación de la pérdida de resistencia debida a la saturación en terreno.

Tabla 12. Clasificación cualitativa y uso para valores de CBR

CBR (%)	Clasificación cualitativa del suelo	Uso
2 – 5	Muy mala	Sub – rasante
5 – 8	Mala	Sub – rasante
8 – 20	Regular – Buena	Sub – rasante
20 – 30	Excelente	Sub – rasante
30 – 60	Buena	Sub – base
60 – 80	Muy buena	Base
80 - 100	Excelente	Base

Fuente: F. Portilla y Pillajo (2001)

1.1.3.6 Exploración geofísica

1.1.3.6.1 Introducción

La ingeniería civil es un campo amplio que cubre varias disciplinas, tales como ingeniería estructural, ambiental, transporte, geotécnica, recursos hídricos, de materiales, ingeniería de topografía y construcción, etc. La mayoría de estas disciplinas tienen el potencial de incluir la aplicación de un método alternativo como el método geofísico. Las técnicas geofísicas ofrecen la oportunidad de facilitar las técnicas de investigación de terreno más convencionales. Algunos de los métodos geofísicos que se usan comúnmente son resistividad, sísmica, gravedad, imán, electroimán y radiometría. En la mayoría de las pruebas de equipos, los métodos geofísicos aplican una prueba no destructiva que puede reducir el costo y el tiempo del proyecto.

Los métodos de resistividad eléctrica se desarrollaron a principios de 1900, pero se han vuelto mucho más utilizados desde la década de 1970, debido a la disponibilidad de computadoras para procesar y analizar los datos. Los métodos de resistividad eléctrica también se usan ampliamente en el registro de sondeo eléctrico vertical. [20]

Se usa habitualmente en investigaciones de ingeniería e hidrogeológicas para investigar la geología del subsuelo superficial. [21] El método de resistividad eléctrica se tratará más a fondo para el desarrollo de esta tesis.

1.1.3.6.2 Estudio de refracción sísmica

Los estudios de refracción sísmica son útiles en la obtención de información preliminar sobre el espesor de los estratos de diversos tipos de suelo y la profundidad del cimentado en un sitio. Los estudios de refracción se llevan a cabo por el impacto de la superficie, en un punto “A”, y la observación de la primera onda de esfuerzo en algunos otros puntos (B, C, D, E ...). El impacto puede ser creado por un golpe de martillo o por una pequeña carga explosiva. La primera llegada de las ondas de esfuerzo en varios puntos puede ser grabada por equipos (geófonos). El impacto crea dos tipos de onda de esfuerzo: ondas P (ondas planas) y ondas S (ondas de corte). Las ondas *P* viajan más rápido que las ondas *S*, por lo que la primera llegada de las ondas de perturbación se relaciona con las velocidades de las ondas *P* en distintas capas. [22]

1.1.3.6.3 Estudio sísmico de perforaciones cruzadas

La velocidad de las ondas de corte creadas como resultado de un impacto a una capa de suelo se puede determinar efectivamente por el estudio sísmico de perforaciones cruzadas (Stokoe y Woods, 1972). El principio de esta técnica se ilustra en la figura 9, que muestra dos pozos perforados en el suelo a una separación *L*. “Por medio de una varilla de impulso se crea un impulso vertical en la parte inferior de un pozo de sondeo. Las ondas de corte generadas de este modo se registran por un transductor sensible verticalmente”. La velocidad de las ondas de corte se las calcula a partir de: [22]

$$V_s = \frac{L}{t} \quad \text{Ec.(11)}$$

Donde:

t: tiempo de viaje de las ondas

Y el módulo de corte (G_s) del suelo a la profundidad a la que se realiza la prueba puede determinarse mediante la ecuación:

$$G_s = \frac{V_s^2 * \gamma}{g}$$

Donde:

V_s : Velocidad de las ondas de corte

γ : Peso específico del suelo

g : Aceleración de la gravedad

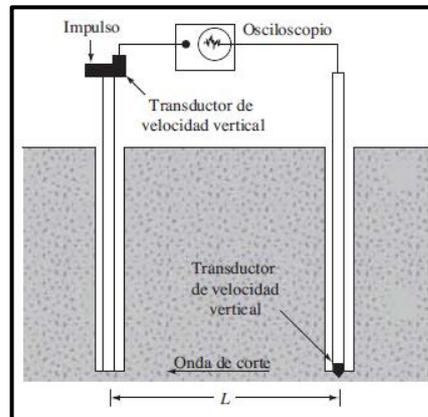


Figura 9. Método geofísico de perforaciones cruzadas

Fuente: *Fundamentos de ingeniería geotécnica*

Autor: Braja M. Das (2015)

1.1.3.7 Resistividad eléctrica de los suelos

1.1.3.7.1 Principios básicos

En el método de resistividad, las corrientes eléctricas artificiales se introducen en el suelo y las diferencias de potencial resultantes se miden en la superficie. Las desviaciones del patrón de diferencias potenciales que se esperan de un terreno homogéneo proporcionan información sobre la forma y las propiedades eléctricas de las inhomogeneidades del subsuelo. [21] El objetivo principal de la realización de los ensayos eléctricos es determinar la distribución de resistividades eléctricas que hay en el subsuelo mediante la realización de medidas desde la superficie. Para ello será necesario conocer algunos de los siguientes parámetros:

a) Resistividad eléctrica

La ley física fundamental que se emplea para la medida de la resistividad es la Ley de Ohm.

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad \text{Ec.(12)}$$

Donde:

R= Resistencia eléctrica en ohmios

ΔV = Diferencia de potencial

I = Intensidad de corriente eléctrica

Esto se puede escribir de forma alternativa en términos de fuerza de campo eléctrico (E; V/m) y densidad de corriente (J; A/m²) pero estos términos se los aclara más adelante.

$$\rho = \frac{E}{J} (\Omega m) \quad \text{Ec.(13)}$$

Si consideramos un cubo uniforme con longitud de lado (L) a través del cual hacemos pasar una corriente (I), el material que hay dentro del cubo se resistirá al paso de la electricidad a través de él, resultando en una diferencia de potencial (V) entre las dos caras opuestas del cubo. [23]

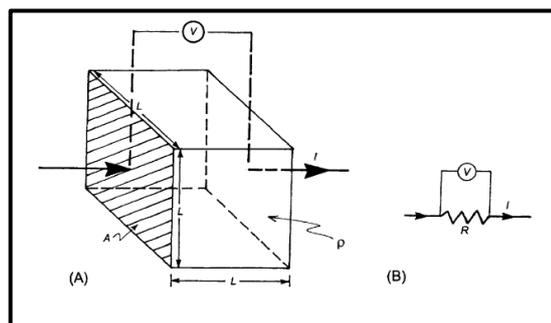


Figura 10. (A) Definición básica de resistividad a través de un bloque homogéneo de longitud lateral L con una corriente aplicada I y caída de potencial entre caras opuestas de V. (B) El equivalente del circuito eléctrico, donde R es una resistencia.

Fuente: Evaluación de la técnica de tomografía eléctrica para la estimación de propiedades fisicoquímicas de residuos mineros

Autor(a): María Garrafon (2013)

La resistencia (R) será proporcional a la longitud (L) del material resistivo e inversamente proporcional al área transversal (A). La constante de proporcionalidad es la resistividad real (ρ).

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad \text{Ec.(14)}$$

De acuerdo con la ley de Ohm, la relación entre la diferencia de potencial y la corriente aplicada (V/I) también define la resistencia (R) del cubo, de forma que la combinación de estas dos expresiones se puede combinar para formar el producto de la resistencia (Ω) y la distancia, definido como resistividad eléctrica.

$$\rho = \frac{V * A}{I * L} \quad \text{Ec.(15)}$$

El método más utilizado para la medición de la resistividad del suelo es el método de Wenner que consiste en cuatro electrodos clavados en el suelo y ubicados a una igual separación en línea recta (Ver fig.11-a). Los dos electrodos exteriores se utilizan para enviar una corriente eléctrica (I) al suelo en un rango de 50 a 100 miliamperes. En cambio los dos electrodos interiores miden la caída de voltaje V. [22]

Si el perfil del suelo es homogéneo la resistividad eléctrica es:

$$\rho = \frac{2\pi * r * \Delta V}{I} \quad \text{Ec.(16)}$$

Donde:

ρ = Resistividad eléctrica aparente

r= Distancia de separación

ΔV = Diferencia de potencial

I = Intensidad de corriente eléctrica

El perfil de suelo está conformado por diferentes estratos con diferente resistividad. Para obtener la resistividad real de diversos estratos, se puede utilizar un método empírico que consiste en la realización de pruebas con varias separaciones de

electrodos, la suma de las resistividades aparentes $\Sigma\rho$, se grafica en función de la separación “d”. La gráfica obtenida tiene segmentos rectos, cuyas pendientes dan la resistividad de los estratos individuales (Perfil de resistividad) (Ver fig. 11-b). [22]

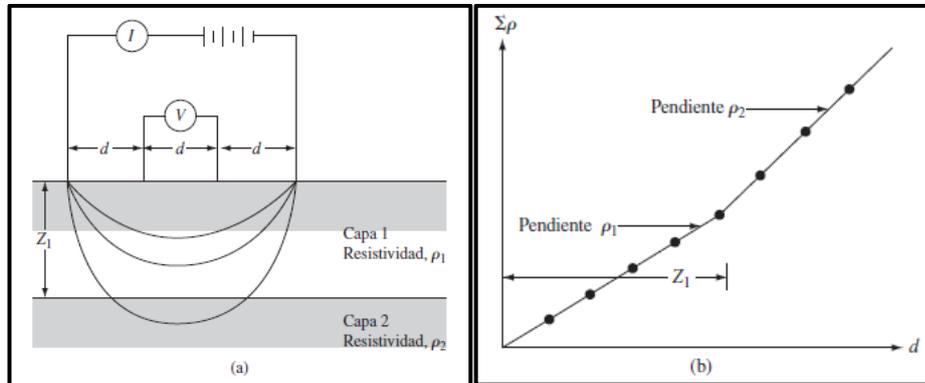


Figura 11. Estudio de resistividad eléctrica: (a) método de Wenner; (b) Método empírico para determinar la resistividad y el espesor de cada capa.

Fuente: Fundamentos de ingeniería geotécnica

Autor: Braja M. Das (2015)

Campo Eléctrico

Coulomb estableció que la fuerza de atracción o repulsión entre dos esferas cargadas era proporcional al producto de las cargas eléctricas individuales e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre los centros de las esferas. Su ley se puede escribir como la siguiente ecuación:

$$F = K \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \quad (\text{Ecuación de Coulomb})$$

Ec.(17)

Donde:

F= Fuerza de atracción o repulsión entre dos esferas cargadas.

Q1 y Q2 = Cargas eléctricas individuales.

r = Distancia entre los centros de las esferas

K= Constante

En el Sistema Internacional (SI), las unidades K se escriben como $(4\pi\epsilon_0)^{-1}$, de modo que la ley de Coulomb se convierte en:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} * \frac{Q_1 * Q_2}{r^2} \quad \text{Ec.(18)}$$

Donde:

ϵ_0 = Constante de Permitividad que es igual a $(8.854187 \times 10^{-12} \text{ C}^2\text{N}^{-1}\text{m}^{-2})$

La fuerza ejercida sobre una unidad de carga eléctrica por otra carga Q se llama campo eléctrico de la carga Q. Por lo tanto, si dejamos $Q_1=Q$ y $Q_2=1$ en la ecuación de "Coulomb" obtenemos la ecuación para el campo eléctrico E a la distancia r de una carga Q.

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \quad \text{Ec.(19)}$$

El término "campo" también se refiere a la geometría de las líneas de fuerza cerca de una carga. Alrededor de una carga de punto positivo, las líneas de campo se dirigen radialmente hacia afuera (divergente) (Fig.12a); alrededor de una carga puntual negativa se dirigen radialmente hacia adentro (convergente) (Fig.12b). Las líneas de campo de un par de cargas puntuales opuestas divergen de la carga positiva, se separan y convergen en la carga negativa (Fig.12c); dan la apariencia de unir las cargas opuestas.

El campo combinado de dos cargas puntuales positivas se caracteriza por líneas de campo que dejan cada carga y divergen en el espacio intermedio (Fig. 12d); se requiere trabajo para mover una partícula cargada de un punto en el campo a otro. Este trabajo contribuye a la energía potencial del sistema.

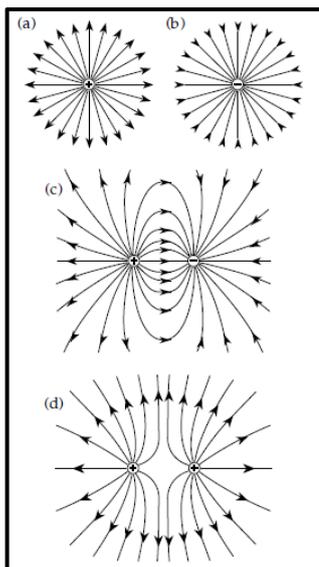


Figura 12. Secciones transversales planas de líneas de campo eléctrico alrededor de cargas puntuales: (a) positivo simple, (b) negativo simple, (c) dos iguales y opuestos, y (d) dos cargas positivas iguales.

Fuente: *An introduction to applied and Environmental Geophysics*
 Autor: Jhon M. Reynolds (1998)

Por ejemplo, a una distancia infinita de una carga positiva Q , la fuerza repulsiva sobre una unidad de carga positiva es cero, pero a una distancia r está dada por la ecuación anterior. La energía potencial de la unidad de carga en (r) se llama potencial eléctrico en (r); definido como (V) siendo sus unidades de energía por unidad de carga, es decir, julios / culombios. Si movemos una distancia δr contra el campo E , el potencial cambia en una cantidad δV igual al trabajo realizado contra E , que es $(-E \cdot \delta r)$. es decir, $\delta V = - E \cdot \delta r$, para que: [24]

$$E = - \frac{\delta V}{\delta r} \quad \text{Ec.(20)}$$

b) Conductividad eléctrica

Por otro lado, la inversa de la resistividad eléctrica es la conductividad (σ):

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\text{Siemens}}{\text{metros}} \right) \quad \text{Ec.(21)}$$

La corriente eléctrica puede ser propagada en las rocas y minerales por medio de tres mecanismos: a) electrolítica, b) electrónica (óhmica); y c) conducción dieléctrica.

- **Conducción electrolítica.-** Sucede por el movimiento relativamente lento de los electrones de un electrolito y que depende del tipo de ion, la concentración

iónica y la movilidad de éstos. Este método de conducción en suelos y rocas es el más común donde la corriente se mueve a través de los iones del agua de poro.

- **Conducción electrónica.** - Es la que se da en los metales, los cuales transmiten la corriente al permitir el movimiento rápido de los electrones
- **Conducción dieléctrica.** - Se da en materiales poco conductores o aislantes cuando se les aplica una corriente externa. Ésta causa que los electrones del átomo se muevan ligeramente con respecto del núcleo, es decir, aquí lo que se produce es una conducción a través del movimiento de los iones en la suspensión del suelo. [20]

La conducción eléctrica está gobernada principalmente por la naturaleza del fluido de los poros, relación de vacíos y grado de saturación. En suelos finos, la conducción eléctrica es más compleja. [25]

La conductividad eléctrica del suelo depende de la frecuencia aplicada. Para frecuencias elevadas (>100 kHz), la conductividad eléctrica se incrementa. En suelos, para frecuencias (<100 kHz) la conductividad resulta independiente de la frecuencia. No obstante, para valores de frecuencia muy bajos (<2 kHz) se producen efectos de polarización de electrodos. Para frecuencias entre ($2\text{kHz} < f < 100\text{kHz}$) la conductividad del suelo resulta independiente de la frecuencia y se verifica el cumplimiento de la ley de Ohm.

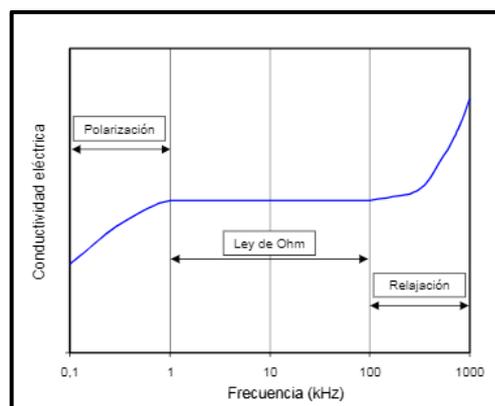


Figura 13. Curva típica de conductividad para suelos arcillosos
Fuente: *Caracterización de procesos de infiltración en estado no saturado sobre suelos limosos compactados.*
Autor: Gonzalo M. Aiassa (2008)

c) Flujo de corriente en suelo homogéneo

Para un electrodo de corriente único implantado en la superficie de un medio homogéneo de resistividad ρ , la corriente fluye radialmente. La caída de voltaje entre dos puntos en la superficie puede describirse por el gradiente de potencial ($-\delta V/\delta r$), que es negativo porque el potencial disminuye en la dirección del flujo de corriente. [20] La diferencia de potencial (δV) a través de una capa hemisférica de espesor incremental (δr) viene dada por:

$$-\frac{\delta V}{\delta r} = \rho * J$$

$$\frac{\delta V}{\delta r} = -\rho * J = -\rho * \frac{I}{2\pi r^2} \quad \text{Ec.(22)}$$

Por lo tanto, el voltaje V_r en un punto r de la fuente puntual actual es:

$$V_r = \int \delta V = - \int \rho \frac{I}{2\pi r^2} \delta r$$

$$V_r = \rho \frac{I}{2\pi r} \quad \text{Ec.(23)}$$

1.1.3.7.2 Configuración de los electrodos y factores geométricos

1.1.3.7.2.1 Método de los cuatro electrodos

Se considera una disposición que consta de un par de electrodos de corriente y un par de electrodos potenciales. Los electrodos actuales A y B actúan como fuente y entrada.

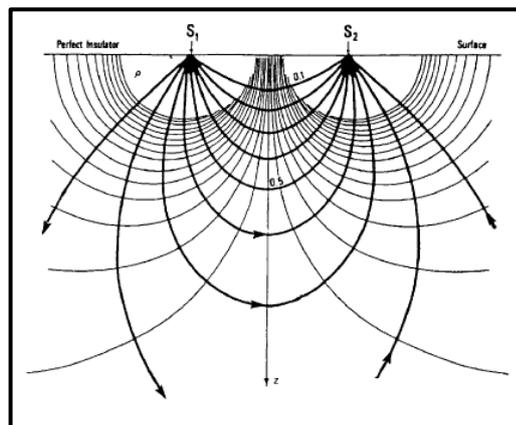


Figura 14. Líneas actuales y equipotenciales producidas por una fuente y entrada de corriente.

Fuente: *Fundamentals of Geophysics*
 Autor: William Lowrei (2013)

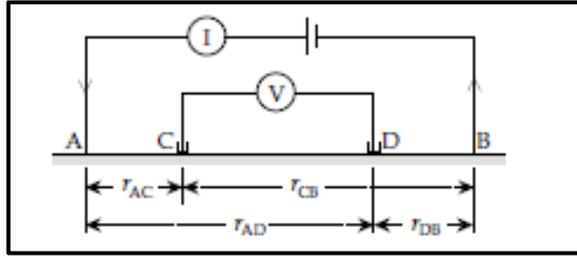


Figura 15. Configuración general de cuatro electrodos. Electrodo de corriente (A, B) y un par de electrodos potenciales (C, D).

Fuente: Fundamentals of Geophysics

Autor: William Lowrey (2013)

Observando la (Fig.15) se puede determinar que para una fuente y entrada de corriente, el potencial V_r en cualquier punto (r) en el suelo es igual a la suma de los voltajes de los dos electrodos de tal manera que: $V_r = V_A + V_B$ donde V_A y V_B son las contribuciones potenciales de los dos electrodos, A (+ I) y B (- I). [24]

Los potenciales de los electrodos C y D son:

$$V_C = \frac{\rho I}{2\pi} * \left[\frac{1}{r_{AC}} - \frac{1}{r_{CB}} \right] \quad \text{Ec.(24)}$$

$$V_D = \frac{\rho I}{2\pi} * \left[\frac{1}{r_{AD}} - \frac{1}{r_{DB}} \right] \quad \text{Ec.(25)}$$

Sin embargo, es mucho más fácil medir la diferencia de voltaje δV_{CD} , el cual puede ser reescrita como:

$$\delta V_{CD} = V_C - V_D$$

$$\delta V_{CD} = \frac{\rho I}{2\pi} * \left[\frac{1}{r_{AC}} - \frac{1}{r_{CB}} - \frac{1}{r_{AD}} + \frac{1}{r_{DB}} \right] \quad \text{Ec.(26)}$$

Todas las cantidades en esta ecuación se pueden medir en la superficie del suelo, excepto la resistividad que quedará definida como:

$$\rho = \frac{2\pi \delta V_{CD}}{I} * \left[\frac{1}{r_{AC}} - \frac{1}{r_{CB}} - \frac{1}{r_{AD}} + \frac{1}{r_{DB}} \right]^{-1} \quad \text{Ec.(27)}$$

Factores geométricos

La ecuación anterior se divide en dos partes, el primero es un término de resistencia (R; unidades Ω) y un término que describe la geometría de la configuración del

electrodo que se conoce como el factor geométrico (K; unidades metros), el cual depende del arreglo de los electrodos. [20]

$$R = \frac{\delta V_{CD}}{I}$$

$$K = 2\pi * \left[\frac{1}{r_{AC}} - \frac{1}{r_{CB}} - \frac{1}{r_{AD}} + \frac{1}{r_{DB}} \right]^{-1}$$

Un dato importante para tener en cuenta es que la resistividad aparente (ρ_a) y la resistividad real (ρ) únicamente coinciden cuando el subsuelo se considera absolutamente homogéneo.

$$\rho_a = R * K \quad \text{Ec.(28)}$$

Pero en la realidad, el suelo en la naturaleza tiene características heterogéneas debido a que encuentran formados por suelos con diferentes resistividades, por lo tanto, la resistividad obtenida ya no es la resistividad 'real' sino la resistividad aparente (ρ_a) que incluso puede ser negativa. Todos los datos de resistividad de campo son resistividad aparente, mientras que los obtenidos mediante técnicas de interpretación son resistividades "reales". [20] [26]

1.1.3.7.2 Configuración de los electrodos

La fórmula general para la resistividad medida por un método de cuatro electrodos es más simple para algunas geometrías especiales de los electrodos actuales y potenciales. Las configuraciones más utilizadas son las disposiciones Wenner, Schlumberger y de doble dipolo. En cada configuración, los cuatro electrodos son colineales, pero sus geometrías y separaciones son diferentes. [24]

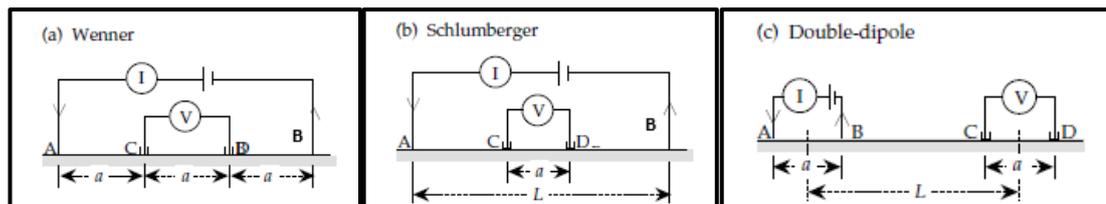


Figura 16. Geometrías especiales de corriente y potenciales para (a) configuraciones de Wenner, (b) Schlumberger y (c) Doble dipolo.

Fuente: Fundamentals of Geophysics

Autor: William Lowrei (2013)

Configuración de Wenner. - Los pares de electrodos actuales y potenciales tienen un punto medio común y las distancias entre electrodos adyacentes son iguales. Para que $r_{AC} = r_{DB} = a$, y $r_{CB} = r_{AD} = 2a$. Cambiando estos valores en la ecuación de Resistividad resulta: [24]

$$\rho = \frac{2\pi V_{CD}}{I} * \left[\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a} \right]^{-1}$$

$$\rho = \frac{2\pi V_{CD}}{I} * a \quad \text{Ec.(29)}$$

La profundidad de la medición depende de la distancia entre electrodos, pero no del tamaño de éstos. Además, esta configuración minimiza los problemas de contacto entre los electrodos y el suelo. En cuanto a la profundidad de investigación, suele ser aproximadamente 0,5 veces el espaciamiento entre electrodos “a”. Comparado con otras configuraciones, el arreglo de Wenner tiene una profundidad de investigación un poco limitada. [26] El arreglo geométrico de Wenner fue adoptado para la medición de resistividad en campo de esta tesis.

Configuración de Schlumberger. - Los pares de electrodos de corriente y potencial también tienen un punto medio común, pero las distancias entre electrodos adyacentes cambian. Asumiendo que las separaciones de los electrodos de corriente y potenciales sean “L” y “a”, respectivamente. Entonces $r_{AC} = r_{DB} = (L - a) / 2$ y $r_{CB} = r_{AD} = (L+a)/2$. Remplazando estos valores en la ecuación de resistividad de cuatro electrodos queda de la siguiente manera:

$$\rho = \frac{2\pi V_{CD}}{I} * \left[\frac{2}{L - a} - \frac{2}{L + a} - \frac{2}{L + a} + \frac{2}{L - a} \right]^{-1}$$

$$\rho = \frac{\pi V_{CD}}{4I} * \left[\frac{L^2 - a^2}{a} \right] \quad \text{Ec.(30)}$$

En esta configuración, la separación de los electrodos de corriente se mantiene mucho más grande que la de los electrodos potenciales ($L > a$). La ecuación se simplifica a:

$$\rho = \frac{\pi V_{CD}}{4I} * \left[\frac{L^2}{a} \right] \quad \text{Ec.(31)}$$

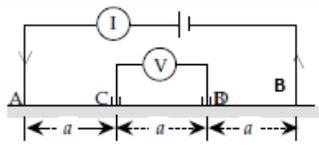
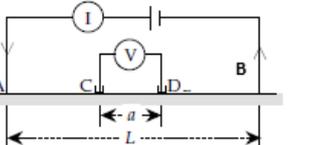
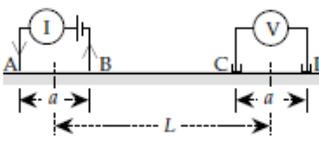
Configuración de doble-dipolo. - La separación de los electrodos en cada par es “a”, mientras que la distancia entre sus puntos medios es L, que generalmente es mucho mayor que “a”. Hay que tener en cuenta que el electrodo de detección D se define como el electrodo potencial más cercano a la entrada de corriente B. En este caso, $r_{AD} = L+a$; $r_{BC} = L-a$; $r_{AC} = L$; y $r_{BD} = L$ [24]

$$\rho = \frac{2\pi V_{CD}}{I} * \left[\frac{1}{L} - \frac{1}{L-a} - \frac{1}{L+a} + \frac{1}{L} \right]^{-1}$$

$$\rho = \frac{\pi V_{CD}}{I} * \left[\frac{L * (L^2 - a^2)}{a^2} \right] \quad \text{Ec.(32)}$$

Se pueden usar dos modos de investigación con cada configuración de electrodos. La configuración de Wenner se adapta mejor al perfilado lateral. El ensamblaje de cuatro electrodos se desplaza paso a paso a lo largo de un perfil mientras se mantienen valores constantes de las distancias entre electrodos correspondientes a la configuración empleada. [24] A continuación se presenta una tabla con los valores de resistividad y factor geométrico para los distintos arreglos geométricos.

Tabla 13. Distintas configuraciones de electrodos

Tipo de configuración	Arreglo de electrodos	Factor geométrico K	Ecuación de resistividad.
Wenner		$2\pi a$	$\rho = \frac{2\pi V_{CD}}{I} * a$
Schlumberger		$\frac{\pi}{4a} * (L^2 - a^2)$	$\rho = \frac{\pi V_{CD}}{4I} * \left[\frac{L^2 - a^2}{a} \right]$
Doble-dipolo		$\frac{\pi L}{a^2} * (L^2 - a^2)$	$\rho = \frac{\pi V_{CD}}{I} \left[\frac{L * (L^2 - a^2)}{a^2} \right]$

Autor: Jimmy Macas

1.1.3.7.3 Sondeo eléctrico vertical (VES)

En el sondeo eléctrico vertical (VES), el objetivo es observar la variación de la resistividad con la profundidad del suelo. La técnica se adapta mejor para determinar la profundidad y la resistividad de las estructuras de roca en capas planas, como los lechos sedimentarios, o la profundidad hasta la capa freática. La configuración de Schlumberger se usa más comúnmente para las investigaciones de VES. [24]

El punto medio de la matriz se mantiene fijo mientras que la distancia entre los electrodos actuales aumenta progresivamente. [24] A medida que aumenta la distancia entre los electrodos de corriente, aumenta la profundidad a la que penetra la corriente. Los valores de resistividad aparente se trazan en un gráfico llamado (“perfil de resistividad”) cuyos ejes x e y representan los valores logarítmicos de la media separación del electrodo de corriente ($AB / 2$) y la resistividad aparente (ρ_a) respectivamente.

En la configuración de Wenner, los cuatro electrodos tienen que moverse a nuevas posiciones a medida que aumentan los espacios entre electrodos (Fig. 17). El método de Wenner, de cuatro electrodos es el más usado. En resumen, cuatro sondas son clavadas en la tierra en línea recta, separadas por una distancia constante (a) y a una profundidad (b). El voltaje entre los dos electrodos interiores (Potencial), es medido y dividido por la corriente que circula entre los dos exteriores (corriente), para dar un valor de la resistencia (R).

A continuación se presenta un diagrama de la formación de Wenner para el VES incrementando gradualmente la separación horizontal de sus electrodos

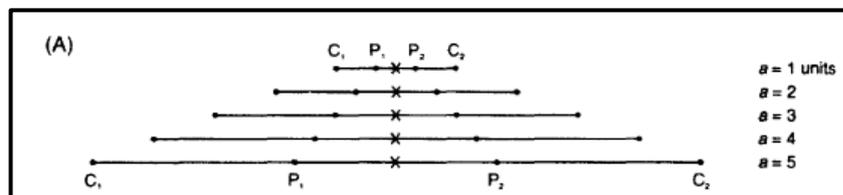


Figura 17. Sondeo eléctrico vertical Wenner

Fuente: *Fundamentals of Geophysics*

Autor: *William Lowrei (2013)*

En el caso del método de Schlumberger (Fig. 18), los electrodos potenciales (P1,P2) se colocan en un espacio fijo (b) que no es más de una quinta parte del espacio medio del electrodo de corriente (a). Los electrodos actuales se colocan a distancias

progresivamente mayores. Cuando el voltaje medido entre P 1 y P2 cae a valores muy bajos los electrodos potenciales se separan más ampliamente (espaciado b2). Las mediciones continúan y la separación potencial de los electrodos aumenta nuevamente según sea necesario hasta que se complete el VES.

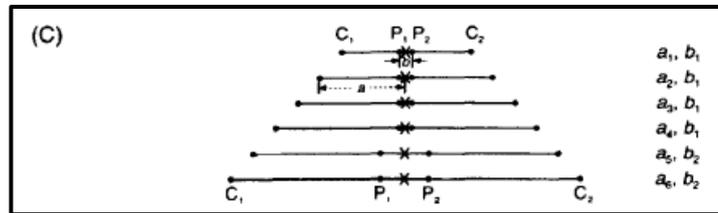


Figura 18. Sondeo eléctrico vertical Schlumberger
 Fuente: *Fundamentals of Geophysics*
 Autor: William Lowrei (2013)

La matriz doble-dipolo rara vez se usa para sondeo vertical ya que normalmente se requieren generadores eléctricos grandes y potentes. Una vez que se ha elegido la distancia entre los dos electrodos de corriente y entre los dos electrodos potenciales, la distancia entre los dos dipolos se incrementa progresivamente (Fig. 19) para producir el sondeo. [20]

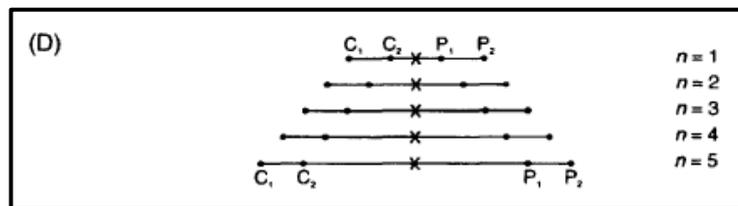


Figura 19. Sondeo eléctrico vertical doble - dipolo
 Fuente: *Fundamentals of Geophysics*
 Autor: William Lowrei (2013)

1.1.3.7.4 Método de interpretación

Para esta investigación no se realizarán las correspondientes “Curvas de campo o perfil de resistividad” que generalmente se suelen hacer, puesto que las mediciones de resistividad en campo que se tomarán serán las “aparentes”. Es decir, solo se tomará medidas de resistividad a una profundidad de un metro en todas las zonas. Se realizarán un promedio de 3 mediciones en cada zona con un rango de error aceptado del 10%. Además, las capas cercanas a la superficie tienen mayor precisión que las de profundidad, principalmente porque los datos de campo de separaciones más cortas tienden a ser más confiables que aquellos para una separación muy grande, debido a las relaciones de señal a ruido más altas. El método de Wenner es el empleado para

desarrollar la investigación entonces el valor de la resistividad se la obtiene con la relación $(\rho = 2\pi \cdot a \cdot R)$.

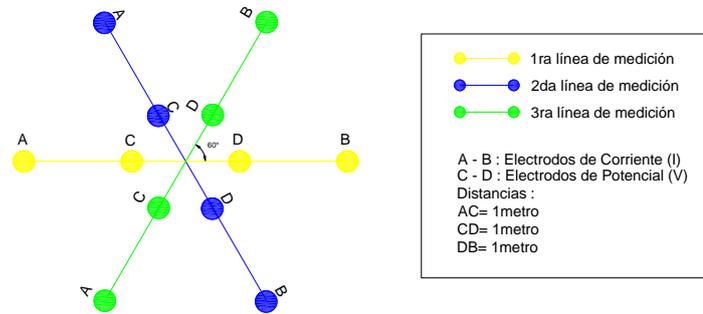


Figura 20. Configuración de electrodos (Vista en planta)

Autor: Jimmy Macas

La interpretación de los resultados de esta investigación se centra en la correlación de la resistividad eléctrica del suelo con el contenido de humedad y peso específico, límites de Atterberg, compactación, relación de vacíos, porosidad, grado de saturación de aire y de agua, y CBR. Estas relaciones son de gran importancia para caracterizar las propiedades físicas y mecánicas del suelo.

1.1.3.7.5 Factores que influyen en la resistividad de los suelos

La resistividad del suelo varía ampliamente a lo largo y ancho de la tierra, encontrándose determinada por distintos factores como:

- Sales Solubles.** – La resistividad del suelo es determinada principalmente por su cantidad de electrolitos; esto es, por la cantidad de humedad, minerales y sales disueltas. [27]
- Granulometría.** – Influye bastante sobre la porosidad y el poder retenedor de humedad y sobre la calidad del contacto con los electrodos aumentando la resistividad con el mayor tamaño de los granos de la tierra. Por esta razón la resistividad de la grava es superior a la de la arena y de que ésta sea mayor que la de la arcilla. [27]
- Estratigrafía.** – El terreno es un suelo heterogéneo por lo tanto la resistividad será diferente en cada uno de sus estratos.
- Composición propia del terreno.** – La composición del terreno depende de la naturaleza de éste. Por ejemplo, el suelo de arcilla normal tiene una

resistividad de 40-500 ohm-m. En cambio, la resistividad de un terreno rocoso es de 5000 ohm-m. En diversos estudios los resultados mostraron que las grietas tienen valores anómalos de alta resistividad que se pueden distinguir del fondo, y cambiar la profundidad, la longitud, el ancho y la orientación del agrietamiento provoca cambios significativos en la resistividad del suelo. [28]

- e. **Temperatura.** – A medida que desciende la temperatura aumenta la resistividad del terreno y ese aumento se nota aún más al llegar a 0° C, hasta el punto de que, a medida que es mayor la cantidad de agua en estado de congelación, se va reduciendo el movimiento de los electrolitos los cuales influyen en la resistividad de la tierra.
- f. **Estado higrométrico.** – El contenido de agua y la humedad influyen en forma apreciable. Su valor varía con el clima, época del año, profundidad y el nivel freático. Como ejemplo, la resistividad del suelo se eleva considerablemente cuando el contenido de humedad se reduce a menos del 15% del peso de éste. Pero, un mayor contenido de humedad del 15% mencionado, causa que la resistividad sea prácticamente constante.
- g. **Compactación.** – La resistividad del terreno disminuye al aumentar la compactación de éste. Por ello, se procura colocar los electrodos de puesta a tierra en los terrenos más compactos posibles. [27] La densidad aparente del suelo depende de la cantidad relativa de aire y sólidos en un volumen dado de suelo. Si la densidad aparente disminuye la cantidad de aire aumenta llenándose en la porosidad e incrementando la resistividad. En cambio, si la densidad aparente aumenta, el contenido de aire y la resistividad eléctrica también disminuyen. La resistividad eléctrica es muy sensible a cualquier variación en la densidad del suelo. [26] La humedad de compactación juega un papel importante, debido a que, la resistividad eléctrica es más sensible a las variaciones de humedad inferiores al óptimo, mientras que en rama húmeda la resistividad eléctrica resulta independiente a la humedad de compactación. [25]

De igual manera sucede cuando los electrodos de prueba están mal conectados o tienen falsos contactos, darán señales falsas de corriente y voltaje. Si hay corrientes distintas a las que envió el telurómetro, éste leerá otras señales de voltaje y corriente que no son las adecuadas.

También estos aparatos de repente tienen oscilaciones en sus lecturas y no es posible leerlas. Los fabricantes recomiendan una nueva calibración del equipo cada 100 mediciones realizadas para evitar lecturas erróneas.

1.1.3.7.6 Resistividad de algunos materiales naturales

Los diferentes materiales que componen el subsuelo en la naturaleza presentan un amplio rango de resistividades, una roca se comporta como un aislante eléctrico con resistividades que van desde $10^5 - 10^7 \Omega\text{m}$. Las rocas ígneas y metamórficas, influenciados por el grado de fractura y el porcentaje de agua que rellenan tales fracturas presentan altos valores de resistividad, al igual, que las rocas sedimentarias debido a su porosidad, característica que permite almacenar un mayor contenido de agua en los poros. Los suelos también presentan una amplia variación. en las resistividades (ρ), la resistividad de las arenas es superior al de los limos y arcillas. [26] En la siguiente tabla se indican algunos rangos de resistividad para diferentes tipos de suelos y rocas.

Tabla 14. Valores representativos de resistividad

Material	Resistividad (Ωm)
Arena	500-1500
Arcilla, limo saturado	0-100
Arena arcillosa	200-500
Grava	1500-4000
Roca intemperizada	1500-2500
Roca firme	>5000

Fuente: Comportamiento de la resistividad eléctrica de los suelos ante variaciones de humedad y grado de compactación

Autor: Javier Cuñez (2015)

1.1.3.8 Análisis de correlaciones

Para evaluar la influencia de algunas propiedades del suelo sobre la resistividad eléctrica se debe analizar estadísticamente su correlación. Para tal propósito se utilizó el software: “Excel”. Una correlación se define como el grado de variación conjunta existente entre dos o más variables. Para eso se relacionan algunas leyes de regresión es estimar el valor de una variable aleatoria “Variable dependiente” dado que se conoce el valor de la “Variable independiente” la ecuación de regresión es la fórmula algebraica mediante la cual se determina el valor de la variable independiente. Existen

dos análisis de regresión “Simple y múltiple” la regresión simple estima el valor de una variable dependiente sobre una independiente, mientras que la regresión múltiple estima el valor de una variable dependiente sobre dos o más variables independientes.

El objetivo de crear las curvas de regresión es generar las correlaciones entre las propiedades de suelos estudiadas y la resistividad eléctrica del mismo, éstas estarán expresadas en modelos matemáticos que permiten dar una idea aproximada de las propiedades del suelo generando ahorro de tiempo y dinero.

1.1.3.9 Correlación de dos variables

Se analizarán algunas leyes de regresión, expresadas en ecuaciones de 2 variables (Variable Independiente X); (Variable dependiente Y) y que permiten conocer una propiedad a partir de otra. Los distintos modelos se ajustarán por el criterio de mínimos cuadrados.

Criterio de mínimos cuadrados. - “La recta de regresión de mejor ajuste (y la mejor ecuación) es aquella en la cual se minimiza la suma de las desviaciones al cuadrado entre los valores estimado y el real de la variable dependiente para el dato muestral correspondiente” [29]

Modelo lineal: El método más simple para una aproximación por mínimos cuadrados es adjuntar una línea recta a un conjunto de puntos.

$$Y = a_0 + a_1X \quad \text{Ec.(33)}$$

Donde:

a_0 : Intersección de la recta con el eje Y a_1 : Pendiente de la recta.

n: número de muestras.

Los valores de a_0 y a_1 se obtienen a partir de las ecuaciones siguientes:

$$a_1 = \frac{n * \sum xy - (\sum x) * (\sum y)}{n * \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad \text{Ec.(34)}$$

$$a_0 = Y_{med} - a_1 * X_{med} \quad \text{Ec.(35)}$$

Métodos No lineales

El método de mínimos cuadrados permite obtener la mejor recta de ajuste a los datos en el caso de regresión lineal, sin embargo no siempre existe una regresión lineal entre la variable dependiente y la variable independiente en algunos casos es posible aplicar transformaciones para expresar los datos en una forma compatible con la relación lineal, este es el caso con el modelo exponencial y potencial

Modelo Exponencial

$$Y = a_0 * e^{a_1 * X} \quad \text{Ec.(36)}$$

Donde:

a_0 : Intersección de la recta con el eje Y. a_1 : Taza de crecimiento.

Se utiliza para linealizar la aplicación del logaritmo natural. La gráfica quedará determinada en sus abscisas por la variable independiente “X” y en la ordenada por el “Ln(Y)”

$$\ln(Y) = \ln(a_0 * e^{a_1 * X}) \rightarrow \ln(Y) = \ln(a_0) + \ln(e^{a_1 * X}) \rightarrow \ln(Y) = \ln(a_0) + a_1 * X$$

Los valores de a_0 y a_1 se obtienen a partir de las ecuaciones siguientes:

$$a_1 = \frac{n * \sum X * \ln Y - (\sum X) * (\sum \ln Y)}{n * \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad \text{Ec.(37)}$$

$$a_0 = Y_{med} - a_1 * X_{med} \quad \text{Ec.(38)}$$

Modelo Potencial:

$$Y = a_0 * X^{a_1} \quad \text{Ec.(39)}$$

Se utiliza para linealizar la aplicación del logaritmo en base 10. La gráfica quedará determinada en sus abscisas por la variable independiente “Log(X)” y en la ordenada por el “Log(Y)”

$$\begin{aligned} \text{Los } \log_{10} Y &= \log_{10}(a_0 * X^{a_1}) \rightarrow \log_{10} Y = \log_{10}(a_0) + \log_{10}(X^{a_1}) \rightarrow \log_{10} Y \\ &= \log_{10}(a_0) + a_1 * \log_{10}(X) \\ a_1 &= \frac{n * \sum \log x * \log y - (\sum \log x) * (\sum \log y)}{n * \sum \log x^2 - (\sum \log x)^2} \end{aligned} \quad \text{Ec.(40)}$$

$$a_0 = Y_{med} - a_1 * X_{med} \quad \text{Ec.(41)}$$

Modelo polinomial:

$$Y = a_0 + a_1 * X + a_2 * X^2 + a_3 * X^3 + \dots a_n * X^n \quad \text{Ec.(42)}$$

Resolviendo por sus derivadas parciales se obtiene el “Sr” que es la sumatoria del cuadrado de los residuos alrededor de la línea de regresión. Se obtiene el sistema de ecuaciones siguiente:

$$\begin{aligned} a_0 * n + a_1 * \sum X + a_2 * \sum X^2 &= \sum Y \\ a_0 * \sum X + a_1 * \sum X^2 + a_2 * \sum X^3 &= \sum XY \\ a_0 * \sum X^2 + a_1 * \sum X^3 + a_2 * \sum X^4 &= \sum X^2Y \end{aligned} \quad \text{Ec.(43)}$$

Este sistema aplica para el modelo polinomial de segundo grado. Mediante el sistema de ecuaciones se obtiene los valores de (a0, a1, a2) ya sea por método de sustitución, de matriz inversa, etc.

Modelo logarítmico

$$Y = a_0 + a_1 * \text{Ln}(X) \quad \text{Ec.(44)}$$

Se utiliza para linealizar la aplicación del logaritmo natural. La gráfica quedará determinada en sus abscisas por la variable independiente “X’=Ln(X)” y en la ordenada por el “Y”

Los valores de a_0 y a_1 se obtienen a partir de las ecuaciones siguientes:

$$a_1 = \frac{n(\sum X'Y) - (\sum X')(\sum Y)}{n \sum X'^2 - (\sum X')^2} \quad \text{Ec.(45)}$$

$$a_0 = Y_{med} - a_1 * X_{med} \quad \text{Ec.(46)}$$

Y generalmente para realizar el ajuste línea de todos los modelos anteriores, primero se tiene que encontrar el valor del error estándar " $S_{\frac{y}{x}}$ ", del estimado donde los subíndices $\frac{y}{x}$ designa que el error es para un valor predicho de la variable dependiente "Y" correspondiente a un valor particular de "X" donde su valor es: [30]

$$S_{\frac{y}{x}} = \sqrt{\frac{Sr}{n-2}} \quad \text{Ec.(47)}$$

Donde:

Sr: Suma de los cuadrados de los residuos alrededor de la línea de regresión.

(n-2): Grados de libertad, es 2 por que se utilizan 2 datos estimados (a_0 y a_1)

Entonces "Sr" queda definida como:

$$Sr = \sum (Y - a_0 - a_1 X)^2 \quad \text{Ec.(48)}$$

El valor de "Sy" sería igual:

$$Sy = \sqrt{\frac{St}{n-1}} \quad \text{Ec.(49)}$$

Donde:

St: Suma total de los cuadrados de la diferencia entre los datos y la media.

(n-1): Grados de libertad, es 1 por que se utilizan 1 datos estimados.

Entonces "St" queda definida como:

$$St = \sum (Y - Y_{media})^2 \quad \text{Ec.(50)}$$

Además se determina el valor de la correlación múltiple “r” o también llamado “Coeficiente de correlación de Pearson” mediante la fórmula:

$$r = \sqrt{\frac{\sum St - \sum Sr}{\sum St}} \quad \text{Ec.(51)}$$

Finalmente se determina el “*coeficiente de determinación*”, que es el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson ($R^2=r^2$), el cual describe la porción de la varianza total de los datos observados que pueden ser explicados por el modelo. Los valores del (r^2) se encuentran en el rango entre 0 y 1 el resultado más cercano a 1 indica el mejor ajuste. Para que se cumple el ajuste lineal se tienen que cumplir dos condiciones. [30]

- 1.- El valor de $S \frac{y}{x}$ que sea menor al S_y .
- 2.- El valor de la correlación debe ser los más aproximado a +1 o -1.

1.1.3.10 Correlación de variables múltiples

El análisis de regresión múltiple es una extensión del análisis de regresión simple para aplicaciones en la que se usa dos o más variables independientes para estimar el valor de la variable dependiente. [29] Y formular modelos matemáticos con el fin de predecir resultados y la correlación permite medir el grado de asociación entre dos variables y en qué sentido están asociadas, es decir si dicha asociación es positiva o negativa la correlación puede o no ser asociada con la regresión. [30] El modelo lineal algebraico es:

$$\hat{Y} = a + b_1 * X_1 + b_2 * X_2 \quad \text{Ec.(52)}$$

Donde:

\hat{Y} : Variable dependiente. X_1 y X_2 : Variables independientes.

a: Intersección con el eje Y b_1 y b_2 : Coeficientes

La ecuación de regresión múltiple proporciona la recta de mejor ajuste con base en el método de mínimos cuadrados. La recta de mejor ajuste es aquella que atraviesa un espacio de dimensión “n” (de tres dimensiones en el caso de dos variables

independientes). [29] En la regresión lineal múltiple no se incluye todas las variables independientes a la vez y posteriormente comenzamos a minimizar la función error. Se debe enfocar en seleccionar las mejores variables independientes que puedan contribuir a la variable dependiente para esto se debe construir una matriz de correlación para todas las variables independientes e incluir la variable dependiente. El valor de correlación da una idea de que variable es significativa y porque factor. A partir de esta matriz se elige la variable independiente en orden decreciente de valor de correlación y se ejecuta el modelo de regresión para estimar los coeficientes, minimizando la función de error. Se detiene cuando no se presenta una mejora destacada en la función de estimación mediante la inclusión de la siguiente característica independiente. Para resolver el método de regresión múltiple se resuelve por medio del sistema de ecuaciones normalizadas:

$$\begin{aligned}
 a * n + b_1 * \sum X1 + b_2 * \sum X2 &= \sum Y \\
 a * \sum X1 + b_1 * \sum X1^2 + b_2 * \sum X1 * X2 &= \sum(X1 * Y) \\
 a * \sum X2 + b_1 * \sum X1 * X2 + b_2 * \sum(X2)^2 &= \sum(X2 * Y)
 \end{aligned}
 \tag{Ec.(53)}$$

Mediante el sistema de ecuaciones se obtiene los valores de (a, b1, b2) ya sea por método de sustitución, de matriz inversa, etc. Con estos valores se completa la ecuación de variables múltiples que se necesita encontrar. Adicionalmente para comprobar que existe una buena correlación entre estas variables se debe calcular el coeficiente de determinación “r²” (Valor cercano a 1) y el “error estándar” mediante las siguientes formulas.

$$Se = \sqrt{\frac{\sum Y^2 - a \sum Y - b1 \sum(X1 * Y) - b2 \sum(X2 * Y)}{n - 3}}
 \tag{Ec.(54)}$$

$$r^2 = \frac{a \sum Y + b1 \sum(X1 * Y) + b2 \sum(X2 * Y) - n * (Ymed)^2}{\sum(Y^2) - n * (Ymed)^2}
 \tag{Ec.(55)}$$

Donde:

Se: Error estándar

n-3: Grados de libertad donde n=número total de muestras y 3 por que existen 3 variables que se quieren correlacionar.

r²: Coeficiente de determinación.

1.1.4 HIPÓTESIS

Hi: Hipótesis Alternativa

Ho: Hipótesis Nula

Hi: Se puede utilizar valores de resistividad eléctrica de suelos para correlacionar y obtener valores aproximados tanto de propiedades índice y mecánicas de suelos granulares en la ciudad de Ambato.

Ho: No se puede utilizar valores de resistividad eléctrica de suelos para correlacionar y obtener valores aproximados tanto de propiedades índice y mecánicas de suelos granulares en la ciudad de Ambato.

1.1.4.1 Señalamiento de variables de la hipótesis

1.1.4.1.1 Variable dependiente

Propiedades índice y mecánicas de suelos en la ciudad de Ambato

1.1.4.1.2 Variable independiente

Resistividad eléctrica del suelo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General:

Determinar correlaciones entre propiedades índice y mecánicas con la resistividad eléctrica de los suelos granulares de la ciudad de Ambato.

1.2.2 Objetivos Específicos:

- Realizar un estudio de las propiedades índice y mecánicas de los suelos granulares de Ambato.
- Determinar la correlación entre el contenido de humedad con la resistividad eléctrica.

- Determinar la correlación entre la granulometría con la resistividad eléctrica.
- Determinar la correlación entre los límites de Atterberg con la resistividad eléctrica.
- Determinar la correlación entre la densidad de campo con la resistividad eléctrica.
- Determinar la correlación entre proctor modificado con la resistividad eléctrica.
- Determinar la correlación entre el valor de SPT con la resistividad eléctrica.
- Determinar la correlación entre el valor de CBR con la resistividad eléctrica.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

2.1 Nivel de Investigación

Los tipos de investigación que se emplearán en esta tesis son del tipo: exploratoria, explicativa, descriptiva, de campo y experimental.

2.1.1 Investigación exploratoria

La presente investigación es de tipo exploratorio porque se toman muestras en situ para poder ensayar y determinar las distintas propiedades índices y mecánicas y de esta manera poder correlacionar con el método de resistividad y obtener resultados óptimos.

2.1.2 Investigación explicativa

La investigación será de tipo explicativo debido a que se detallan los distintos ensayos de laboratorio y de campo a realizar para poder obtener valores de las muestras de suelo y sacar las correlaciones más apropiadas.

2.1.3 Investigación descriptiva

La investigación será de tipo descriptivo porque se describirán los ensayos tanto de campo como de laboratorio realizados, así como la descripción del método de correlaciones simples y múltiples por el método de mínimos cuadrados.

2.1.4 Investigación de campo

La investigación de campo consiste en el reconocimiento del lugar y recolección de datos para establecer las condiciones que se encuentra el tipo de suelo a ensayar

2.1.5 Investigación experimental

La investigación empleada en este proyecto será de tipo experimental por tal motivo se realizará ensayos de laboratorio, como ensayos de granulometría, compactación, límites de Atterberg, gravedad específica, CBR, con el propósito de determinar correlaciones que puedan existir con el método geofísico de la resistividad eléctrica de los suelos medida en campo. Todas las muestras que se analizarán serán obtenidas directamente del sitio, el suelo areno limoso obtenido del sector Huachi Chico en el cantón de Ambato.

2.1.6 Población

La población del proyecto es todo el universo de suelos granulares presentes en el cantón Ambato provincia de Tungurahua, principalmente el obtenido en el sector de Huachi Chico. El tipo de suelo según la figura 21 se encuentra determinado por los símbolos Mc2 del cual se detalla en la tabla 15. [31]

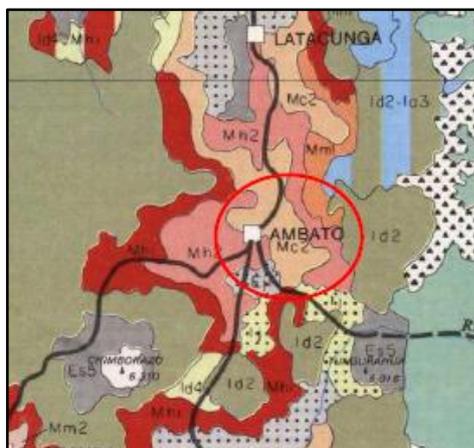


Figura 21. Mapa geológico de la ciudad de Ambato
Fuente: Mapa de suelos del Ecuador
Autor: Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo

Tabla 15. Descripción del suelo Mc2

Clima, zonas de humedad y temperatura		Fisiología y relieve	Características de los suelos	Suelo Tipo	Simbología
Seco	Templado	Relieves ondulados a colinados de las vertientes y partes bajas norte y centro	Duripán (cangahua) a menos de 1 metro de profundidad; pardos; arenosos finos; ph neutro a ligeramente alcalino con CO ₃ Ca	Arenosos finos	Mc2

Fuente: Mapa de suelos del Ecuador
Autor: Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo

2.1.7 Muestra

Se tomó distintos pesos para los ensayos de cada tipo de suelo del sector de Huachi Chico (Ver anexo 1), se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 16. Peso total del suelo areno limoso

SUELO E1 hasta E10			
SUELO ARENO LIMOSO (Clasificación visual)			
Muestra (gr)	Descripción	Número de ensayos	Total (kg)
250	Granulometría	10	2.50
50	Gravedad específica	10	0.50
24000	Ensayos Proctor	10	240
18000	Ensayos CBR	10	180
TOTAL DE LA MUESTRA			423.00 kg

Autor: Jimmy Macas

Para realizar el ensayo de gravedad específica se requiere un peso aproximado de 50gr por muestra de suelo que pasa el tamiz #40 según la norma (AASHTO T 100 2015 y ASTM: D-854-58). Para el ensayo de granulometría se requiere ensayar solo con 250 gr por muestra de suelo ya que el suelo es relativamente fino y no se requiere tamizar por el tamiz #4. Según las normas (AASHTO: T-87-70 y ASTM:D -421-58).

Para el ensayo del Proctor Modificado se realizó un ensayo por cada muestra de suelo para cada ensayo se requiere un peso de 24000 gr por muestra de suelo es decir 6000 gr de suelo para cada molde. según la Norma (AASHTO T-180 y ASTM D-1557), en total son 10 ensayos con un peso requerido aproximado de 240 Kg de muestra. Para el ensayo de CBR se requiere 18000 gr por cada muestra de suelo es decir 6000 gr de suelo para cada molde. según la Norma (ASTM: D1883-73 y AASHTO: T-193-63), en total son 10 ensayos con un peso requerido aproximado de 180 Kg de muestra. Para los ensayos de límite líquido y límite plástico la muestra de suelo aproximadamente será de 150 gr por cada uno. Se realizará según las normas (AASHTO T-90-70 y ASTM D-424-71) y (AASHTO T-90-70 y ASTM D-424-59-74)

2.2 Materiales y equipos

Los materiales y equipos utilizados en el desarrollo de esta tesis se detallan a continuación.

Tabla 17. Equipos y materiales utilizados

ENSAYOS	MATERIALES	EQUIPOS	NORMA
Pozo a Cielo Abierto (PCA)	Muestras in situ	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Herramientas menores ✓ Flexómetro 	AASHTO T-205 y ASTM D-2167
Densidad de Campo (Método del Cono y Arena de Ottawa)	Muestras in situ	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Cono ✓ Placa metálica ✓ Balanza ✓ Fundas plásticas ✓ Herramientas menores 	AASHTO T 191 2014
Contenido de humedad	Muestras en situ	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fundas plásticas ✓ Recipientes metálicos ✓ Horno eléctrico 	ASTM S2216-71 y AASHTO T 265

Tabla 17. Equipos y materiales utilizados

ENSAYOS	MATERIALES	EQUIPOS	NORMA
Resistividad eléctrica del suelo	Muestras en situ	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Telurómetro (DUOYI-DY4300B) ✓ Electrodos ✓ Cables de prueba 	IEEE STD 81-1983
Gravedad específica de sólidos	50 gr de suelo que pasa tamiz # 40	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Tamiz #4 ✓ Picnómetro ✓ Embudo ✓ Termómetro ✓ Recipiente metálico ✓ Pipeta 	AASHTO T 100 2015 y ASTM: D854-58
Granulometría	250 gr de suelo	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Tamizadora eléctrica ✓ Juego de Tamices ✓ Brocha ✓ Recipiente metálico 	ASTM D-421-58 y AASHTO T-87-70
Límite Líquido (Copa Casagrande)	150 gr de suelo que pasa tamiz # 40	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Copa Casagrande ✓ Espátula ✓ Acanalador ✓ Recipientes metálicos 	AASHTO T-90-70 y ASTM D-424-71
Límite Plástico	150 gr de suelo que pasa tamiz # 40	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Placa de vidrio ✓ Mortero de porcelana ✓ Calibrador pie de rey ✓ Recipientes metálicos 	AASHTO T-90-70 y ASTM D-424-59-74

Tabla 17. Equipos y materiales utilizados

ENSAYOS	MATERIALES	EQUIPOS	NORMA
Proctor Modificado tipo B	24 kg de suelo que pasa el tamiz # 4	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Bandeja metálica. ✓ Martillo de compactación. ✓ Moldes Ø 6" con extensión ✓ Base metálica. ✓ Probeta graduada (1000 ml). ✓ Herramientas menores 	AASHTO T-180 y ASTM D-1557
California Bearing Ratio (CBR)	18 kg de suelo que pasa el tamiz # 4	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Los mismos equipos del ensayo Proctor modificado tipo B. ✓ MULTISPEED 34-V1172 (Máquina de CBR) 	ASTM: D1883-73 y AASHTO:T-193-63
Ensayo de Penetración Estándar (SPT)	Muestras in-situ	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Maza: 63.5 Kg (140 libras) ✓ Muestreador tubo partido. Varillaje. ✓ Equipo de perforación. ✓ Cabezal de golpeo 	INEN 0689

Autor: Jimmy Macas

2.3 Métodos

2.3.1 Plan de recolección de Datos

Tabla 18. Plan de recolección de datos

PREGUNTAS BÁSICAS	EXPLICACIÓN
¿Para qué?	Para correlacionar las propiedades índices y mecánicas de diferentes suelos con su resistividad eléctrica obtenida in situ y que exista un ahorro de tiempo y dinero en la realización de ensayos de suelos en el campo ingenieril.
¿A quiénes?	A los suelos granulares de la Parroquia Huachi Chico de la Ciudad de Ambato.
¿Sobre qué aspectos?	Las propiedades de los suelos obtenidas mediante los diferentes ensayos de campo y laboratorio, así como el valor del CBR obtenido del ensayo de relación de soporte de California y a su vez la resistividad eléctrica correspondiente.
¿Quien?	Jimmy Damián Macas Bustamante
¿Cuándo?	Ensayos de campo del 10 de junio al 20 de julio. Ensayos de laboratorio del 21 de julio al 13 de septiembre. Procesamiento y análisis de información desde septiembre a noviembre.
¿Donde?	Parroquia Huachi Chico para tomas de muestras y ensayos in situ. Laboratorio de Ensayos de Materiales y Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

Tabla 18. Plan de recolección de datos

PREGUNTAS BÁSICAS	EXPLICACIÓN
¿Técnicas de Recolección?	<p>Se retira la capa vegetal y se procede a el pozo a cielo abierto bajo la norma AASHTO T-205, a su vez la toma de resistividad eléctrica bajo la norma IEEE STD 81-1983 y la Densidad de Campo por el método de Cono y Arena bajo la norma AASHTO T 191, ambos ensayos realizados en situ. Después toma la muestra se suelo aproximadamente 50 kg. La muestra de suelo es pasada a través del tamiz # 4 y colocada en la bandeja para su secado.</p> <p>Para el análisis granulométrico se toma una muestra de 250 gr, la misma que debe estar totalmente seca y se la coloca en la tamizadora eléctrica con el juego de tamices ordenados descendentemente como lo establece la norma AASHTO T-87-70. Los límites de Atterberg son realizados bajo las normas AASHTO T-90-70 y ASTM D-424-71 para límite líquido AASHTO T-90-70 y ASTM D-424-59-74 los ensayos requieren una muestra de suelo que pase el tamiz #40. Para la gravedad específica se toma una muestra de suelo 50gr totalmente seca se realiza el ensayo según la norma AASHTO T 100 2015 y ASTM: D854-58, el ensayo requiere una muestra de suelo que pase el tamiz #10.</p> <p>Para realizar el ensayo de Proctor Modificado se necesita una muestra de 24 kg de suelo, previamente seco y tamizado por el tamiz #4. Y se procede a realizar el ensayo según la norma AASHTO T-180 y ASTM D-1557. Una vez realizado el proctor se obtiene el contenido de humedad óptimo para poder realizar el ensayo de California Bearing Ratio (CBR), este último siguiendo la norma ASTM: D1883-73 y AASHTO:T-193-63.Los datos de ensayos de Penetración Estándar (SPT) realizados en base a la norma INEN 0689 se toman de las tesis elaboradas anteriormente las mismas que son “Estudio del peligro sísmico determinista para las estructuras de Ambato sector Huachi Chico”</p>

Autor: Jimmy Macas

2.3.1.1 Ensayos de campo

Resistividad eléctrica

A continuación se explica detalladamente el procedimiento para la medición de la resistividad del suelo in situ empleado en el desarrollo de esta tesis.

1. Retirar la capa vegetal de la zona a ensayar.



Figura 22. Limpieza de capa vegetal
Autor: Jimmy Macas

2. Ubicar los electrodos en el suelo a una misma profundidad y a una misma separación (1 metro).

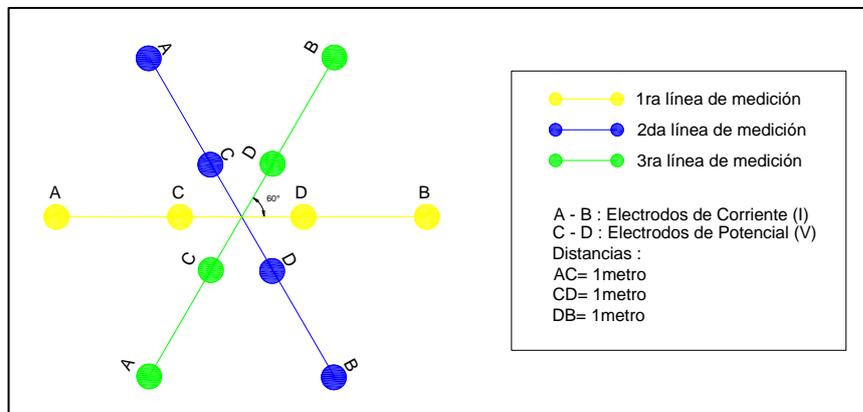


Figura 23. Ubicación de los electrodos en el suelo
Autor: Jimmy Macas



Figura 24. Penetración del electrodo en el suelo
 Autor: Jimmy Macas

3. Una vez colocados los electrodos con respectivos cables de corriente y potencial, se los conecta al telurómetro y se mide su resistividad.

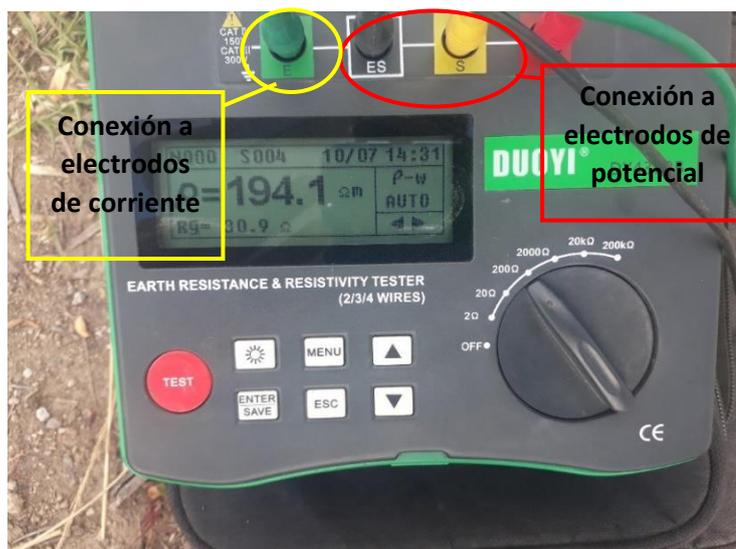


Figura 25. Empleo del telurómetro
 Autor: Jimmy Macas

4. Una vez medida la resistividad del suelo se procede a realizar el pozo a cielo abierto de sección 1m^2 aproximadamente.



Figura 26. Excavación del pozo a cielo abierto
Autor: Jimmy Macas

5. A un metro de profundidad se lleva la muestra de aproximadamente 50 kg para ensayos de laboratorio.



Figura 27. Toma de muestra de suelo
Autor: Jimmy Macas

Densidad de Campo



Figura 28. Ensayo del cono de arena de Ottawa. a) Fijar la placa base metálica; b) realizar el agujero a 10cm de profundidad. c) Colocar el cono y verter la arena.

Autor: Jimmy Macas

2.3.1.2 Ensayos de Laboratorio

Ensayo de granulometría



Figura 29. Ensayo de la granulometría.

Autor: Jimmy Macas

Ensayo de Límite líquido



Figura 30. Ensayo de límite líquido.
Autor: Jimmy Macas

Ensayo de Límite plástico



Figura 31. Ensayo de límite plástico
Autor: Jimmy Macas

Ensayo de Gravedad específica



Figura 32. Ensayo de Gravedad específica
Autor: Jimmy Macas

Ensayo de Compactación



Figura 33. Ensayo de compactación
Autor: Jimmy Macas

Ensayo de California Bearing Ratio (CBR)



Figura 34. Ensayo de CBR

Autor: Jimmy Macas

2.3.2 Plan de procesamiento y Análisis de Información

Se realizará una revisión de toda la información con la toma de muestras en situ que serán tabulados y presentados en formatos de fácil comprensión, para los resultados de los ensayos de suelos se utilizarán los formatos establecidos por el laboratorio y elaborados por el autor. Finalmente se elaborarán las correlaciones que tengan un alto coeficiente de correlación ($r^2 > 50\%$) con sus respectivas gráficas para un fácil entendimiento del lector, las correlaciones serán con dos variables y de variables múltiples, para correlaciones de dos variables se utilizará el software Excel para elaborar las gráficas y obtener el coeficiente de correlación. En cambio para correlaciones de variables múltiples bajo el criterio de mínimos cuadrados se elabora una tabla en Excel con distintos parámetros para poder elaborar un sistema de tres ecuaciones en el cual se lo resuelve mediante el método de matriz inversa obteniendo así los tres coeficientes necesarios para elaborar la ecuación de correlación. Estas ecuaciones serán del tipo lineal, logarítmica, potencial y exponencial según sea el caso que mejor se ajuste.

Regresión lineal múltiple – Modelo lineal

Tabla 19. Parámetros para resolver correlaciones múltiples por mínimos cuadrados (Lineal)

Variable depend. 1	Variable depend. 2	Variable indep.						
X ₁	X ₂	Y	X ₁ *Y	X ₂ *Y	X ₁ *X ₂	X ₁ ²	X ₂ ²	Y ²
ΣX ₁	ΣX ₂	ΣY	Σ(X ₁ *Y)	Σ(X ₂ *Y)	Σ(X ₁ *X ₂)	Σ(X ₁ ²)	Σ(X ₂ ²)	Σ(Y ²)

Autor: Jimmy Macas

El sistema de ecuaciones para resolver por mínimos cuadrados es el siguiente:

$$a * n + b_1 * \sum X_1 + b_2 * \sum X_2 = \sum Y$$

$$a * \sum X_1 + b_1 * \sum X_1^2 + b_2 * \sum X_1 * X_2 = \sum (X_1 * Y) \quad \text{Ec.(56)}$$

$$a * \sum X_2 + b_1 * \sum X_1 * X_2 + b_2 * \sum (X_2)^2 = \sum (X_2 * Y)$$

Se resuelve el sistema de ecuaciones en Excel mediante matriz inversa.

Tabla 20. Sistema de ecuaciones en Excel – Modelo lineal

a	b ₁	b ₂	=
n	ΣX ₁	ΣX ₂	ΣY
ΣX ₁	Σ(X ₁ ²)	Σ(X ₁ *X ₂)	Σ(X ₁ *Y)
ΣX ₂	Σ(X ₁ *X ₂)	Σ(X ₂ ²)	Σ(X ₂ *Y)

Autor: Jimmy Macas

De esta manera se obtiene la ecuación de correlación múltiple.

$$Y = a + b_1 * X_1 + b_2 * X_2 \quad \text{Ec.(57)}$$

Para poder aceptar que la correlación funciona se obtiene el coeficiente de determinación (r²).

$$r^2 = \frac{a \sum Y + b_1 \sum (X_1 * Y) + b_2 \sum (X_2 * Y) - n * (Y_{med})^2}{\sum (Y^2) - n * (Y_{med})^2} \quad \text{Ec.(58)}$$

Regresión lineal múltiple – Modelo logarítmico

Tabla 21. Parámetros para resolver correlaciones múltiples por mínimos cuadrados(logarítmico)

Variable inde.	Variable inde.	Variable depen.							
X ₁	X ₂	Y	X ₁ '=LOGX	X ₁ '*Y	X ₂ *Y	X ₁ '*X ₂	X ₁ ' ²	X ₂ ²	Y ²
ΣX ₁	ΣX ₂	ΣY	ΣX ₁ '	Σ(X ₁ '*Y)	Σ(X ₂ *Y)	Σ(X ₁ '*X ₂)	Σ(X ₁ ' ²)	Σ(X ₂ ²)	Σ(Y ²)

Autor: Jimmy Macas

El sistema de ecuaciones para resolver por mínimos cuadrados es el siguiente:

$$a * n + b_1 * \sum X_1' + b_2 * \sum X_2 = \sum Y$$

$$a * \sum X_1' + b_1 * \sum X_1'^2 + b_2 * \sum X_1' * X_2 = \sum (X_1' * Y) \quad \text{Ec.(59)}$$

$$a * \sum X_2 + b_1 * \sum X_1' * X_2 + b_2 * \sum (X_2)^2 = \sum (X_2 * Y)$$

Se resuelve el sistema de ecuaciones en Excel mediante matriz inversa.

Tabla 22. Sistema de ecuaciones en Excel – Modelo logarítmico

a	b ₁	b ₂	=
n	ΣX ₁ '	ΣX ₂	ΣY
ΣX ₁ '	Σ(X ₁ ' ²)	Σ(X ₁ '*X ₂)	Σ(X ₁ '*Y)
ΣX ₂	Σ(X ₁ '*X ₂)	Σ(X ₂ ²)	Σ(X ₂ *Y)

Autor: Jimmy Macas

De esta manera se obtiene la ecuación de correlación múltiple.

$$\hat{Y} = a + b_1 * \text{Log}(X_1) + b_2 * X_2 \quad \text{Ec.(60)}$$

Para poder aceptar que la correlación funciona se obtiene el coeficiente de determinación (r²).

$$r^2 = \frac{a \sum Y + b_1 \sum (X_1' * Y) + b_2 \sum (X_2 * Y) - n * (Y_{med})^2}{\sum (Y^2) - n * (Y_{med})^2} \quad \text{Ec.(61)}$$

Regresión lineal múltiple – Modelo potencial

Ecuación de la forma: $LOG(Y) = log(a1) + b1Log(X1) + b2Log(X2)$

Tabla 23. Parámetros para resolver correlaciones múltiples por mínimos cuadrados (potencial)

V. inde.	V. inde.	V. depend.									
X_1	X_2	Y	$X_1' = \text{Log}(X_1)$	$X_2' = \text{Log}(X_2)$	$Y' = \text{Log}(Y)$	$X_1' * Y'$	$X_2' * Y'$	$X_1' * X_2'$	$X_1'^2$	$X_2'^2$	Y'^2
$\sum X_1$	$\sum X_2$	$\sum Y$	$\sum X_1'$	$\sum X_2'$	$\sum Y'$	$\sum (X_1' * Y')$	$\sum (X_2' * Y')$	$\sum (X_1' * X_2')$	$\sum (X_1'^2)$	$\sum (X_2'^2)$	$\sum (Y'^2)$

Autor: Jimmy Macas

El sistema de ecuaciones para resolver por mínimos cuadrados es el siguiente:

$$a * n + b_1 * \sum X_1' + b_2 * \sum X_2' = \sum Y'$$

$$a * \sum X_1' + b_1 * \sum X_1'^2 + b_2 * \sum X_1' * X_2' = \sum (X_1' * Y') \quad \text{Ec.(62)}$$

$$a * \sum X_2' + b_1 * \sum X_1' * X_2' + b_2 * \sum (X_2')^2 = \sum (X_2' * Y')$$

Se resuelve el sistema de ecuaciones en Excel mediante matriz inversa.

Tabla 24. Sistema de ecuaciones en Excel – Modelo potencial

a	b_1	b_2	=
n	$\sum X_1'$	$\sum X_2'$	$\sum Y'$
$\sum X_1'$	$\sum (X_1'^2)$	$\sum (X_1' * X_2')$	$\sum (X_1' * Y')$
$\sum X_2'$	$\sum (X_1' * X_2')$	$\sum (X_2'^2)$	$\sum (X_2' * Y')$

Autor: Jimmy Macas

Al obtener el valor de a, b_1 y b_2 . Se cambia el valor de “a” por “ $a' = 10^a$ ” ya que se aplica el antilogaritmo para poder obtener la ecuación.

De esta manera se obtiene la ecuación de correlación múltiple.

$$\hat{Y} = a' * (X_1)^{b_1} * (X_2)^{b_2} \quad \text{Ec.(63)}$$

Para poder aceptar que la correlación funciona se obtiene el coeficiente de determinación (r^2).

$$r^2 = \frac{a' \sum Y + b_1 \sum (X_1' * Y') + b_2 \sum (X_2' * Y') - n * (Y' med)^2}{\sum (Y'^2) - n * (Y' med)^2} \quad \text{Ec.(64)}$$

Regresión lineal múltiple – Modelo exponencial

Ecuación de la forma: $LN(Y) = LN(a1) + b1 * (X1) + b2 * (X2)$

Tabla 25. Parámetros para resolver correlaciones múltiples por mínimos cuadrados (exponencial)

V. inde.	V. inde.	V. depend							
X_1	X_2	Y	$Y'=LN(Y)$	X_1*Y'	X_2*Y'	X_1*X_2	X_1^2	X_2^2	Y'^2
$\sum X_1$	$\sum X_2$	$\sum Y$	$\sum Y'$	$\sum(X_1*Y')$	$\sum(X_2*Y')$	$\sum(X_1*X_2)$	$\sum(X_1^2)$	$\sum(X_2^2)$	$\sum(Y'^2)$

Autor: Jimmy Macas

El sistema de ecuaciones para resolver por mínimos cuadrados es el siguiente:

$$a * n + b_1 * \sum X_1 + b_2 * \sum X_2 = \sum Y'$$

$$a * \sum X_1 + b_1 * \sum X_1^2 + b_2 * \sum X_1 * X_2 = \sum(X_1 * Y') \quad \text{Ec.(65)}$$

$$a * \sum X_2 + b_1 * \sum X_1 * X_2 + b_2 * \sum(X_2)^2 = \sum(X_2 * Y')$$

Se resuelve el sistema de ecuaciones en Excel mediante matriz inversa.

Tabla 26. Sistema de ecuaciones en Excel – Modelo exponencial

a	b_1	b_2	=
n	$\sum X_1$	$\sum X_2$	$\sum Y'$
$\sum X_1$	$\sum(X_1^2)$	$\sum(X_1*X_2)$	$\sum(X_1*Y')$
$\sum X_2$	$\sum(X_1*X_2)$	$\sum(X_2^2)$	$\sum(X_2*Y')$

Autor: Jimmy Macas

Al obtener el valor de a, b_1 y b_2 . Se cambia el valor de “a” por “ $a' = e^a$ ” ya que se aplica el antilogaritmo neperiano para poder obtener la ecuación.

De esta manera se obtiene la ecuación de correlación múltiple.

$$\hat{Y} = a' * (e)^{b1*X1} * (e)^{b2*X2} \quad \text{Ec.(66)}$$

Para poder aceptar que la correlación funciona se obtiene el coeficiente de determinación (r^2).

$$r^2 = \frac{a' \sum Y + b_1 \sum(X_1 * Y') + b_2 \sum(X_2 * Y') - n * (Y' med)^2}{\sum(Y'^2) - n * (Y' med)^2} \quad \text{Ec.(67)}$$

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis y discusión de los resultados

Los ensayos de campo y laboratorio se realizaron sobre muestras de suelo recogidas en las zonas indicadas (Anexo1), con el objetivo de determinar varias correlaciones entre la resistividad eléctrica y las algunas propiedades físicas y mecánicas. El propósito de este capítulo es presentar los resultados obtenidos en los diferentes ensayos, posteriormente se presenta de manera detallada y conjunta de todos los datos obtenidos.

3.1.1 Clasificación de los suelos

En esta tesis, se realizó el ensayo de tamizado para determinar la granulometría de los suelos, así como los límites de Atterberg que son procedimientos necesarios para la clasificación de los suelos. Las 10 muestras de suelos utilizadas en este estudio pasaron el tamiz N°4 dando a entender que existe presencia nula de gravas. La distribución granulométrica de los suelos de grano grueso (arenas) se obtuvo a través del ensayo mecánico por tamizado. De las curvas granulométricas se obtuvieron los porcentajes de arena, y finos (limo y arcilla) de cada uno de los suelos. Según la figura 35 y la tabla 28 se puede observar que todas las muestras de suelo presentan gran cantidad de partículas gruesas (Arenas) que varían de 67% a 99% y poca presencia de partículas finas (Limos y arcillas) que varían de 33% a 1%. Las correlaciones que se determinen posteriormente solo serán aptas a utilizar si las muestras de suelo entran en el rango granulométrico que se aprecia en la figura 35.

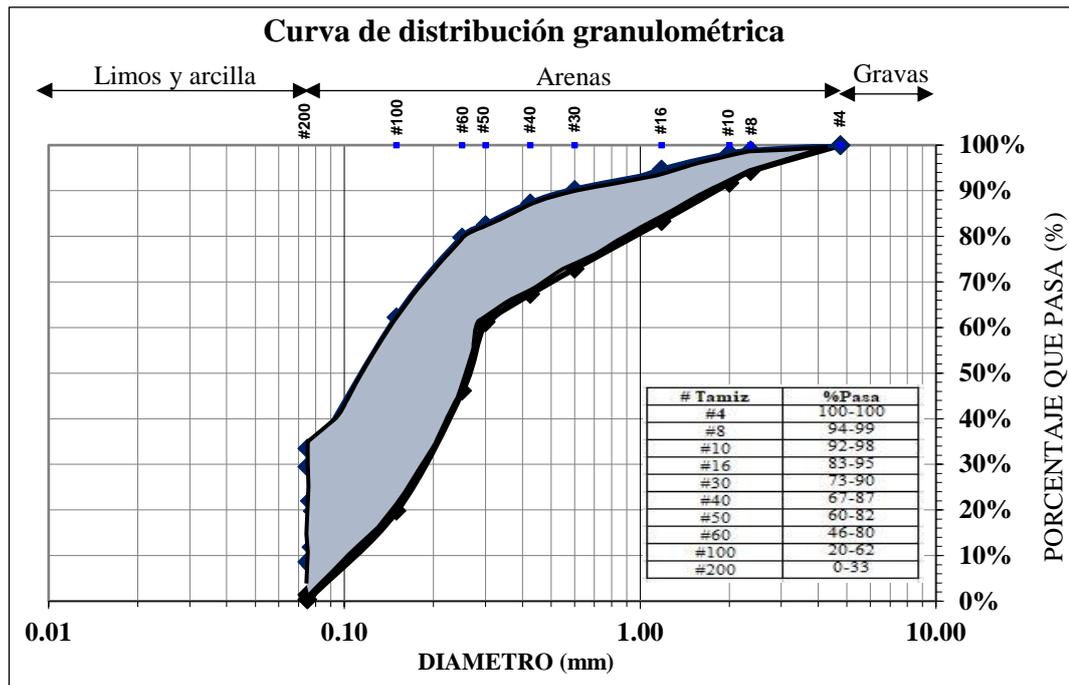


Figura 35. Rango granulométrico de las muestras de suelos E1-E10
 Autor: Jimmy Macas

Para poder determinar la clasificación de los suelos también es necesario determinar los límites de Atterberg (límites líquido y plástico) para identificar el tipo de suelo y su naturaleza cohesiva. Los valores de LL% varían de 19.96% hasta 32.26%. Mientras tanto los valores de IP% variaron entre NP (No plásticos) hasta 11.95% según se observa en la tabla 28. Y las 10 muestras de suelos determinaron un rango de Índice de liquidez de -41% hasta -0.04% por lo cual el suelo se encuentra en un estado sólido semiplástico o sólido, contrastando con la realidad ya que la mayoría de las muestras corresponden al suelo tipo “cangagua”.

Los suelos con un contenido de finos entre 5% y 12 % o mayor al 12% fueron directamente clasificados por medio de la carta de plasticidad (SUCS y AASHTO) conociendo el límite líquido (LL) y el índice plástico (IP). Según los resultados obtenidos los suelos se ubicaron la mayoría sobre la línea A y unos pocos bajos de esta, así mismo todos los suelos se encuentran ubicados a la izquierda de la línea B como lo muestra la figura 35. Varios factores como la forma y el tamaño de las partículas del suelo pueden influir en el resultado de los Límites de Consistencia. Las correlaciones que se determinen posteriormente solo serán aptas a utilizar si las

muestras de suelo entran en el rango de la carta de plasticidad como se aprecia en la figura 36.

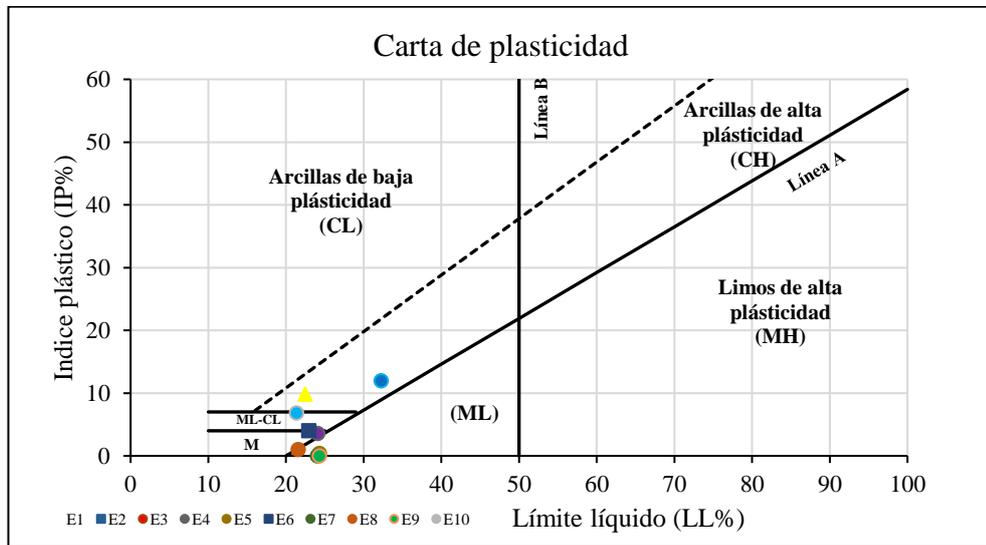


Figura 36. Localización de los puntos en la carta de plasticidad
 Autor: Jimmy Macas

Los resultados de los ensayos granulométricos y límites de Atterberg fueron necesarios para clasificar el tipo de suelo de cada zona. De acuerdo a la SUCS los suelos E1-E2-E3 se clasificaron como Arenas con arcillas de baja plasticidad (SC) y de acuerdo a la AASHTO se encuentran en el grupo (A-2-4 y A-2-6(1)) siendo Arenas arcillosas; los suelos E4-E8 se clasificaron como Arenas con limos de baja plasticidad (SM) y de acuerdo a la AASHTO se encuentran en el grupo (A-2-4) siendo Arenas limosas; los suelos E5-E6-E10 se clasificaron como Arenas pobremente graduadas con limos de baja plasticidad (SP-SM) y de acuerdo a la AASHTO se encuentran en el grupo (A-2-4) siendo Arenas limosas y los suelos E7-E9 se clasificaron como arenas pobremente graduadas (SP) y de acuerdo a la AASHTO se encuentran en el grupo (A-3) siendo Arenas finas.

3.1.2 Determinación de propiedades físicas de los suelos

Mediante relaciones gravimétricas se determinó el contenido de humedad ($\omega\%$), peso específico (γ_h) y peso específico seco (γ_d) de las diez muestras de suelo utilizados en esta investigación. Para determinar el contenido de humedad ($\omega\%$) el procedimiento se basó en la norma ASTM S2216-71 dando como resultados valores desde 5.38% y

19.24%, todas las muestras se tomaron en días soleados y fueron llevadas inmediatamente al laboratorio para que no exista pérdida de humedad natural.

El peso específico húmedo (γ_h) y peso específico seco (γ_d) de las muestras se determinaron mediante el ensayo del cono de arena de OTTAWA dando como resultados valores de (γ_h) desde 1.445 gr/cm³ hasta 1.945 gr/cm³ y de (γ_d) desde 1.287 gr/cm³ hasta 1.846 gr/cm³ respectivamente. Siendo los suelos tipo arenas arcillosas y limosas (SC y SM) las de menor peso específico tanto húmedo como seco y los suelos tipo arenas finas (SP) las de mayor peso específico húmedo y seco.

El peso específico de cada uno de los suelos difiere significativamente debido a sus propias características físicas (contenido de humedad, porosidad, relación de vacíos, grado de saturación, granulometría, etc.). Los valores de relación de vacíos van desde 0.44 hasta 1.06 que son valores relativamente cercanos a cero dando a entender que el suelo in situ está bien compactado. Los valores de porosidad van desde 30.32% hasta 51.48% respectivamente con los valores de relación de vacíos. Se puede observar que la mayor relación de vacíos corresponde a la muestra E2 la misma que presenta el menor peso específico del grupo de 10 muestras y la menor relación de vacíos corresponde a la muestra E7 la misma que presenta el mayor peso específico del grupo de 10 muestras. La variación de la relación de vacíos y porosidad es evidente. Estos resultados pueden indicar que los suelos han experimentado diferentes grados de compactación, la cual puede ser observada y verificada a través de los resultados de los pesos específicos.

Para determinar la gravedad específica de los sólidos de las diez muestras de suelo, se utilizó el método del picnómetro bajo la norma ASTM D 854. El rango de valores para gravedad específica dio desde 2.603 hasta 2.699. Los valores se encuentran en los anexos correspondientes a Arena y Arenas limosas (2.60 – 2.90).

Para determinar el peso específico seco máximo y el contenido de humedad óptima de las diez muestras de suelos propuestos en esta investigación, se utilizó un ensayo de compactación dinámico correspondiente al Proctor Modificado tipo “C” bajo la norma ASTM D 1557 -AASHTO T-180 y una energía de compactación constante de 55986 Lb/ft³. El rango de peso específico seco máximo varía desde $\gamma_{dmax} = 1.617$ gr/cm³ hasta $\gamma_{dmax} = 1.789$ gr/cm³ con un contenido de humedad óptimo desde $w_{opt}\% = 17,30\%$

hasta $w_{opt} \% = 13.15\%$ respectivamente. El mayor peso específico lo tiene la muestra E8 que corresponde a un suelo SM (Arena con limos de baja plasticidad) y el menor peso específico lo tiene la muestra E5 que corresponde a un suelo SP-ML (Arena pobremente graduada con limos de baja plasticidad). Igualmente los grados de compactación en estado natural varían de 75% a 100%.

Para determinar los CBR de las 10 muestras de suelos, todos los valores CBR mayores fueron tomados para el 95% de la densidad seca máxima los mismos que varían de 15.70% a 61.5%. Los resultados de todos los ensayos para las 10 muestras de suelos se los muestra en la tabla 28. Los valores de ensayos SPT se tomaron de dos tesis anteriores realizadas en la misma zona a un metro de profundidad, los valores se detallan en la tabla 27

Tabla 27. Valores de SPT muestras E1-E10

N°	Zona	SPT (N°golpes)	Velocidad media de onda cortante V_{S30}
1	E1	47	397.969
2	E2	46	391.011
3	E3	41	406.891
4	E4	39	371.159
5	E5	22	280.68
6	E6	17	236.875
7	E7	42	332.5
8	E8	54	375.625
9	E9	72	443.125
10	E10	45	341.875

Fuente: Estudio del peligro sísmico determinista para las estructuras de Ambato sector Huachi Chico

Autor(a): Ing. Joaquín Vega – Ing. Lenin Benavides

3.1.3 Resistividad eléctrica medida en campo

Entre los resultados obtenidos en esta investigación experimental se relacionó la resistividad eléctrica (ρ) con el contenido de humedad (w) y peso específico (γ). Los valores de la resistividad eléctrica fueron determinadas mediante la medición de la diferencia de potencial eléctrico como consecuencia de la propagación de corriente directa a través del subsuelo.

En el campo, las mediciones de resistividad eléctrica (ρ) de los suelos investigados, se efectuó un promedio de 3 mediciones. Las dimensiones y procedimiento utilizado en campo fueron el mismo que se explicó en la *sección 2.3.1.1*. En la tabla 28 se muestra los resultados de las mediciones de resistividad medidas en campo y el contenido de humedad. En la misma se puede observar que para un contenido de humedad elevado la resistividad eléctrica disminuye, en cambio para un contenido de humedad bajo la resistividad aumenta considerablemente, lo mismo se puede observar en la figura 37.

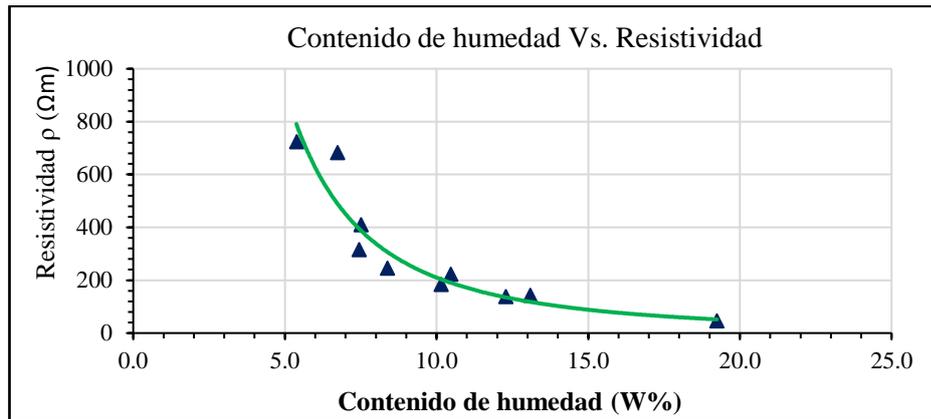


Figura 37. Contenido de humedad vs. Resistividad eléctrica

Autor: Jimmy Macas

Los resultados obtenidos confirmaron que el contenido de agua juega un papel importante sobre la resistividad eléctrica de los suelos ensayados, donde además otras propiedades geotécnicas se citan como influyentes (tamaño de las partículas, límites de Atterberg). Se comparó los resultados de resistividad eléctrica y el tamaño de las partículas de suelo. Excluyendo a la muestra E7 que tiene la mayor resistividad eléctrica debido a que tiene el más bajo contenido de humedad aún siendo un suelo (SP – arena pobremente graduada). Lo cual concuerda con la teoría de Abidin, *et al.* (2013), expresando que una porción cuantitativa de agua y partículas de distintos tamaños puede influir sobre los resultados de resistividad del suelo. Abidin, *et al.* (2012) manifestaron que los suelos con un alto contenido de finos (limos y arcillas) exhiben bajos valores de resistividad mientras que los suelos con gran cantidad de partículas gruesas (arenas y gravas) exhiben mayor resistividad eléctrica. Sin embargo las demás muestras de suelo no concuerdan con esta teoría ya que los suelos (E1-E3-E4-E8) poseen una considerable cantidad de partículas finas (22% - 33%) y una

resistividad elevada y los suelos (E2-E6-E9) con poca cantidad de finos (1%-12%) poseen una baja resistividad eléctrica.

Para las muestras de suelo con resistividad baja (E9-E2-E6) (46.23 Ω m; 138.13 Ω m; 143 Ω m) respectivamente tienen valores variados de los límites de Atterberg, y para las muestras de suelos restantes con resistividad alta corresponden límites de Atterberg bajos y altos. Los límites de Atterberg están estrictamente gobernados por el contenido de finos en el suelo, reflejando la mineralogía de las arcillas y las porciones de arcilla, limo y contenido orgánico.

El comportamiento de todas las muestras de suelo hace suponer que fue influenciado por otras propiedades físicas (composición mineralógica y/o forma de las partículas) por su variado rango de datos de Límites de Atterberg con respecto a la resistividad. Por lo tanto, algunos de nuestros resultados no concuerdan con estudios anteriores los cuales concluyeron que a mayor Límite Líquido menor resistividad eléctrica del suelo Abu-Hassanein *et al.* (1996). Se detallará mejor los resultados al momento de realizar las correlaciones respectivas y al encontrar la ecuación que mejor se ajuste la tendencia de estos resultados.

Se recomienda realizar una mayor cantidad de mediciones en campo para confirmar los resultados obtenidos en cada una de las muestras de suelos, para tener valores más exactos y poder elaborar mejor las correlaciones, a su vez entender de mejor manera cuales son los aspectos más puntuales que influyen en la resistividad (la porosidad, el grado de saturación, la concentración de sal en el fluido de poro, el tamaño de grano y la temperatura) .

Nomenclatura

Wnat	= Contenido de humedad natural	(%)
D ₁₀	= Diámetro efectivo	(mm)
D ₃₀	= Diámetro equiparable	(mm)
D ₆₀	= Diámetro dimensional	(mm)
Cc	= Coeficiente de curvatura	
Cu	= Coeficiente de uniformidad	

G	= Grava	(%)
S	= Arena	(%)
M-C	= Limos y Arcillas	(%)
LL	= Límite líquido	(%)
LP	= Límite plástico	(%)
IP	= Índice plástico	(%)
IL	= Índice de liquidez	(%)
G _s	= Gravedad específica	
e	= Relación de vacíos	
n	= Porosidad	(%)
G _a	= Grado de saturación de aire	(%)
G _w	= Grado de saturación de agua	(%)
$\gamma_{h \text{ in-situ}}$	= Densidad húmeda in-situ	(kg/m ³)
$\gamma_{d \text{ in-situ}}$	= Densidad seca in-situ	(kg/m ³)
$\gamma_{d \text{ máx}}$	= Densidad seca máxima	(kg/m ³)
W _{ópt}	= Humedad óptima	(%)
G _c	= Grado de compactación	(%)
CBR _{0.1"}	= CBR para 0.1 pulgadas de penetración	(%)
CBR _{MAYOR}	= CBR mayor entre 0.1 y 0.2 pulgadas de penetración	(%)
SPT	= Ensayo de penetración estándar	(N° golpes)
V _{S30}	= Velocidad media de la onda de corte	(m/seg)
N°200	= Pasa el tamiz N° 200	(%)
ρ	= Resistividad eléctrica	(Ω /m)

Para la obtención de valores con las ecuaciones y gráficas de correlaciones se deberá utilizar las unidades descritas en esta sección.

Los valores para CBR mayor se referirá para el 95% de la densidad seca máxima.

Los valores para SPT(Nº golpes) se tomarán de tesis anteriores hechas en la ciudad de Ambato, en las mismas zonas donde se realizó el ensayo de resistividad eléctrica.

Tabla 28. Propiedades de las muestras de suelo (E1-E10)

N°	Zona	W _{nat} (%)	Granulometría								LL (%)	LP (%)	IP (%)	IL (%)	Gs	e	n(%)	Ga (%)	Gw (%)
			D10	D30	D60	Cc	Cu	G(%) Grava	S(%) Arena	M-C(%) Limos y arcillas									
1	E1	10.47	0.034	0.067	0.190	5.59	0.69	0.00	67.00	33.00	19.96	11.17	8.79	-0.080	2.699	0.58	36.85	51.74	48.26
2	E2	12.28	0.065	0.090	0.170	2.62	0.73	0.00	80.00	20.00	22.50	12.68	9.82	-0.041	2.650	1.06	51.48	69.01	30.99
3	E3	8.38	0.053	0.095	0.230	4.34	0.74	0.00	78.00	22.00	32.26	20.31	11.95	-0.998	2.685	0.56	35.98	60.06	39.94
4	E4	6.73	0.048	0.075	0.170	3.54	0.69	0.00	71.00	29.00	24.10	20.53	3.57	-3.866	2.685	0.93	48.08	80.87	19.13
5	E5	7.44	0.071	0.140	0.300	4.23	0.92	0.00	88.00	12.00	24.29	23.89	0.40	-41.125	2.655	0.75	42.81	73.44	26.56
6	E6	13.08	0.079	0.130	0.250	3.16	0.86	0.00	82.00	8.00	22.94	18.89	4.05	-1.435	2.650	0.78	43.73	51.42	48.58
7	E7	5.38	0.110	0.190	0.300	2.73	1.09	0.00	99.00	1.00	24.06	25.56	NP	NP	2.607	0.44	30.32	67.44	32.56
8	E8	10.15	0.047	0.075	0.150	3.19	0.80	0.00	71.00	29.00	21.56	20.53	1.03	-10.078	2.692	0.72	41.99	60.69	39.31
9	E9	19.24	0.100	0.170	0.280	2.80	1.03	0.00	99.00	1.00	24.30	24.57	NP	NP	2.603	0.83	45.32	38.76	61.24
10	E10	7.51	0.077	0.130	0.210	2.73	1.05	0.00	91.00	9.00	21.38	14.60	6.78	-1.046	2.639	0.95	48.74	79.21	20.79

N°	Zona	Clasificación		Densidad de Campo				Compactación				CBR (%)			Ensayo de penetración estándar		Resistividad
		SUCS	AASHTO	γ _h in-situ (gr/cm ³)	γ _h in-situ (Kg/m ³)	γ _d in-situ (gr/cm ³)	γ _d in-situ (Kg/m ³)	γ _d máx (gr/cm ³)	γ _d máx (Kg/m ³)	W _{ópt} (%)	G _c (%)	95% γ _d máx		Mayor	SPT (N° golpes)	Velocidad media de onda cortante V _{S30}	ρ (Ωm)
												0.1"	0.2"				
1	E1	SC	A-2-4(0)	1.851	1851	1.676	1676	1.674	1674	14.80	100	16.90	21.10	21.10	47	397.969	221.97
2	E2	SC	A-2-4(0)	1.445	1445	1.287	1287	1.713	1713	13.40	75	18.50	21.30	21.30	46	391.011	138.13
3	E3	SC	A-2-6(1)	1.840	1840	1.698	1698	1.714	1714	14.00	99	11.80	15.70	15.70	41	406.891	245.83
4	E4	SM	A-2-4(0)	1.468	1468	1.375	1375	1.643	1643	16.80	84	17.00	19.20	19.20	39	371.159	682.70
5	E5	SP-SM	A-2-4(0)	1.629	1629	1.516	1516	1.617	1617	17.30	94	45.00	50.00	50.00	22	280.68	315.80
6	E6	SP-SM	A-2-4(0)	1.704	1704	1.507	1507	1.654	1654	14.60	91	17.60	21.60	21.60	17	236.875	143.00
7	E7	SP	A-3(0)	1.945	1945	1.846	1846	1.732	1732	15.10	107	27.10	36.40	36.40	42	332.5	723.24
8	E8	SM	A-2-4(0)	1.702	1702	1.545	1545	1.789	1789	13.15	86	17.20	22.00	22.00	54	375.625	183.60
9	E9	SP	A-3(0)	1.727	1727	1.448	1448	1.654	1654	13.40	88	23.00	30.20	30.20	72	443.125	46.23
10	E10	SP-SM	A-2-4(0)	1.460	1460	1.358	1358	1.717	1717	14.80	79	54.00	61.50	61.50	45	341.875	410.00

Autor: Jimmy Macas

3.1.4 Correlaciones

Se elaboraron 30 correlaciones tomando las más representativas y útiles de todas las propiedades índice y mecánicas. Se califican las mismas según su coeficiente de correlación r^2 siendo:

$50\% < r^2 < 70\%$; Regular a Bueno

$70\% < r^2 < 80\%$; Muy Bueno

$80\% < r^2 < 100\%$; Aceptable - Excelente

Para lograr el propósito de conseguir una buena correlación $<50\%$ se eliminaron un par de muestras de suelos según el caso más conveniente. El suprimir estas muestras se debe a que estos puntos generan un valor de residuos cuadrados elevado respecto a la línea de tendencia ocasionando una baja correlación.

El manejo de cada una de las gráficas y sus ecuaciones se debe tomar con el debido criterio los resultados ya que las muestras de suelos se encuentran limitadas a ciertas propiedades y a ciertos rangos de trabajo. Por lo mismo un valor de coeficiente de determinación bajo puede dar resultados alejados de la realidad. coeficiente de determinación.

Tabla 29. Ecuaciones de correlación entre 2 y 3 variables.

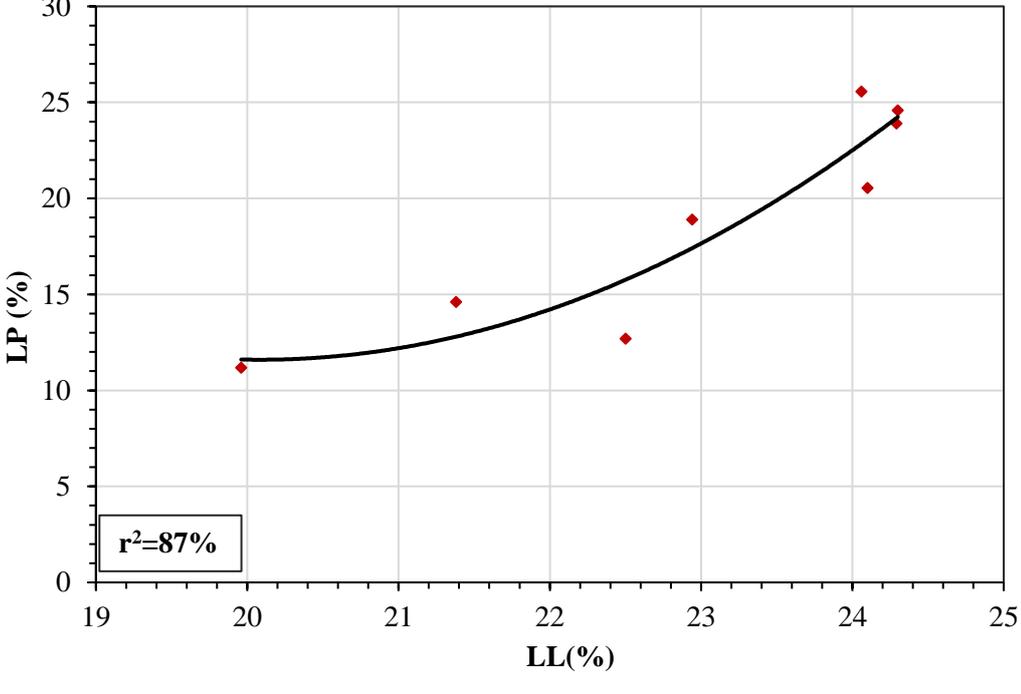
Nº	Ecuación	Coefficiente de determinación (r ²)	Nº muestras
CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE			
1	$LP = 0.71(LL)^2 - 28.50(LL) + 297.70$	87	8
2	$\gamma_{d \text{ máx}} = \frac{3609.062}{W_{opt}^{0.2818}}$	75	8
3	$\gamma_{d \text{ máx}} = 2781.36 - 63.89(LL) + 18.13(LP)$	70	8
4	$G_s = 0.00267(N^\circ 200) + 2.6129$	90	10
5	$G_s = 2.477 + 0.055 \text{Log}(N^\circ 200) + 0.00008(\gamma_{d \text{ in-situ}})$	97	10
6	$\gamma_{d \text{ máx}} = 1314.73 - 30.589(W_{opt}) + 310.87(G_s)$	74	8
CORRELACIONES RESISTIVIDAD ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE			
7	$W_{nat} = \frac{107.047}{\rho^{0.444}}$	95	10
8	$LL = 18.55 - 0.193 \text{Log}(\rho) + 0.256(LP)$	81	8
9	$G_s = 2.614 - 3.23 \times 10^{-6}(\rho) + 0.0026(N^\circ 200)$	90	10
10	$\gamma_{d \text{ in-situ}} = 1461.58 + 0.571(\rho) - 3.712(W_{nat})$	58	8
11	$G_a = 14.244(\rho)^{0.273}$	76	9
12	$G_w = 0.0002(\rho)^2 - 0.1887(\rho) + 72.077$	87	9
13	$W_{opt} = -11.658 + 8.52 \text{Log}(\rho) + 0.577(W_{nat})$	86	9
14	$W_{opt} = 13.128 + 0.0054(\rho) - 0.0081(N^\circ 200)$	78	8
15	$W_{opt} = -15.81 + 0.0035(\rho) + 11.04(G_s)$	79	8
16	$\gamma_{d \text{ máx}} = \frac{4249.90(\rho)^{0.034}}{(W_{opt})^{0.4128}}$	90	10
17	$G_a = \frac{35.717(\rho)^{0.1713}}{(W_{nat})^{0.1853}}$	81	9
18	$D_{10} = 1.23 \times 10^{-6}(\rho)^2 - 0.0006(\rho) + 0.1269$	72	8

19	$SPT = 0.00027(\rho)^2 - 0.25(\rho) + 83.47$	82	8
20	$V_{s30} = -33.76 \ln(\rho) + 568.257$	73	8
21	$SPT = \frac{578.37 * (e)^{0.0005(\rho)}}{(e)^{0.19(W_{opt})}}$	78	8
22	$G_c = 28.92 + 11.317 \log(\rho) + 1.723(LP)$	79	8
23	$W_{opt} = 13.586 + 2.408 \log(\rho) - 0.111(SPT)$	85	8
24	$CBR_{MAYOR} = -0.0004(\rho)^2 + 0.345(\rho) - 24.05$	66	8
25*	$G_c = -0.015(\rho) + 94.324$	16	8
CORRELACIONES CBR vs. PROPIEDADES ÍNDICE			
25	$CBR_{MAYOR} = 193.25 - 0.067(\gamma_d \text{ in-situ}) - 6.13(W_{nat})$	77	8
26	$CBR_{MAYOR} = \frac{16.40(e)^{0.235(W_{opt})}}{(e)^{0.0019(\gamma_d \text{ in-situ})}}$	66	8
27	$CBR_{MAYOR} = \frac{2.722(W_{opt})^{0.8826}}{(IP)^{0.2021}}$	72	8
28	$CBR_{MAYOR} = \frac{209.04}{(e)^{(0.058LL)}(e)^{(0.0337N^{\circ}200)}}$	74	8
29	$CBR_{MAYOR} = \frac{53.4856}{(IP)^{0.2313}(LL)^{0.1781}}$	67	8
30	$CBR_{MAYOR} = 17 + 0.176(IP) - 0.779(IL)$	94	8

Autor: Jimmy Macas

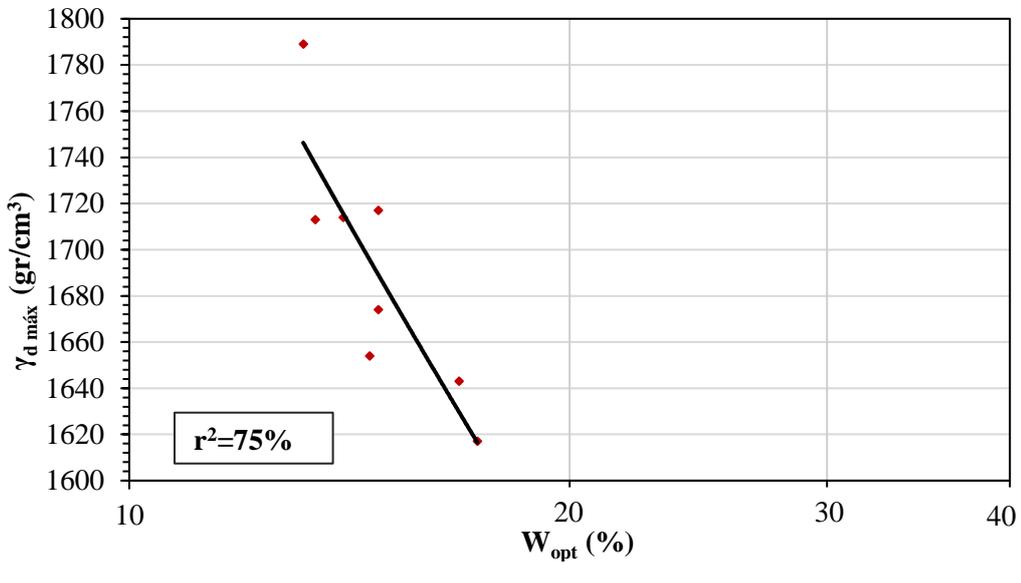
*Nota: *Correlaciones adicionales en base a la teoría.*

Tabla 30. Correlación límite plástico vs. Límite líquido

Correlación N° 1	Límite Plástico vs. Límite Líquido	
		
Ecuación	$LP = 0.71(LL)^2 - 28.50(LL) + 297.70$	
Coefficiente de determinación (r²)	87%	
<p>Interpretación:</p> <p>El comportamiento de este par de parámetros demostró una correlación polinomial. Se trabajó con 8 de las 10 muestras de suelos para lograr una buena correlación (muestras E3-E8 descartadas). Finalmente, se observa que, si los valores del límite líquido aumentan, los valores para límite plástico también aumentan en el rango de LL (20.0% - 24.4%). Se entiende entonces que un suelo que necesite mayor % de humedad para pasar de un estado plástico a condición semilíquido también va a necesitar mayor humedad para pasar de un estado semisólido a un estado plástico.</p>		

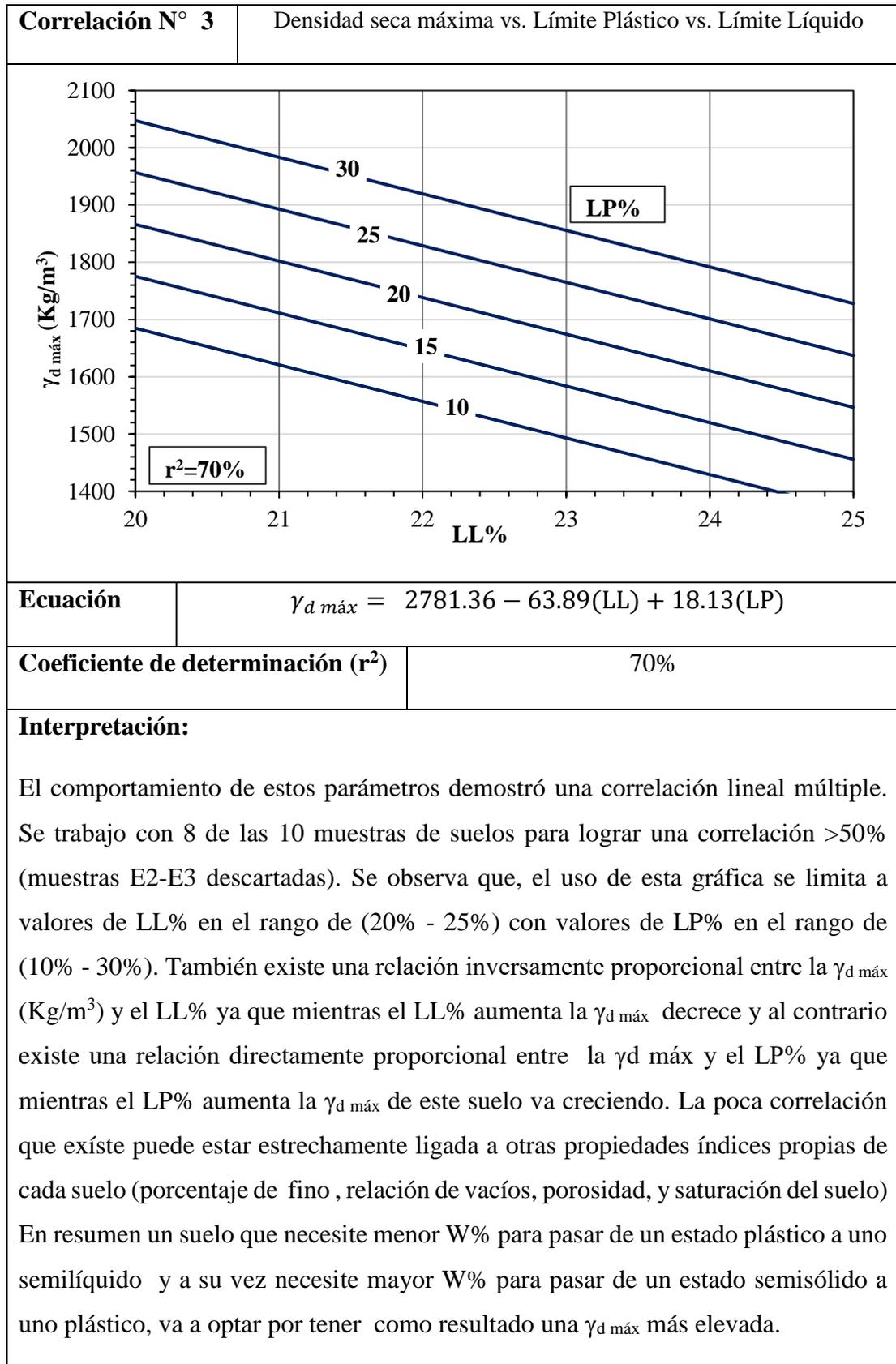
Autor: Jimmy Macas

Tabla 31. Densidad seca máxima vs. Humedad óptima

Correlación N° 2	Densidad seca máxima vs. Humedad óptima
	
Ecuación	$\gamma_{d \text{ máx}} = \frac{3609.062}{W_{opt}^{0.2818}}$
Coefficiente de determinación (r²)	75%
<p>Interpretación:</p> <p>El comportamiento de este par de parámetros demostró una correlación lineal simple de modelo potencial. Se trabajó con 8 de las 10 muestras de suelos para lograr una correlación >50% (muestras E7-E9 descartadas). Se observa que, existe una relación inversamente proporcional de W_{opt}% con la γ_{d máx} (kg/m³) ya que si los valores de humedad óptima aumentan a partir de W_{opt}=13.15% , los valores para densidad seca máxima disminuyen considerablemente hasta el punto de pasar desde 1750 kg/m³ en 13.15% hasta 1620kg/m³ en 17.30% .La poca correlación que existe puede estar estrechamente ligada a su clasificación granulométrica debido a que las dos muestras descartadas fueron las únicas muestras del tipo (SP-Arena pobremente graduada). En resumen, una muestra de suelo que necesite mayor humedad para llegar a su estado óptimo va a tener como resultado una densidad seca máxima mucho menor.</p>	

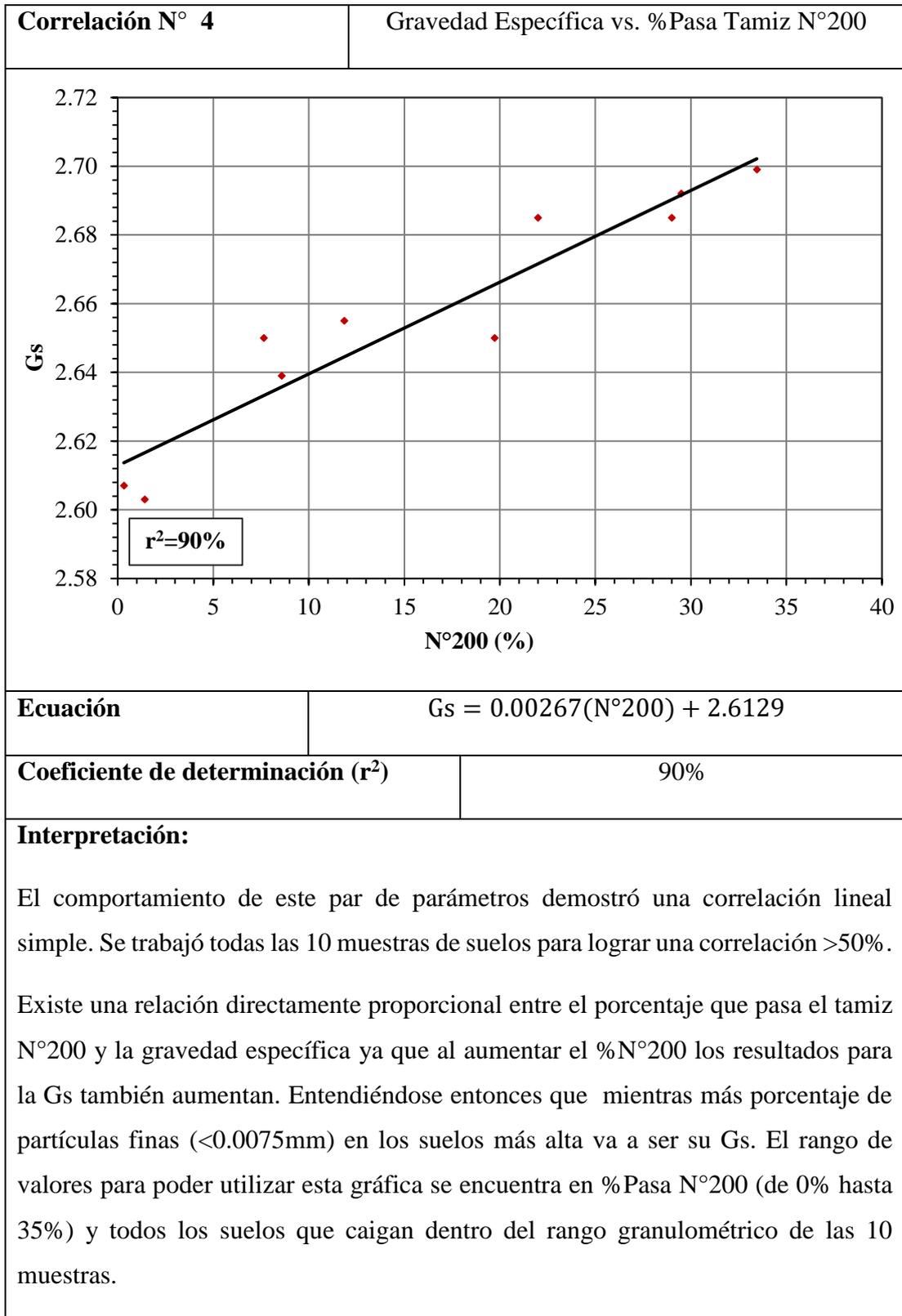
Autor: Jimmy Macas

Tabla 32. Densidad seca máxima vs. Límite Plástico vs. Límite Líquido



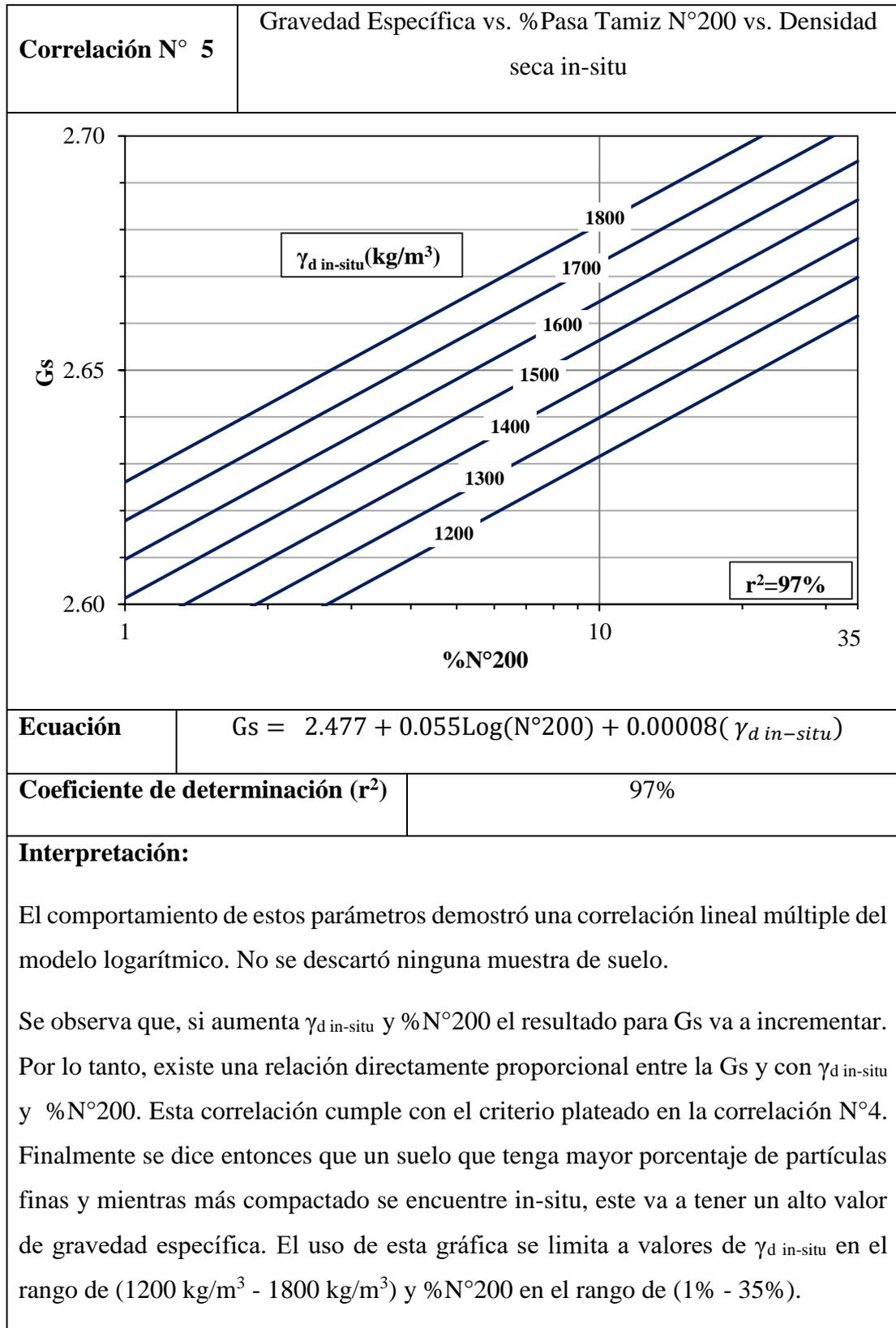
Autor: Jimmy Macas

Tabla 33. Gravedad Específica vs. %Pasa Tamiz N°200



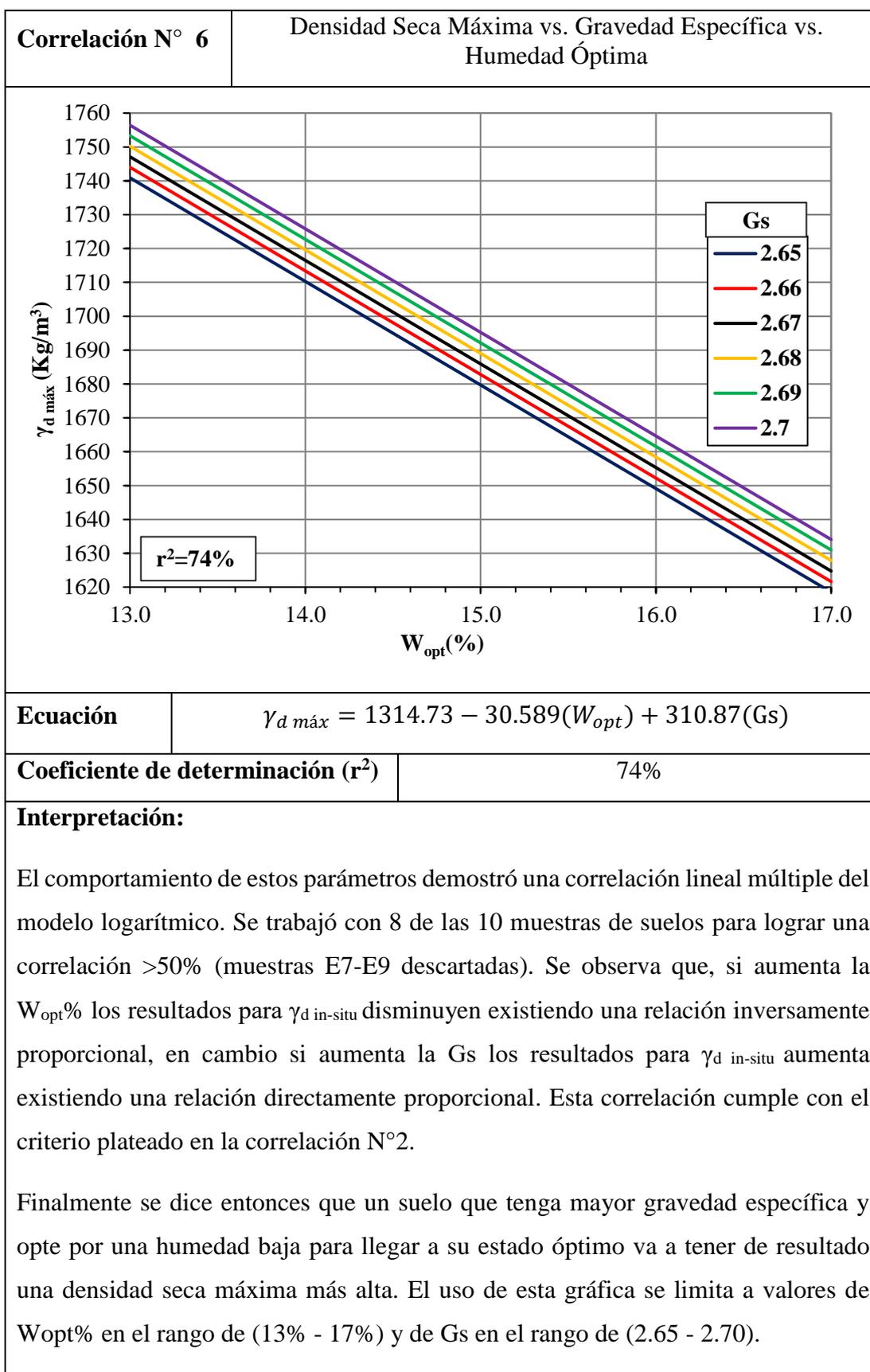
Autor: Jimmy Macas

Tabla 34. Gravedad Específica vs. %Pasa Tamiz N°200 vs. Densidad seca in-situ



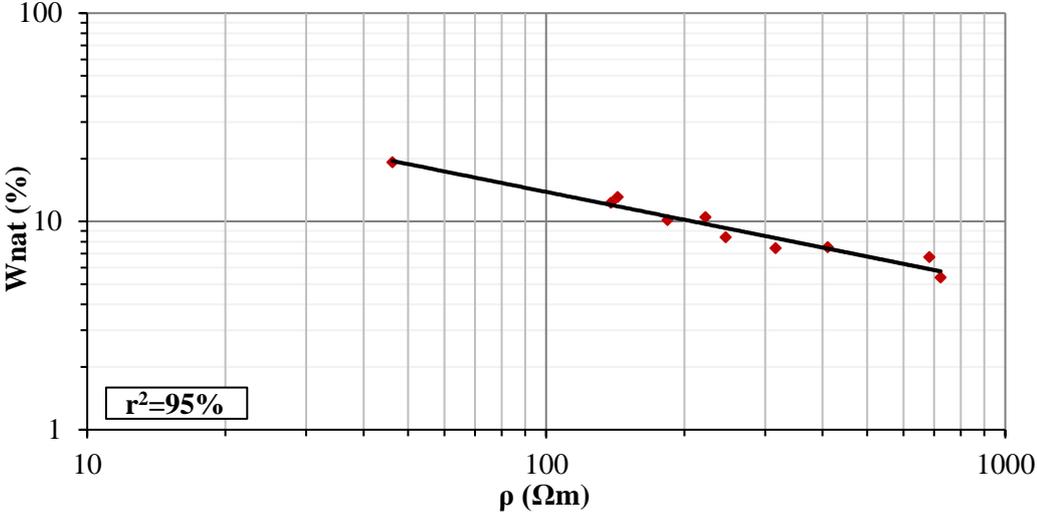
Autor: Jimmy Macas

Tabla 35. Densidad Seca Máxima vs. Gravedad Específica vs. Humedad Óptima



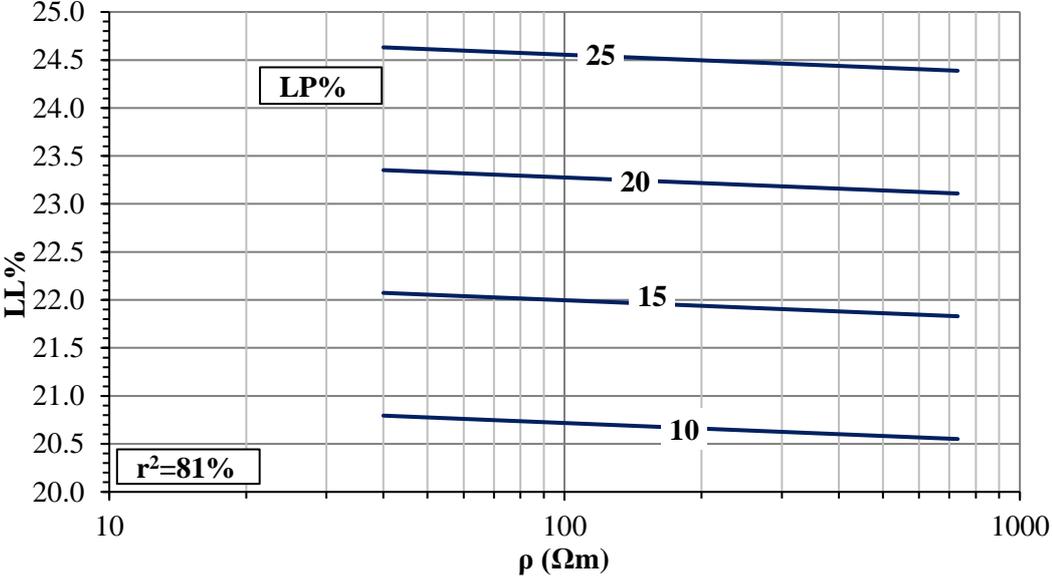
Autor: Jimmy Macas

Tabla 36. Humedad Natural vs. Resistividad Eléctrica

Correlación N° 7	Humedad Natural vs. Resistividad Eléctrica	
		
Ecuación	$W_{nat} = \frac{107.047}{\rho^{0.444}}$	
Coefficiente de determinación (r²)	95%	
<p>Interpretación:</p> <p>El comportamiento de este par de parámetros demostró una correlación lineal simple de modelo potencial. No se descartó ninguna muestra de suelo. Las mediciones de resistividad de los puntos E7-E9 difieren totalmente la una de la otra E7= 723.24 Ωm y E9= 46.23 Ωm aun siendo del tipo SP, la principal causa de este efecto es el W_{nat}% de estas ya que E7= 5.38% y E9= 19.24% por lo tanto se observa que el incremento del W% sobre el suelo influye de manera directa sobre los valores de ρ(Ωm). También existen otras propiedades que influencia en la medición de resistividad como son la relación de vacíos y fisuras observadas in situ. McCarter,(1984) mediante ensayos de laboratorio investigó la respuesta de la ρ(Ωm) a diferentes W_{nat}% en varias muestras de arcillas. Observó que la ρ(Ωm) disminuye bruscamente con el incremento de W%, concluyendo que la ρ(Ωm) está en función del W_{nat}% y grado de saturación. Según la gráfica existe una relación inversamente proporcional entre ρ (Ωm) y W_{nat}% ya que mientras mayor sea ρ (Ωm) el contenido de W_{nat}% va a ser menor. Entendiéndose entonces que mientras más alta sea la medición de resistividad, el suelo in- situ va a estar más seco.</p>		

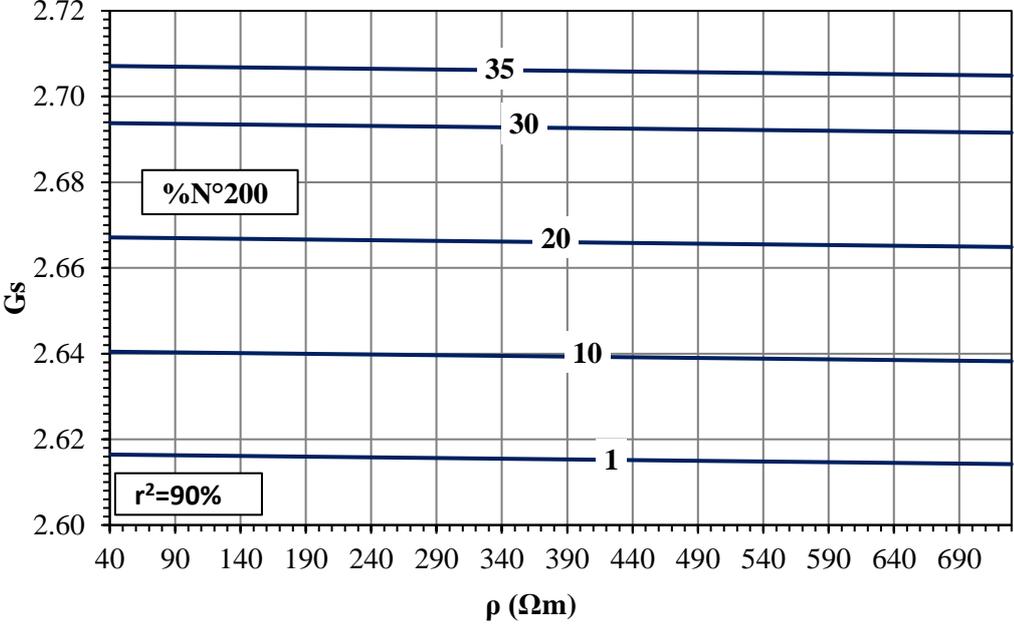
Autor: Jimmy Macas

Tabla 37. Límite Líquido vs. Límite Plástico vs. Resistividad Eléctrica

Correlación N° 8	Límite Líquido vs. Límite Plástico vs. Resistividad Eléctrica	
 <p>El gráfico muestra cuatro líneas de tendencia descendentes que relacionan el Límite Líquido (LL%) con la Resistividad Eléctrica (ρ) para diferentes niveles del Límite Plástico (LP%). Las líneas corresponden a LP% = 10, 15, 20 y 25. El coeficiente de determinación es r² = 81%.</p>		
Ecuación	LL = 18.55 - 0.193Log(ρ) + 0.256(LP)	
Coefficiente de determinación (r²)	81%	
<p>Interpretación:</p> <p>El comportamiento de estos parámetros demostró una correlación lineal múltiple de modelo logarítmica. Se trabajó con las 8 de las 10 muestras de suelos (muestras E3-E8 descartadas) para lograr una correlación >50%. Se observa que, si aumenta la ρ(Ωm) el resultado para LL% va a disminuir. Y si aumenta el LP% el resultado para LL% va a aumentar, es decir que existe una relación inversamente proporcional entre la ρ(Ωm) y el LL%. Y una relación directamente proporcional entre el LL% y el LP%. Mientras menor sea el valor de ρ(Ωm) y mayor el valor de LP% más elevado será el resultado para LL% del suelo. Se entiende entonces que un suelo que necesite mayor W% para pasar de un estado semisólido a estado plástico va a necesitar mayor W% para pasar de un estado plástico a un estado semilíquido, siendo los rangos tan pequeños de LL% (20.5% - 24.6%) y LP% (20%- 25%). La resistividad va a influir a pequeña escala en los resultados aproximadamente un 0.3% de variación en el LL% según el rango mínimo y máximo de ρ(40Ωm - 730Ωm).</p>		

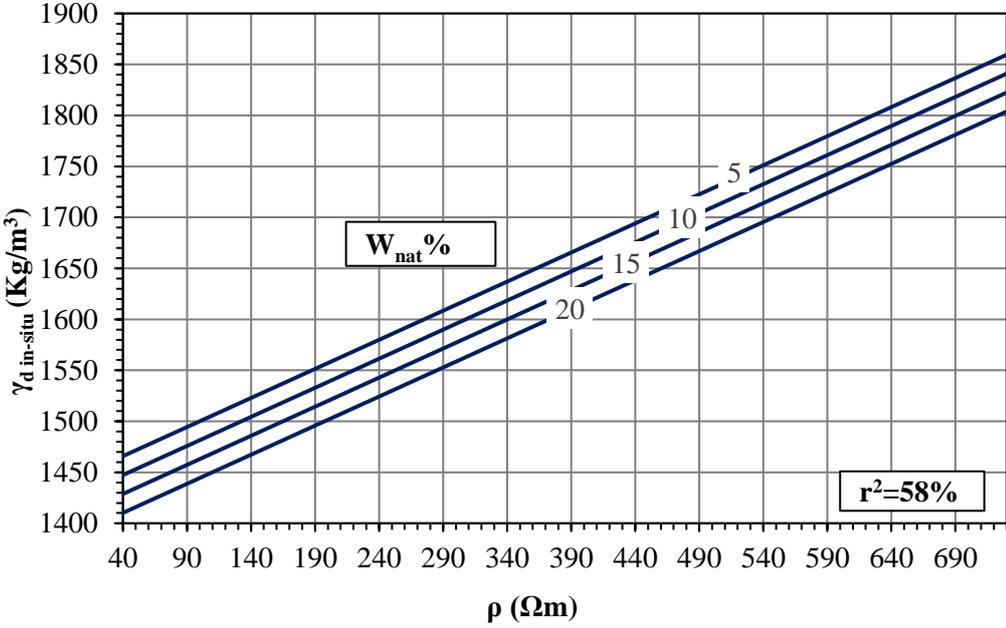
Autor: Jimmy Macas

Tabla 38. Gravedad Específica vs %Pasa TamizN°200 vs. Resistividad Eléctrica

Correlación N° 9	Gravedad Específica vs. %Pasa Tamiz N°200 vs. Resistividad Eléctrica	
		
Ecuación	$G_s = 2.614 - 3.23 \times 10^{-6}(\rho) + 0.0026(N^{\circ}200)$	
Coeficiente de determinación (r^2)	90%	
<p>Interpretación:</p> <p>El comportamiento de estos parámetros demostró una correlación lineal múltiple. No se descartó ninguna muestra de suelo. Se observa que, si aumenta la $\rho(\Omega m)$ el resultado para G_s va a disminuir. Y si aumenta el %N°200 el resultado para G_s va a aumentar, es decir que existe una relación inversamente proporcional entre la $\rho(\Omega m)$ y la G_s. Y una relación directamente proporcional entre la G_s y el %N°200. Mientras menor sea el valor de $\rho(\Omega m)$ y mayor el valor de %N°200 más elevado será el resultado para G_s del suelo. Se entiende entonces que un suelo que presente mayor cantidad de partículas finas (diámetro < 0.075mm) va a tener una G_s mucho más alta, siendo los rangos tan pequeños de G_s (2.614 - 2.707) y %N°200 (1% - 35%). La $\rho(\Omega m)$ va a influir a pequeña escala en los resultados aproximadamente un 0.002 de variación en la G_s según el rango mínimo y máximo de $\rho(40\Omega m - 730\Omega m)$. Esto posiblemente se debe a que la $\rho(\Omega m)$ se midió in-situ es decir con la presencia de partículas finas y gruesa en cambio para resultados de G_s solamente se obtuvieron con partículas finas (< 0.425mm).</p>		

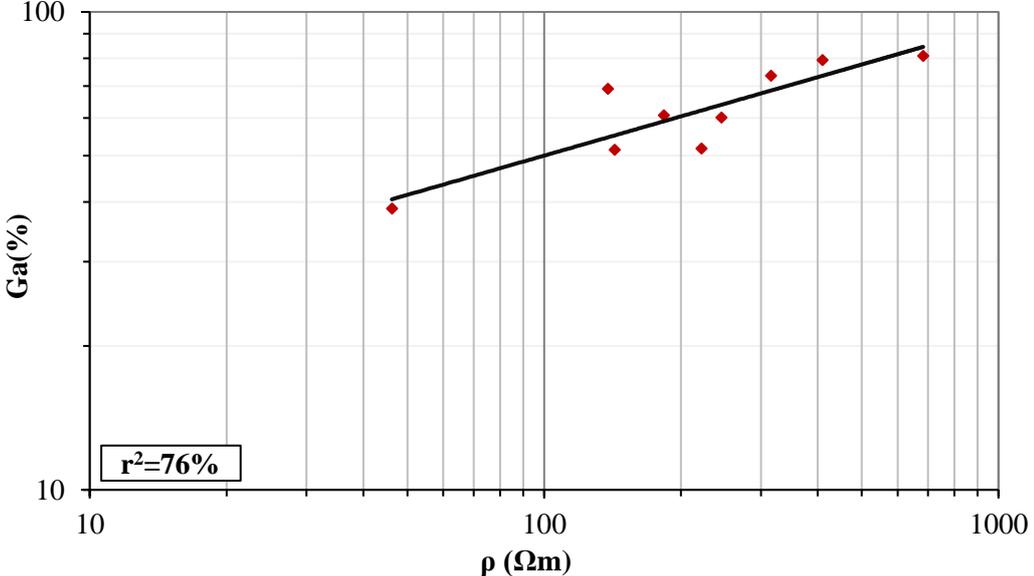
Autor: Jimmy Macas

Tabla 39. Densidad Seca in-situ vs. Humedad Natural vs. Resistividad Eléctrica

Correlación N° 10	Densidad Seca in-situ vs. Humedad Natural vs. Resistividad Eléctrica	
		
Ecuación	$\gamma_{d \text{ in-situ}} = 1461.58 + 0.571(\rho) - 3.712(W_{nat})$	
Coefficiente de determinación (r²)	58%	
<p>Interpretación:</p> <p>El comportamiento de estos parámetros demostró una correlación lineal múltiple. Se trabajó con 8 de las 10 muestras (E4-E10 descartadas). Se observó que si se trabaja con 7 muestras (descartar E3) la correlación sube $r^2=73\%$, esto se debe a que la muestra posee una $W_{nat}\%$ con una $\rho(\Omega m)$ muy baja, es decir no cumple con el criterio planteado en la correlación N°7. Se observa que, si aumenta la $\rho(\Omega m)$ el resultado para $\gamma_{d \text{ in-situ}}$ va a aumentar. Y si aumenta el $W_{nat}\%$ el resultado para $\gamma_{d \text{ in-situ}}$ va a disminuir, es decir que existe una relación inversamente proporcional entre la $\gamma_{d \text{ in-situ}}$ y la $W_{nat}\%$. Y una relación directamente proporcional entre la $\gamma_{d \text{ in-situ}}$ y la $\rho(\Omega m)$. Mientras mayor sea el valor de $\rho(\Omega m)$ y menor el valor de $W_{nat}\%$ más elevado será el resultado para $\gamma_{d \text{ in-situ}}$ del suelo. Se entiende entonces que una muestra de poca humedad natural independientemente de los vacíos llenos de aire presentes en esta contribuye a un mayor peso específico y la resistividad en este caso va a ser alta. Para utilizar la gráfica hay que tener en cuenta el rango de trabajo de $\rho(40\Omega m - 730\Omega m)$ y la $W_{nat}(5\% - 20\%)$.</p>		

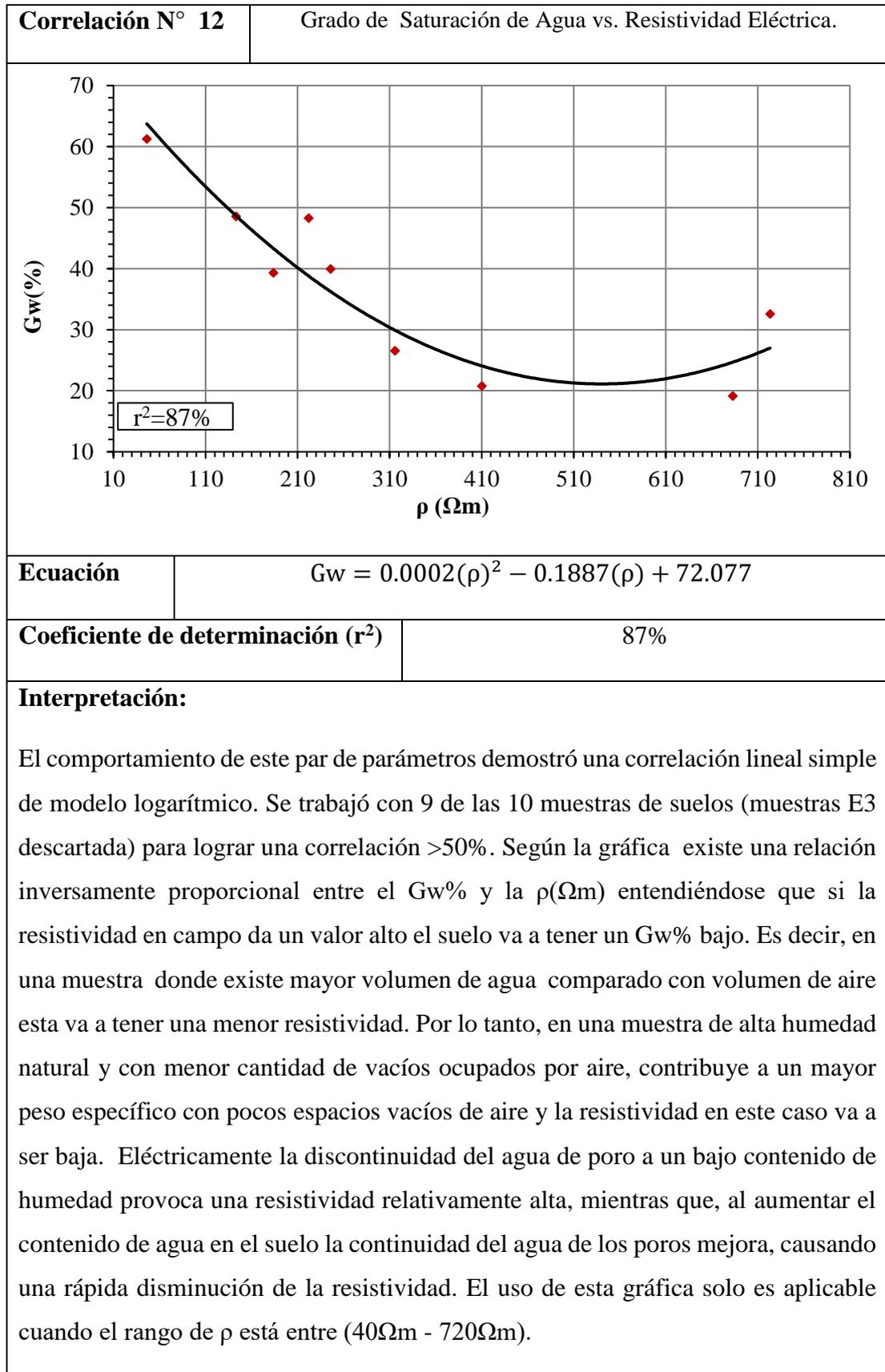
Autor: Jimmy Macas

Tabla 40. Grado de Saturación de Aire vs. Resistividad Eléctrica.

Correlación N° 11	Grado de Saturación de Aire vs. Resistividad Eléctrica.	
 <p>The figure is a scatter plot with a logarithmic x-axis representing electrical resistivity ρ in Ωm (ranging from 10 to 1000) and a linear y-axis representing air saturation G_a in % (ranging from 10 to 100). There are 9 data points plotted as red diamonds. A black trendline is drawn through the points, and a box in the bottom-left corner of the plot area indicates $r^2=76\%$.</p>		
Ecuación	$G_a = 14.244(\rho)^{0.273}$	
Coefficiente de determinación (r^2)	76%	
<p>Interpretación:</p> <p>El comportamiento de este par de parámetros demostró una correlación lineal simple de modelo potencial. Se trabajó con 9 de las 10 muestras de suelos (muestras E7 descartada) para lograr una correlación $>50\%$. Según la gráfica existe una relación directamente proporcional entre el $G_a\%$ y la $\rho(\Omega m)$ entendiéndose que si la resistividad en campo da un valor alto el suelo va a tener un $G_a\%$ elevado. Es decir, en una muestra donde existe mayor volumen de aire comparado con volumen de agua esta va a tener una mayor resistividad. Por lo tanto, en una muestra de poca humedad natural y con mayor cantidad de vacíos ocupados por aire, contribuye a un suelo con bastantes espacios vacíos de aire y la resistividad en este caso va a ser alta. El uso de esta gráfica solo es aplicable cuando el rango de ρ está entre ($40\Omega m - 680\Omega m$).</p>		

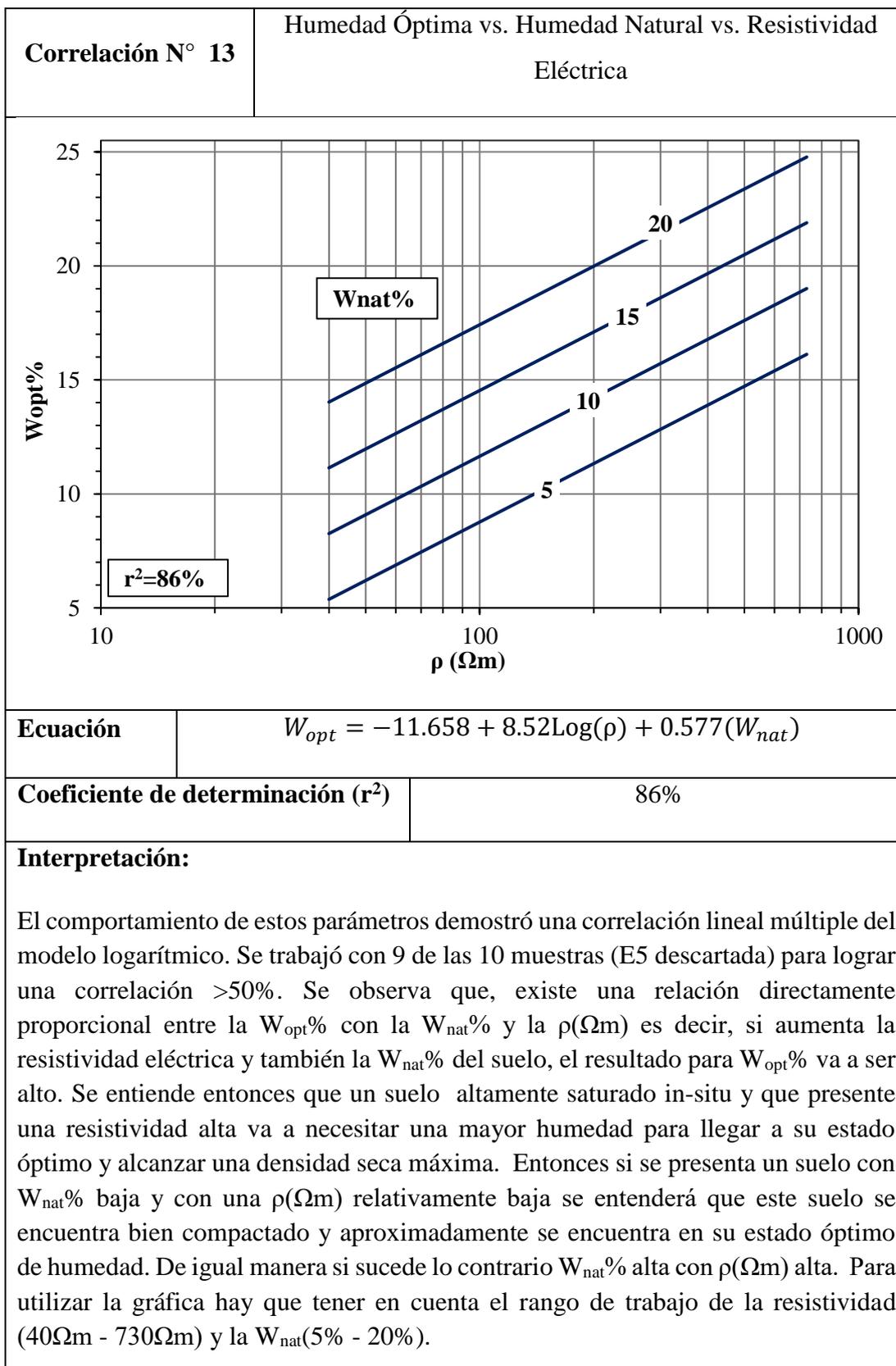
Autor: Jimmy Macas

Tabla 41. Grado de Saturación de Agua vs. Resistividad Eléctrica.



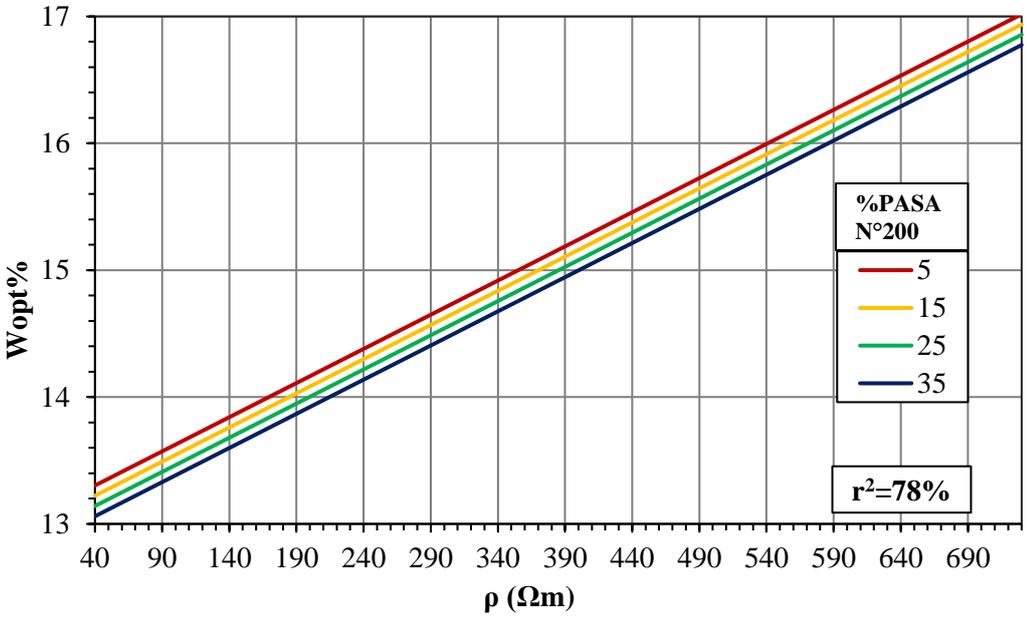
Autor: Jimmy Macas

Tabla 42. Humedad Óptima vs. Humedad Natural vs. Resistividad Eléctrica.



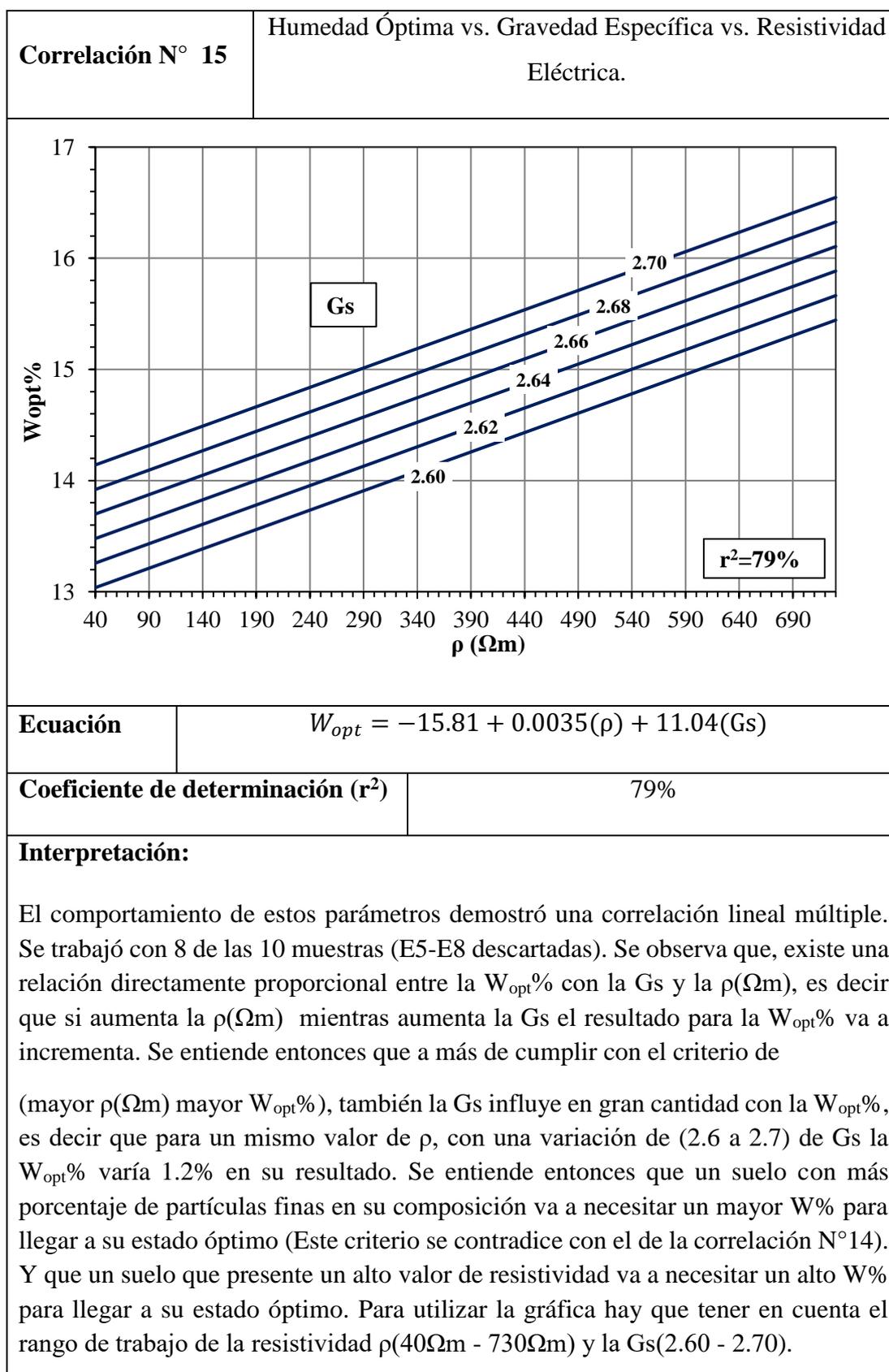
Autor: Jimmy Macas

Tabla 43. Humedad Óptima vs. %Pasa Tamiz N°200 vs. Resistividad Eléctrica.

Correlación N° 14	Humedad Óptima vs. %Pasa Tamiz N°200 vs. Resistividad Eléctrica.	
		
Ecuación	$W_{opt} = 13.128 + 0.0054(\rho) - 0.0081(N^{\circ}200)$	
Coefficiente de determinación (r²)	78%	
<p>Interpretación:</p> <p>El comportamiento de estos parámetros demostró una correlación lineal múltiple. Se trabajó con 8 de las 10 muestras (E5-E7 descartadas) para lograr una correlación >50%. Se observa que, existe una relación inversamente proporcional entre la $W_{opt}\%$ con el %N°200 ya que mientras incrementa el %N°200 el resultado para $W_{opt}\%$ disminuye. En cambio, existe una relación directamente proporcional entre la $W_{opt}\%$ y la $\rho(\Omega m)$ ya que si la ρ incrementa el resultado para $W_{opt}\%$ va a aumentar. Gráficamente se observa que el %N°200 no influye en gran cantidad con la $W_{opt}\%$, es decir que para un mismo valor de ρ con una variación de (5%-35%) de material fino la $W_{opt}\%$ solamente varía 0.3%. Se entiende entonces que un suelo con alto porcentaje de partículas finas en su composición va a necesitar un menor W% para llegar a su estado óptimo, y un suelo que presente un alto rango de ρ va a necesitar un alto W% para llegar a su estado óptimo. Para utilizar la gráfica hay que tener en cuenta el rango de trabajo de la resistividad $\rho(40\Omega m - 730\Omega m)$ y %N°200(5% - 35%).</p>		

Autor: Jimmy Macas

Tabla 44. Humedad Óptima vs. Gravedad Específica vs. Resistividad Eléctrica.



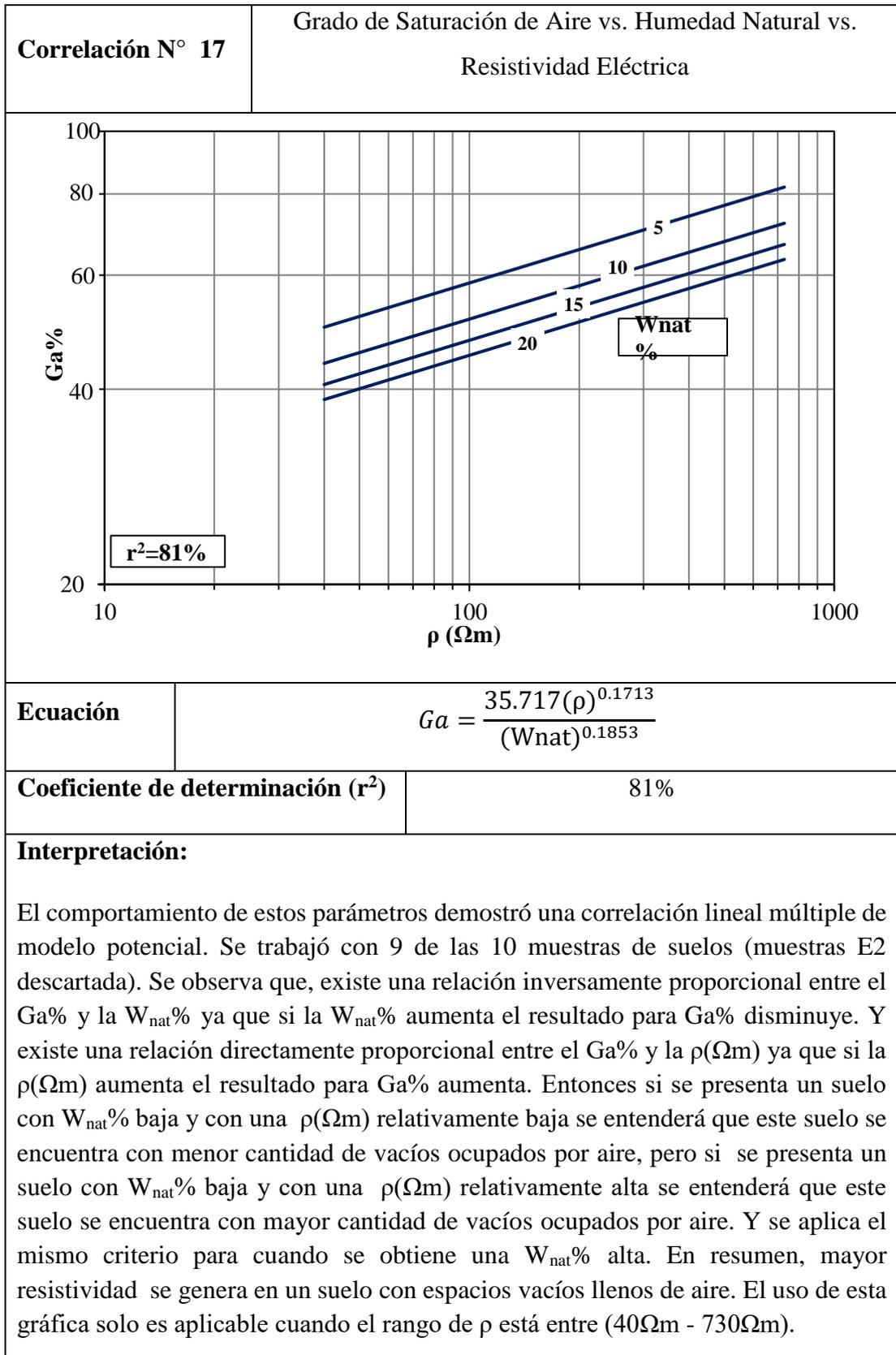
Autor: Jimmy Macas

Tabla 45. Densidad Seca Máxima vs Humedad óptima vs Resistividad Eléctrica

Correlación N° 16	Densidad Seca Máxima vs Humedad óptima vs Resistividad Eléctrica	
Ecuación	$\gamma_{dm\acute{a}x} = \frac{4249.90(\rho)^{0.034}}{(W_{opt})^{0.4128}}$	
Coefficiente de determinación (r²)	90%	
<p>Interpretación:</p> <p>El comportamiento de estos parámetros demostró una correlación lineal múltiple de modelo potencial. No se descartó ninguna muestra de suelo. Solamente relacionando la $W_{opt}\%$ con la $\gamma_{d\ máx}$ existe un $r^2= 65\%$ pero para lograr un mejor resultado se correlacionó con la $\rho(\Omega m)$ aumentando su $r^2=90\%$ resultando ser más aceptable la utilización de la gráfica. Se observa que, existe una relación directamente proporcional entre la $\gamma_{d\ máx}$ con la $\rho(\Omega m)$ ya que mientras aumenta la $\rho(\Omega m)$ el resultado para $\gamma_{d\ máx}$ aumenta, y existe una relación inversamente proporcional entre la $\gamma_{d\ máx}$ con la $W_{opt}\%$ ya que mientras aumenta la $W_{opt}\%$ el resultado para $\gamma_{d\ máx}$ disminuye. Entonces a una mayor resistividad y menor $W_{opt}\%$ se obtiene una mayor $\gamma_{d\ máx}$. Se entiende entonces que un suelo que necesite mayor $W\%$ para llegar a su estado óptimo va a tener una menor $\gamma_{d\ máx}$ y relativamente ésta aumenta de valor si la resistividad también aumenta. Para utilizar la gráfica hay que tener en cuenta el rango de trabajo de la resistividad $\rho(40\Omega m - 730\Omega m)$ y la $W_{opt}\%(13\%-18\%)$.</p>		

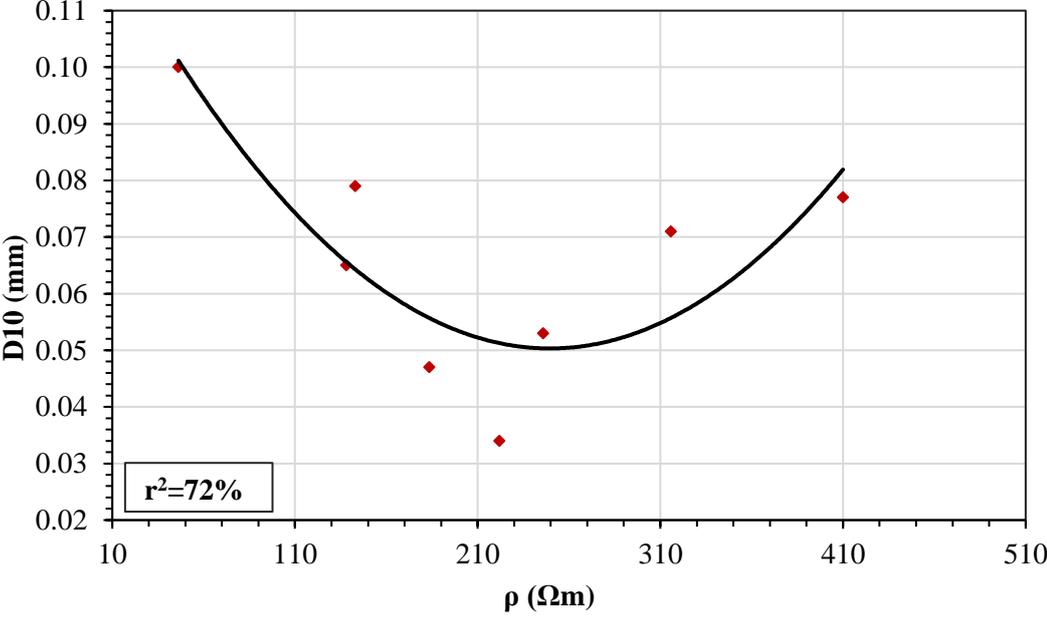
Autor: Jimmy Macas

Tabla 46. Grado de Saturación de Aire vs Humedad Natural vs Resistividad Eléctrica



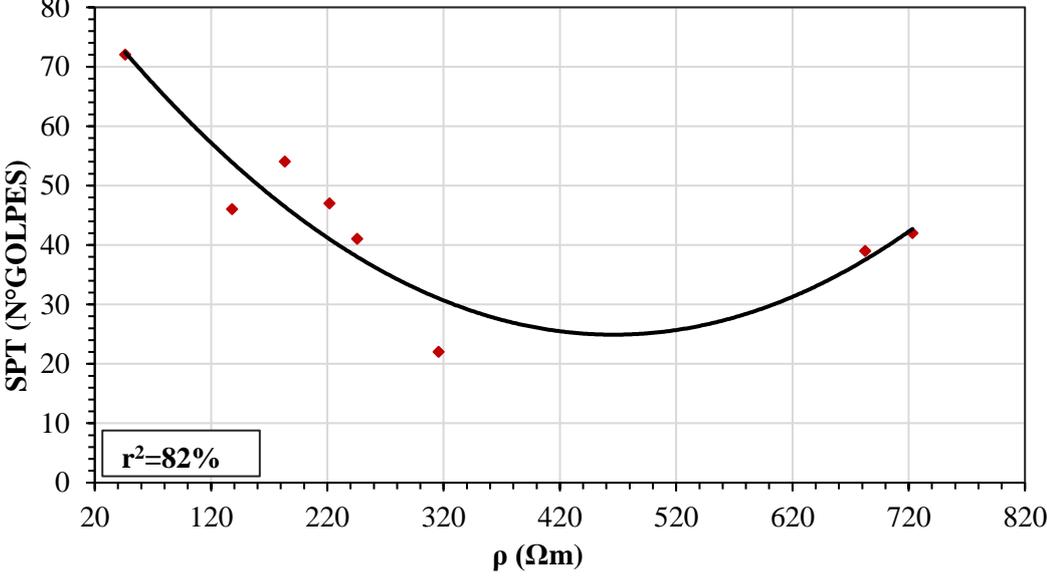
Autor: Jimmy Macas

Tabla 47. Diámetro Efectivo vs. Resistividad Eléctrica

Correlación N° 18	Diámetro Efectivo vs. Resistividad Eléctrica	
		
Ecuación	$D_{10} = 1.23 \times 10^{-6}(\rho)^2 - 0.0006(\rho) + 0.1269$	
Coefficiente de determinación (r²)	72%	
<p>Interpretación:</p> <p>El comportamiento de este par de parámetros demostró una correlación lineal simple de modelo polinomial grado 2. Se trabajó con 8 de las 10 muestras de suelos (muestras E4-E7 descartadas). Según la gráfica es una parábola por lo cual existe dos valores de $\rho(\Omega m)$ para un mismo resultado de $D_{10}(mm)$. Entonces se asume que la resistividad en un rango de $(50\Omega m - 250\Omega m)$ tiene una relación inversamente proporcional con el D_{10} y que la resistividad en un rango de $(250\Omega m - 410\Omega m)$ tiene una relación directamente proporcional con el D_{10}.</p> <p>La causa de este efecto puede deberse a otras propiedades que influencia en la medición de resistividad como son la relación de vacíos, el contenido de humedad natural del suelo. Entonces realizando el ensayo de resistividad se puede determinar cuál es el tamaño del grupo de partículas que representan el 10% del material que pasa el juego de tamices (#4; #8; #10; #16; #30; #40; #50; #60; #100; #200).</p>		

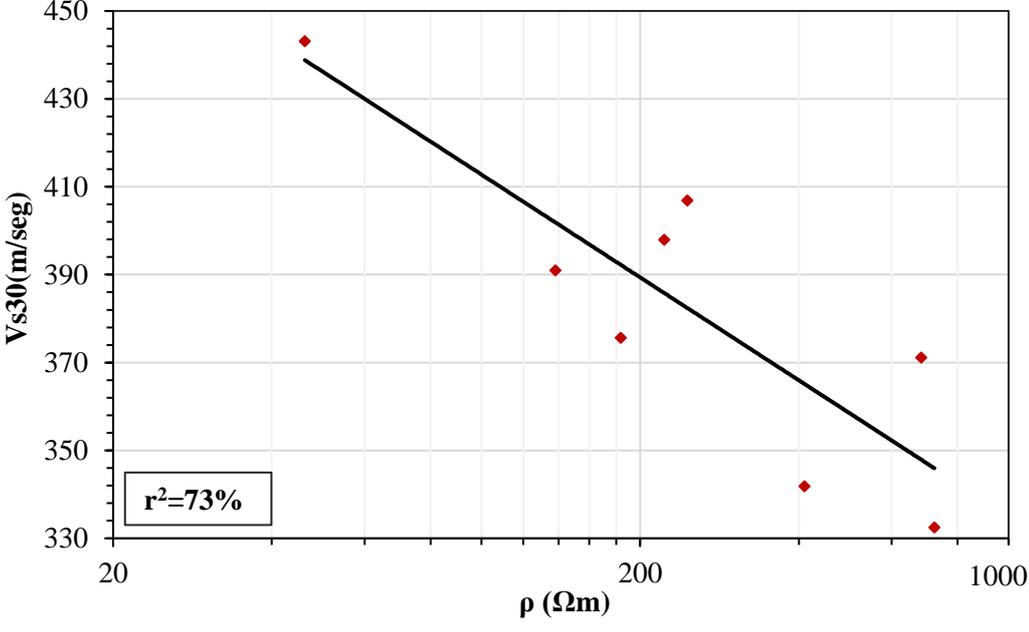
Autor: Jimmy Macas

Tabla 48. SPT vs. Resistividad Eléctrica

Correlación N° 19	SPT vs. Resistividad Eléctrica	
 <p>El gráfico muestra una correlación inversa entre la resistividad eléctrica y el SPT. La curva parabólica indica que para un mismo valor de SPT, existen dos valores de resistividad eléctrica. El coeficiente de determinación es $r^2 = 82\%$.</p>		
Ecuación	$SPT = 0.00027(\rho)^2 - 0.25(\rho) + 83.47$	
Coefficiente de determinación (r^2)	82%	
<p>Interpretación:</p> <p>El comportamiento de este par de parámetros demostró una correlación lineal simple de modelo polinomial grado 2. Se trabajó con 8 de las 10 muestras de suelos (muestras E6-E10 descartadas). Según la gráfica es una parábola por lo cual existe dos valores de $\rho(\Omega m)$ para un mismo resultado de SPT(N°golpes). Entonces se asume que la $\rho(\Omega m)$ en un rango de (50Ωm-460Ωm) tiene una relación inversamente proporcional con el SPT y que la resistividad en un rango de (460Ωm-720Ωm) tiene una relación directamente proporcional con el SPT. La relación directamente proporcional existe cuando la presencia de finos es escasa, independientemente de la $W_{nat}\%$ presente. Entonces, si los resultados en campo son menores a 460Ωm se asume que el suelo tiene una considerable presencia de material fino (>M-L). Y si los resultados en campo son mayores a 460Ωm se asume que el suelo tiene (<M-L). Obtenido el valor de SPT se puede determinar tanto su resistencia a la penetración y la presión admisible del suelo mediante las fórmulas: $R_p=(N^\circ*4)$ en Kg/cm² y $\sigma_{adm}=(N^\circ/10)$ en Kg/cm² así como la estimación del ángulo de fricción interna mediante ecuaciones o tablas normalizadas.</p>		

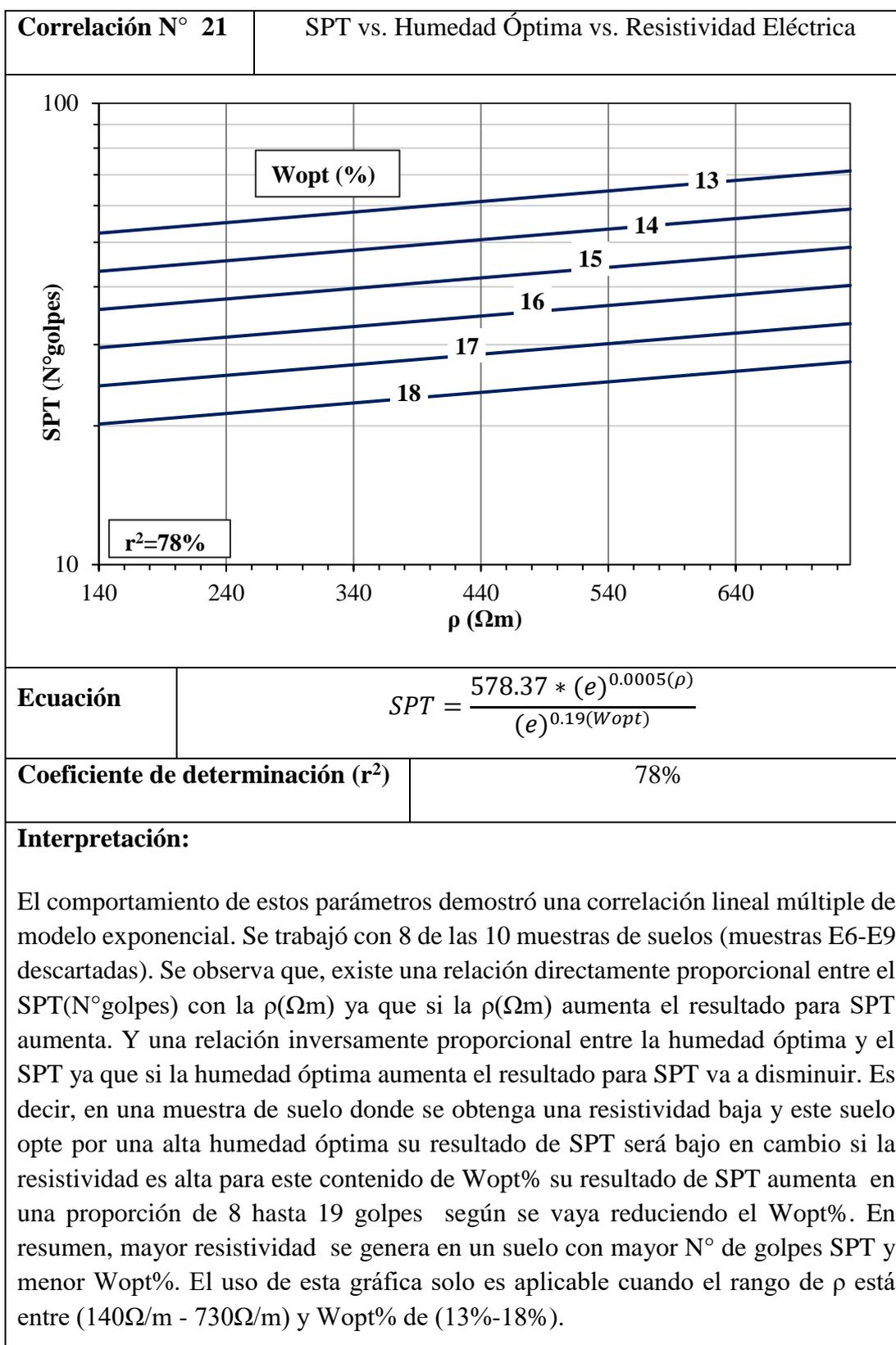
Autor: Jimmy Macas

Tabla 49. Velocidad Media de Onda Cortante vs. Resistividad Eléctrica

Correlación N° 20	Velocidad Media de Onda Cortante vs. Resistividad Eléctrica	
		
Ecuación	$V_{S_{30}} = -33.76\ln(\rho) + 568.257$	
Coefficiente de determinación (r^2)	73%	
<p>Interpretación:</p> <p>El comportamiento de este par de parámetros demostró una correlación lineal simple de modelo logarítmico. Se trabajó con 8 de las 10 muestras de suelos (muestras E5-E6 descartadas) para lograr una correlación >50%.</p> <p>Se observa que existe una relación inversamente proporcional entre la $V_{S_{30}}$(m/s) y la ρ(Ωm), entonces si la resistividad en el suelo aumenta la $V_{S_{30}}$ decrece. Según el rango de $V_{S_{30}}$(330m/s – 450m/s) corresponde a un tipo de Suelo “C” propio de la ciudad de Ambato (Suelo rígido o muy denso). La velocidad de propagación de ondas de corte en los primeros treinta metros de suelos medidos desde la superficie dependen a condiciones propias de cada suelo como contenido de humedad, su porosidad, densidad y compactación, que en comparativa se encuentra relacionada con la propagación de las ondas de corriente utilizadas en el ensayo de resistividad. El rango de trabajo para la resistividad es ρ(50Ωm - 720Ωm).</p>		

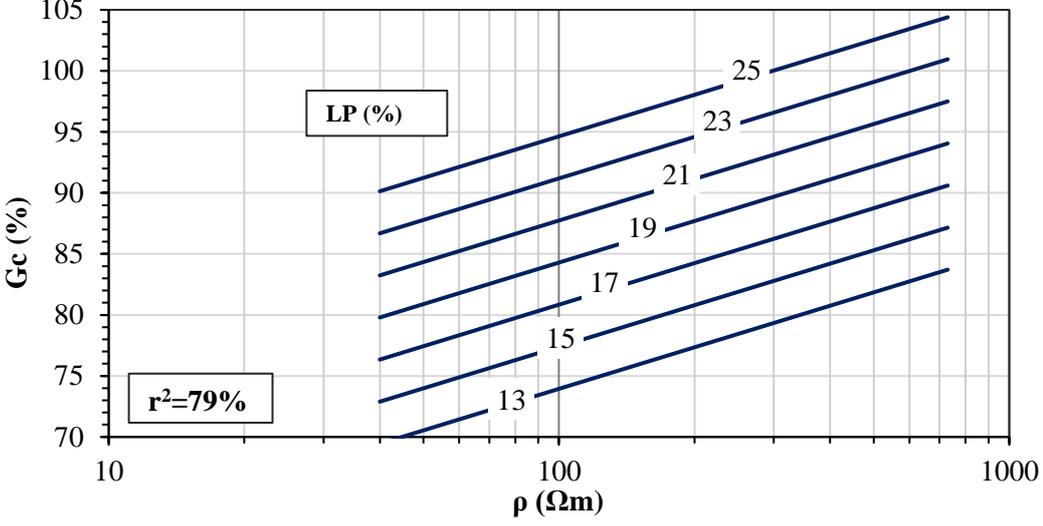
Autor: Jimmy Macas

Tabla 50. SPT vs. Humedad Óptima vs. Resistividad Eléctrica



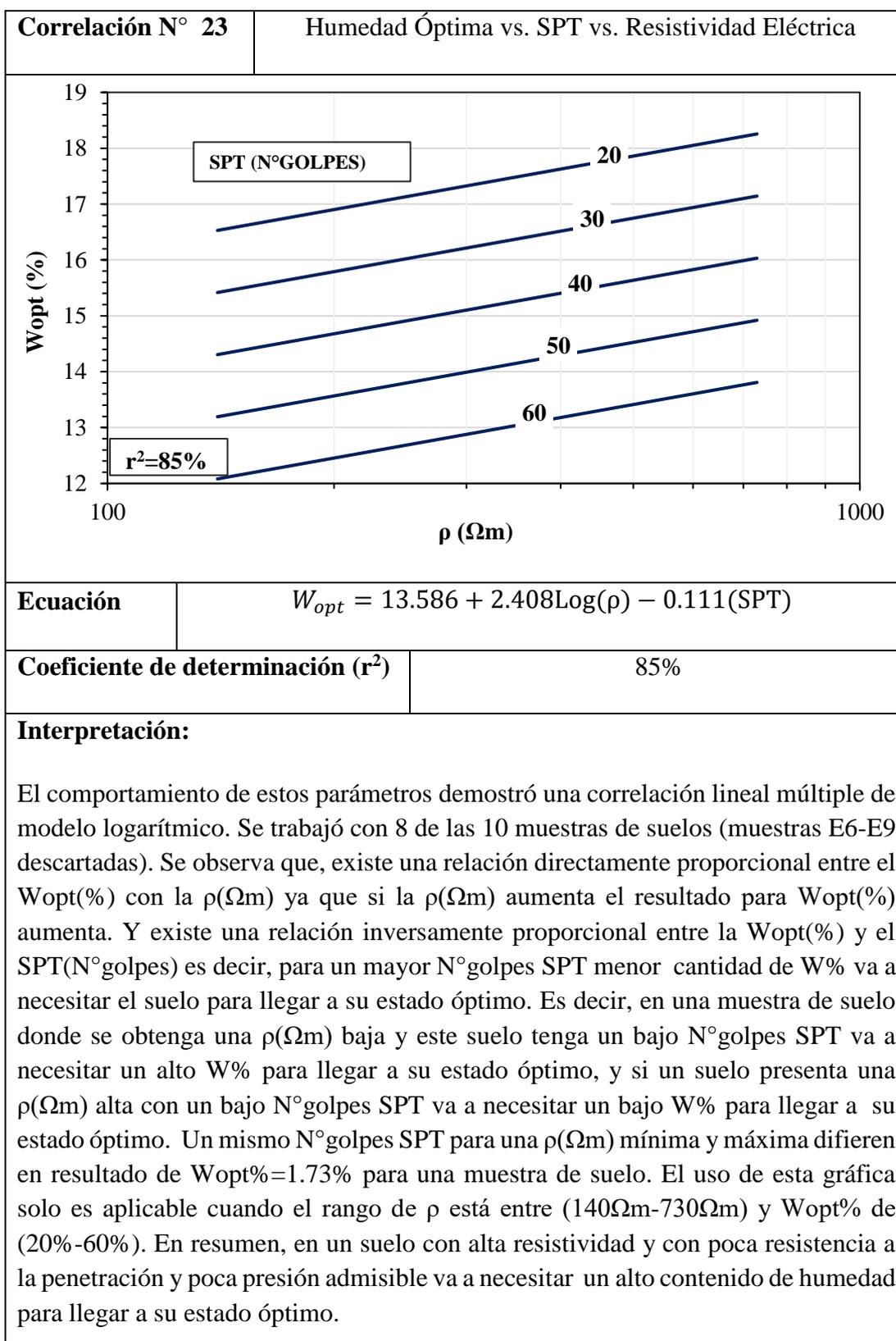
Autor: Jimmy Macas

Tabla 51. Grado de Compactación vs. Límite Plástico vs. Resistividad Eléctrica

Correlación N° 22	Grado de Compactación vs. Límite Plástico vs. Resistividad Eléctrica	
		
Ecuación	$G_c = 28.92 + 11.317\text{Log}(\rho) + 1.723(\text{LP})$	
Coefficiente de determinación (r²)	79%	
<p>Interpretación:</p> <p>El comportamiento de estos parámetros demostró una correlación lineal múltiple de modelo logarítmico. Se trabajó con 8 de las 10 muestras de suelos (muestras E1-E4 descartadas). Se observa que, existe una relación directamente proporcional entre el Gc (%) con el LP(%) y la $\rho(\Omega\text{m})$ ya que si la LP(%) y $\rho(\Omega\text{m})$ aumenta el resultado para Gc(%) aumenta. Teóricamente esto no es así ya que se supone que un suelo más compactado genera menor resistividad. Probablemente esto se debe a la influencia y tendencia que genera el punto E7 teniendo la mayor $\rho(\Omega\text{m})$ y Gc(%). De otra manera descartando este punto se observa que la tendencia es inversamente proporcional entre $\rho(\Omega\text{m})$ y Gc(%). Es decir, una muestra de suelo que necesite mayor cantidad de humedad para pasar de su estado semisólido a su estado plástico va a tener un mayor grado de compactación. El resultado de la relación Gc(%) vs $\rho(\Omega\text{m})$ está a libre discusión ya que interfieren distintos factores para sus resultados, siendo la $W_{nat}\%$ el más importante y más influyente de todos. En resumen, mayor resistividad se genera en un suelo más compactado y con mayor límite plástico. El uso de esta gráfica solo es aplicable cuando el rango de ρ está entre ($40\Omega\text{m} - 730\Omega\text{m}$) y LP% de (13%-25%).</p>		

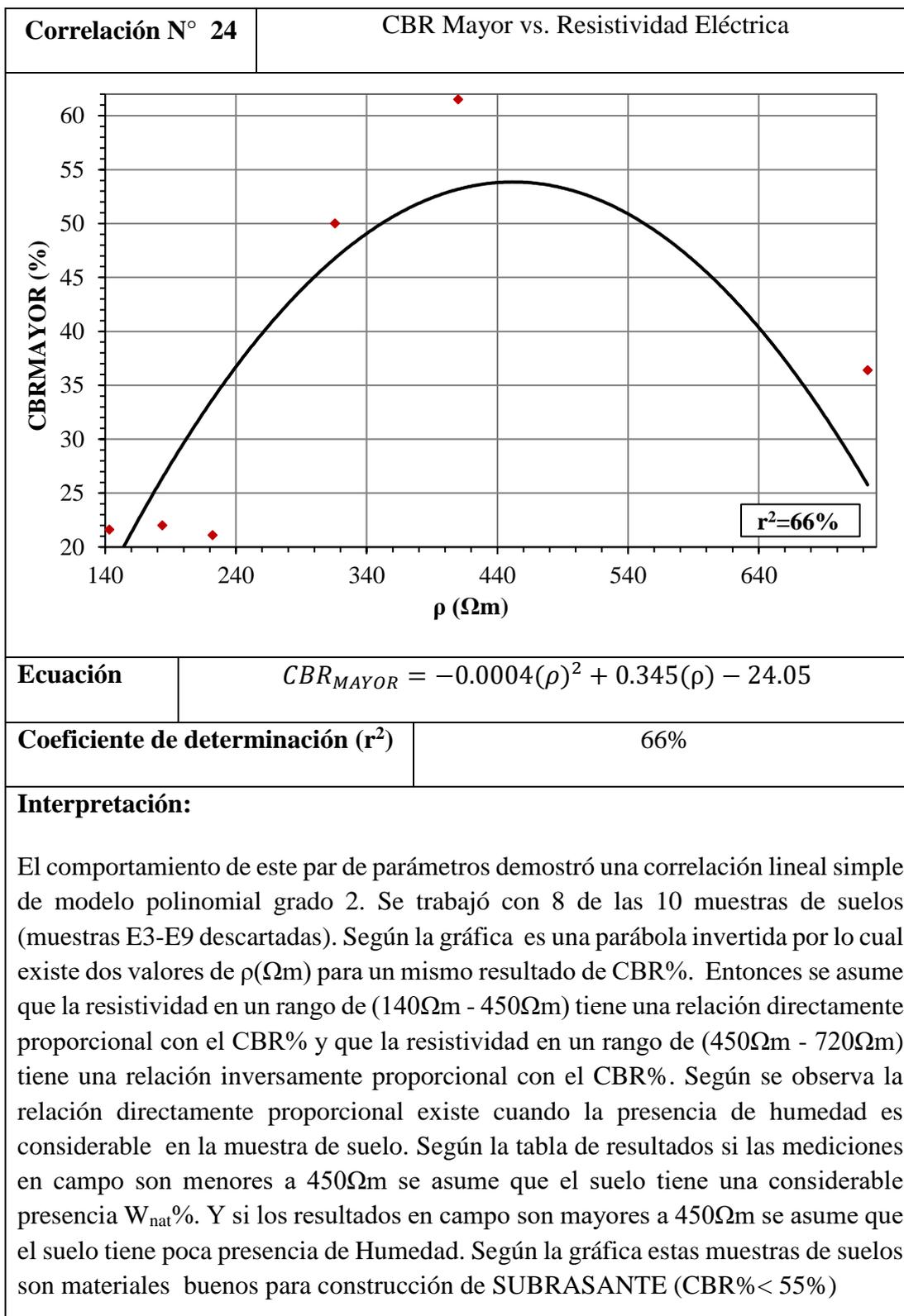
Autor: Jimmy Macas

Tabla 52. Humedad Óptima vs. SPT vs. Resistividad Eléctrica



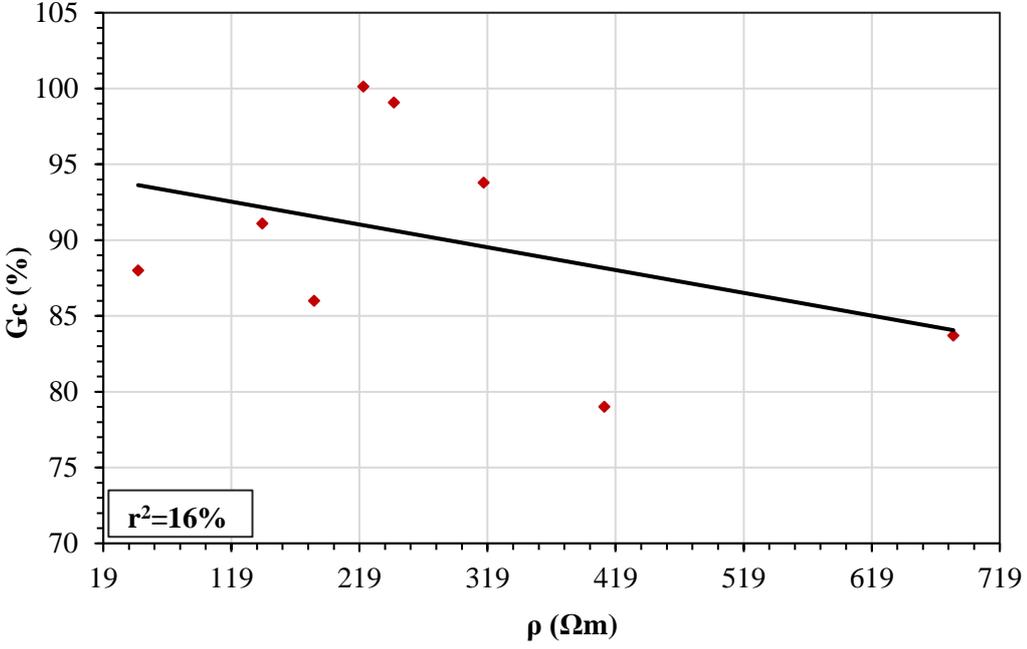
Autor: Jimmy Macas

Tabla 53. CBR Mayor vs. Resistividad Eléctrica



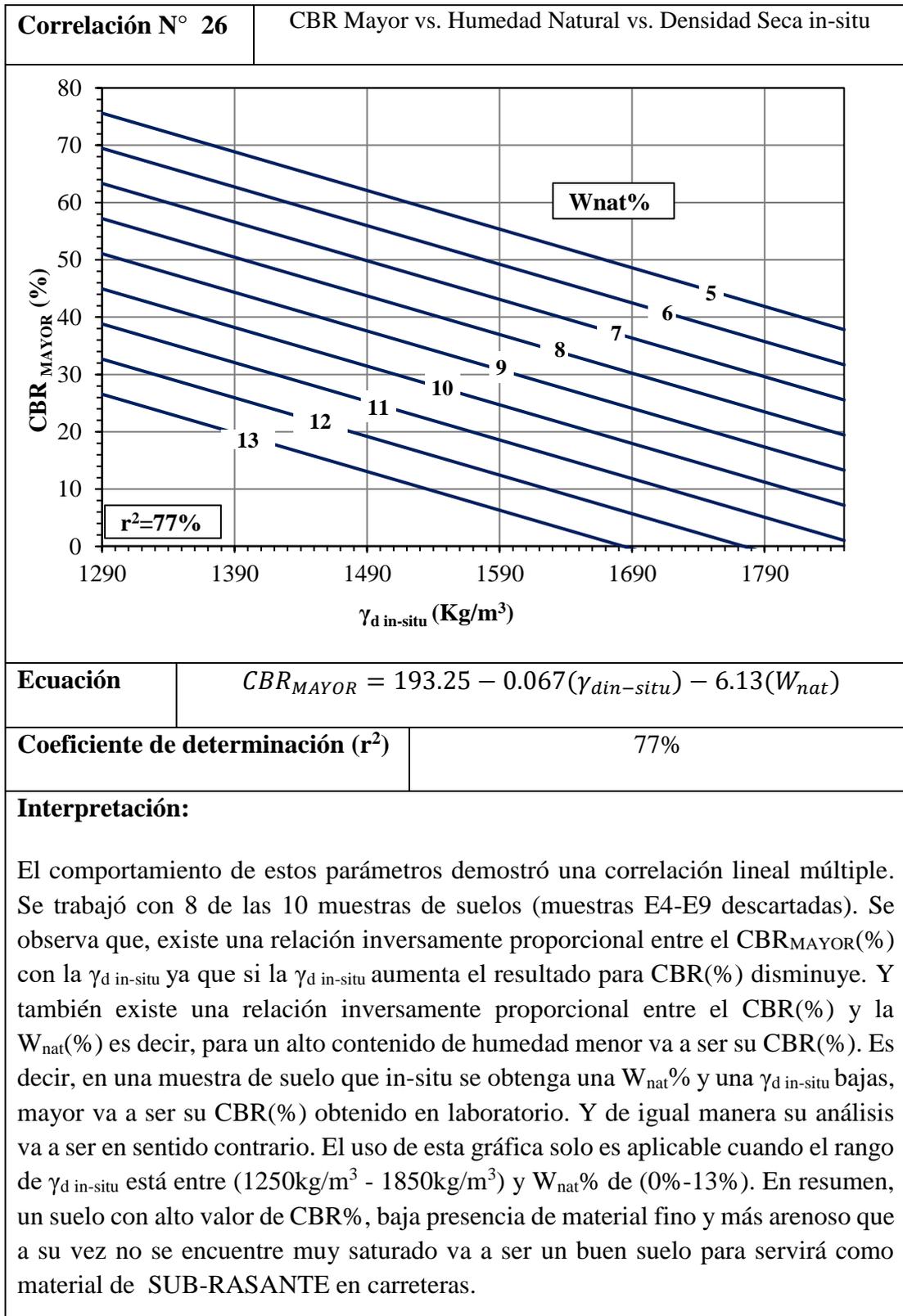
Autor: Jimmy Macas

Tabla 54. Grado de Compactación vs. Resistividad Eléctrica

Correlación N° 25	Grado de Compactación vs. Resistividad Eléctrica	
		
Ecuación	$Gc = -0.015(\rho) + 94.324$	
Coefficiente de determinación (r²)	16%	
<p>Interpretación:</p> <p>El comportamiento de este par de parámetros demostró una correlación lineal simple de modelo lineal. Se trabajó con 8 de las 10 muestras de suelos (muestras E2-E7 descartadas), el motivo de incluir esta correlación a pesar de su bajo coeficiente de determinación es para explicar el comportamiento de la compactación con la resistividad y comprobar el contenido teórico explicado en el Capítulo I. Existe una relación inversamente proporcional. Teóricamente esto es así ya que se supone que un suelo más compactado genera menor resistividad. Probablemente esto se debe a la influencia y tendencia que genera el punto E7 teniendo la mayor $\rho(\Omega m)$ y $Gc(\%)$. Sin descartar este punto se observa que la tendencia es directamente proporcional entre $\rho(\Omega m)$ y $Gc(\%)$. El resultado de la relación $Gc(\%)$ vs $\rho(\Omega m)$ está a libre discusión ya que interfieren distintos factores para sus resultados, siendo la humedad el más importante e influyente de todos. En resumen, mayor resistividad se genera en un suelo menos compactado.</p>		

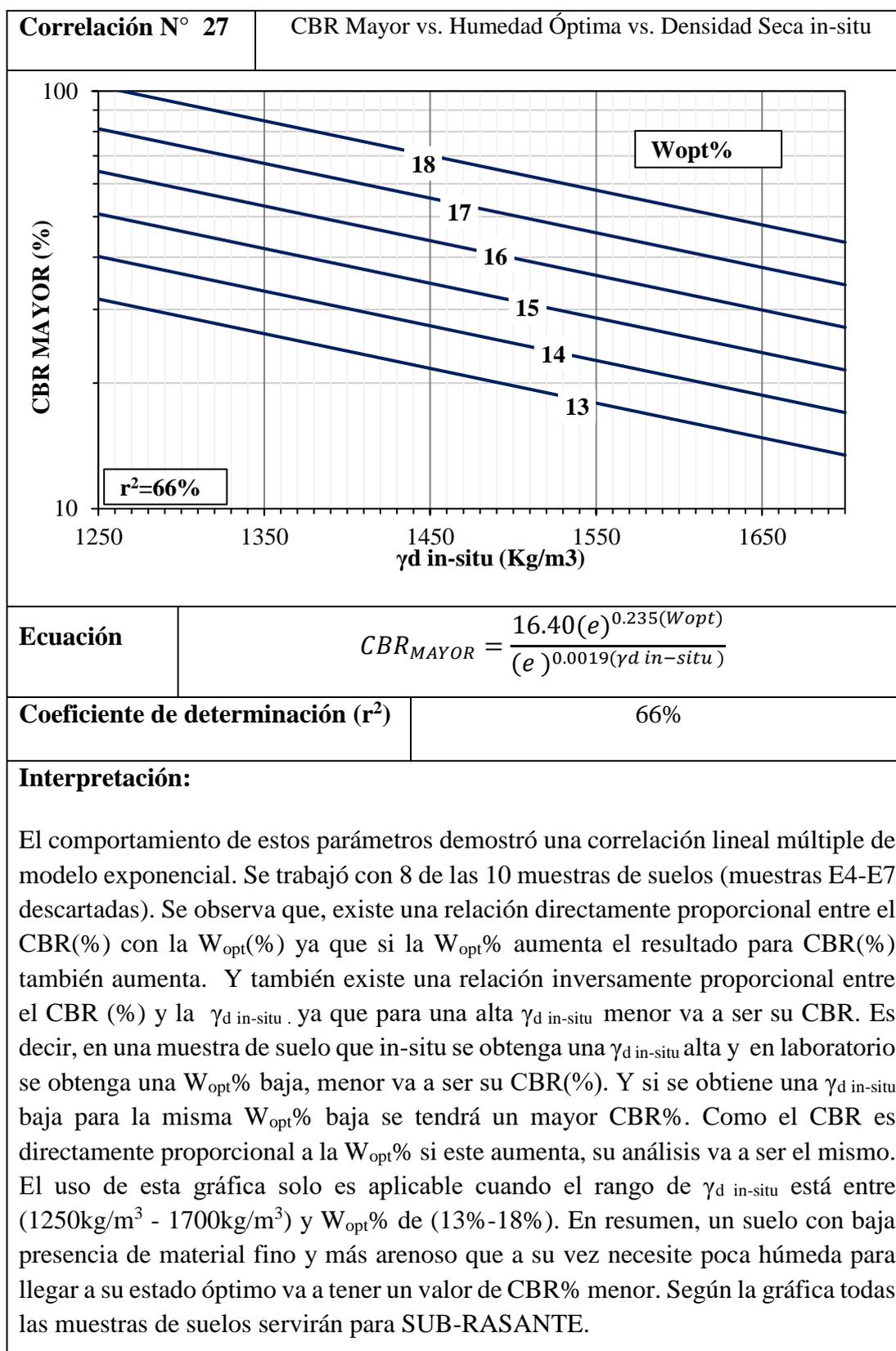
Autor: Jimmy Macas

Tabla 55. CBR Mayor vs. Humedad Natural vs. Densidad Seca in-situ



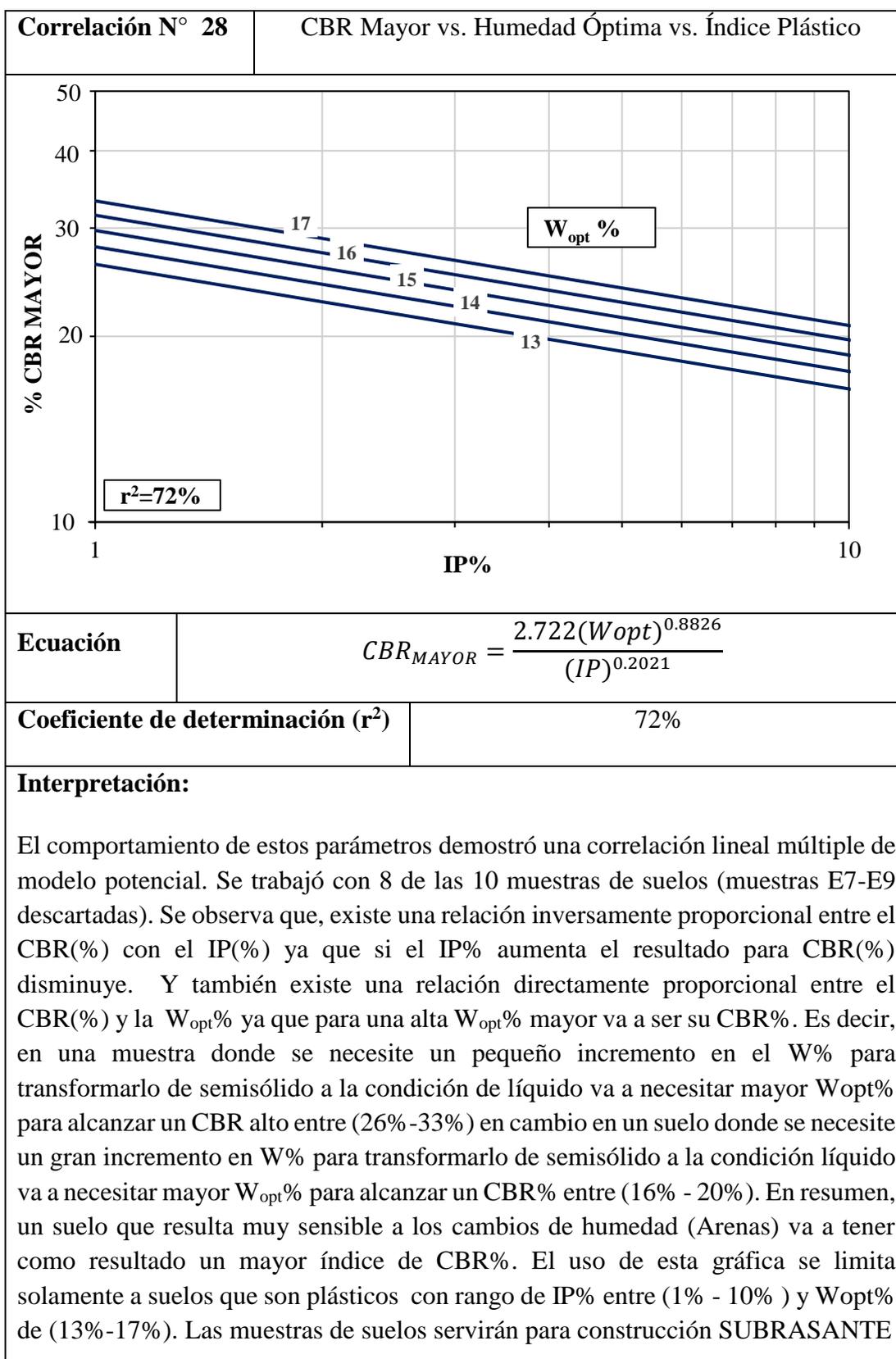
Autor: Jimmy Macas

Tabla 56. CBR Mayor vs. Humedad Óptima vs. Densidad Seca in-situ



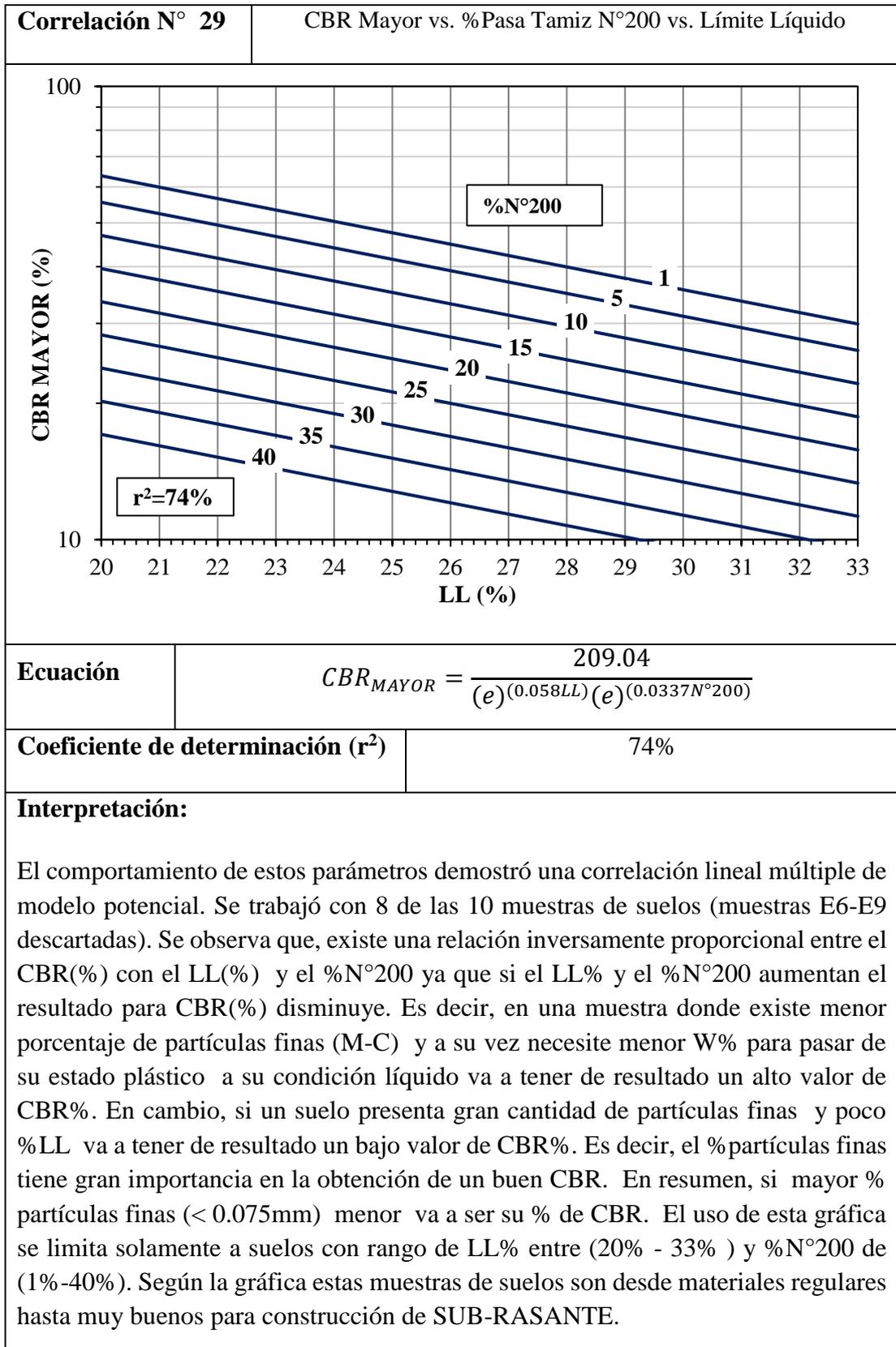
Autor: Jimmy Macas

Tabla 57. CBR Mayor vs. Humedad Óptima vs. Índice Plástico



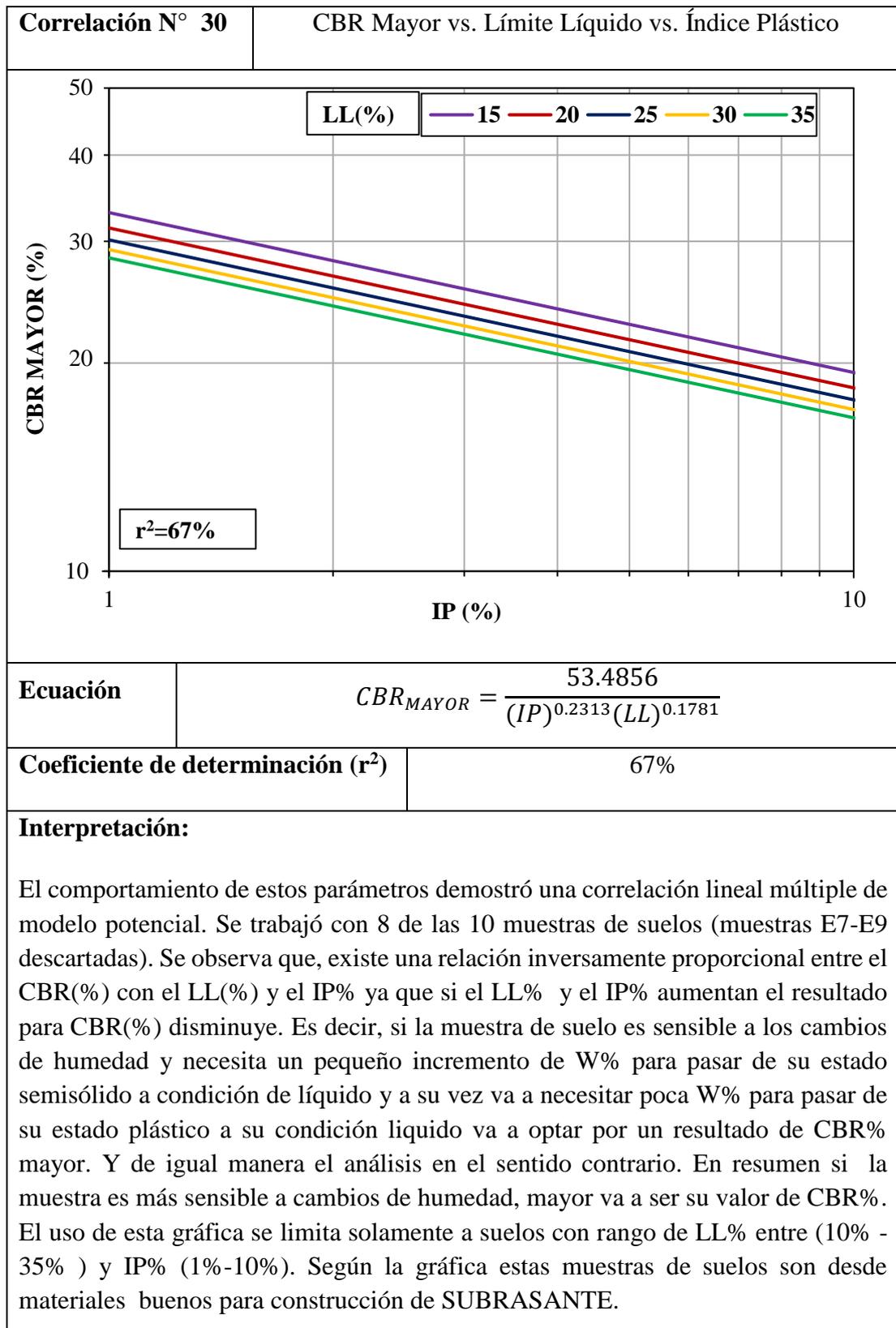
Autor: Jimmy Macas

Tabla 58. CBR Mayor vs. %Pasa Tamiz N°200 vs. Límite Líquido



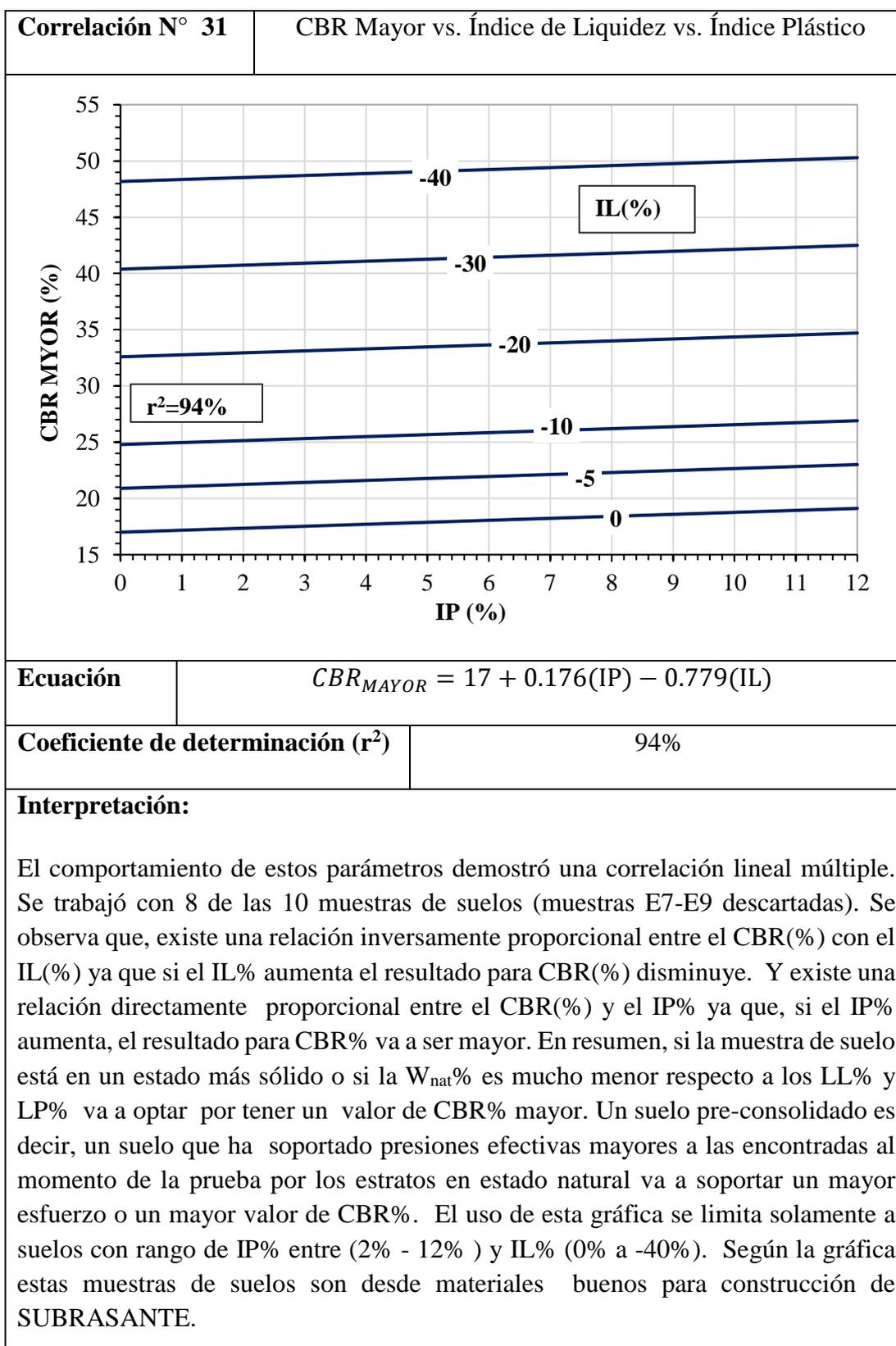
Autor: Jimmy Macas

Tabla 59. CBR Mayor vs. Límite Líquido vs. Índice Plástico



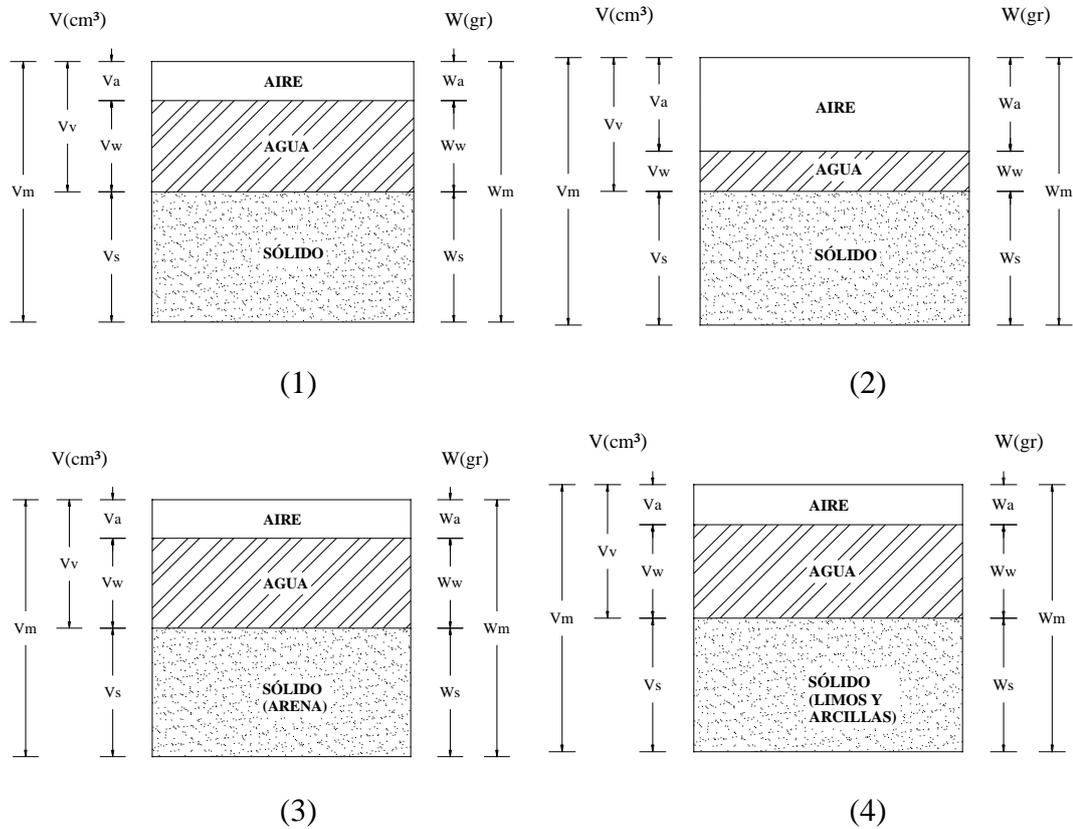
Autor: Jimmy Macas

Tabla 60. CBR Mayor vs. Índice de Liquidez vs. Índice Plástico



Autor: Jimmy Macas

Se presenta a continuación una comparación con las distintas composiciones del elemento unitario de la masa de suelo y su influencia en la resistividad eléctrica.



(1). Si $V_w(\text{cm}^3)$ es mayor, entonces la $\rho(\Omega\text{m})$ es menor.

Cuando mayor es la presencia de humedad en el suelo existe menor resistividad eléctrica.

(2). Si $V_a(\text{cm}^3)$ es mayor, entonces la $\rho(\Omega\text{m})$ es mayor.

Cuando menor es la presencia de humedad y mayor la cantidad de aire que ocupan los poros en el suelo, va a existir una mayor resistividad eléctrica.

(3). Si **Sólido = Arena o partículas gruesas**, entonces la $\rho(\Omega\text{m})$ es mayor.

Cuando mayor es la presencia partículas gruesas en el suelo existe mayor resistividad eléctrica.

(4). Si **Sólido = Limos o arcillas**, entonces la $\rho(\Omega\text{m})$ es menor.

Cuando mayor es la presencia partículas finas en el suelo existe menor resistividad eléctrica.

3.2 Verificación de hipótesis

Luego de haber determinado las propiedades índice y mecánicas en las 10 muestras de suelos con su respectiva resistividad eléctrica medida en campo y haberlas correlacionado entre sí, se muestra una comparación de resultados. Mostrando los altos coeficientes de determinación obtenidos por el método de mínimos cuadrados y señalando las propiedades más importantes.

Tabla 61. Cuadro resumen de resultados

Variables de correlación	Coefficiente de determinación (r²)
Humedad natural vs. Resistividad eléctrica W_{nat} vs. ρ	95%
Límite líquido vs. Resistividad eléctrica vs. Límite plástico LL vs. ρ vs. LP	81%
Gravedad específica vs. Resistividad eléctrica vs. %PasaN°200 Gs vs. ρ vs. %N°200	90%
Densidad seca in-situ vs. Resistividad eléctrica vs. Humedad natural γ_{d in-situ} vs. ρ vs. W_{nat}	58%
Grado de Saturación de Agua vs. Resistividad eléctrica Gw vs. ρ	87%
Humedad óptima vs. Resistividad eléctrica vs. Humedad natural W_{opt} vs. ρ vs. W_{nat}	86%
Densidad seca máxima vs. Resistividad eléctrica vs. Humedad óptima γ_{d máx} vs. ρ vs. W_{opt}	90%
Grado de saturación de aire vs. Resistividad eléctrica vs. Humedad natural Ga vs. ρ vs. W_{nat}	81%
Ensayo de penetración estándar vs. Resistividad eléctrica SPT vs. ρ	82%
Velocidad media de onda de corte vs. Resistividad eléctrica V_{S30} vs. ρ	73%
Ensayo de relación de soporte de California vs. Resistividad eléctrica CBR vs. ρ	66%

Autor: Jimmy Macas

Se puede establecer correlaciones indirectas con los distintos gráficos y ecuaciones encontrados, por ejemplo solo con el ensayo de resistividad eléctrica se puede determinar la densidad seca máxima de una muestra de suelo, primero se encuentra la humedad natural del suelo en la correlación N°7, con estos resultados se puede determinar la humedad óptima del suelo en la correlación N°13 y con estos valores se

encuentra la densidad seca máxima en la correlación N°16, estos resultados son confiables porque presentan un alto valor de r^2 y ya que los valores obtenidos con la aplicación de las correlaciones, en general, se acercan notablemente a los valores obtenidos en los ensayos. Las correlaciones que involucran la Humedad Natural, Índice plástico y %Pasa N°200 son susceptibles a cambios considerables si sobrepasan los valores límite indicados en la tabla de resumen o no se encuentran dentro de los rangos de la carta de plasticidad y granulométrica. Para determinar el valor de una de las propiedades, deberían analizarse varias alternativas de correlación, que permitan determinar el valor más representativo.

Estadísticamente existe el método de coeficiente de correlación de Pearson para aceptar o descartar una hipótesis planteada. Para efectuar la hipótesis en las correlaciones como la muestra es pequeña ($n < 30$) se emplea la distribución “t”.

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \quad \text{Ec.(68)}$$

Donde: r= Coeficiente de correlación

n= Número de pares observados.

El criterio se aplica cuando la hipótesis nula se formula en el sentido de que no existe correlación entre las variables, es decir, igual a 0, frente a la hipótesis alternativa que sea mayor a 0.

Entonces, del total de 18 correlaciones realizadas entre la resistividad con las propiedades índices y mecánicas. Un total de 7 son correlaciones simples y 11 del tipo múltiple. Se promedia el coeficiente de correlación, el número de muestras para cada caso y se determina la validación de hipótesis.

Correlaciones simples

n= 9

$r^2 = 78.71\% \rightarrow r = 0.8872$

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} = 0.8871 \sqrt{\frac{9-2}{1-(0.8872)^2}} = 5.0875 \quad \text{Ec.(69)}$$

Nivel de significación (α)= 5% =0.05

Grados de libertad (ν)= $n-2 = 9-2 = 7$

Mediante estos resultados se obtiene el valor de “Punto crítico” en la tabla de distribución “t” de Student (*Anexo 3*).

Punto crítico= 1.895

Si $t > \text{Punto Crítico}$: El resultado no entra en la zona de aceptación y por lo tanto no se acepta la Hipótesis nula.

Si $t < \text{Punto Crítico}$: El resultado entra en la zona de aceptación y por lo tanto se acepta la Hipótesis nula.

Como $5.0875 > 1.895$: Se rechaza la Hipótesis nula **H_0** , y se acepta la hipótesis alternativa **H_i** .

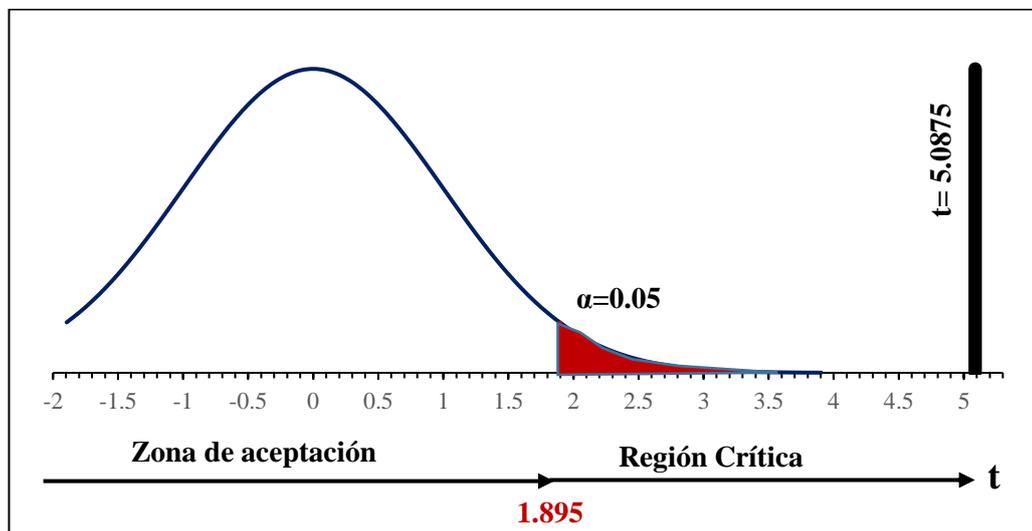


Figura 38. Curva de Gauss para correlaciones simples
Autor: Jimmy Macas

Correlaciones múltiples

$n = 9$

$r^2 = 80.45\% \rightarrow r = 0.8970$

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} = 0.897 \sqrt{\frac{9-2}{1-(0.897)^2}} = 5.369 \quad \text{Ec.(70)}$$

Nivel de significación (α)= 5% =0.05

Grados de libertad (ν)= $n-3 = 9-3 = 6$

Mediante estos resultados se obtiene el valor de “Punto crítico” en la tabla de distribución “t” de Student (*Anexo 3*).

Punto crítico= 1.943

Si $t > \text{Punto Crítico}$: El resultado no entra en la zona de aceptación y por lo tanto no se acepta la Hipótesis nula.

Si $t < \text{Punto Crítico}$: El resultado entra en la zona de aceptación y por lo tanto se acepta la Hipótesis nula.

Como $5.369 > 1.943$: Se rechaza la Hipótesis nula **H_0** , y se acepta la hipótesis alternativa **H_1** .

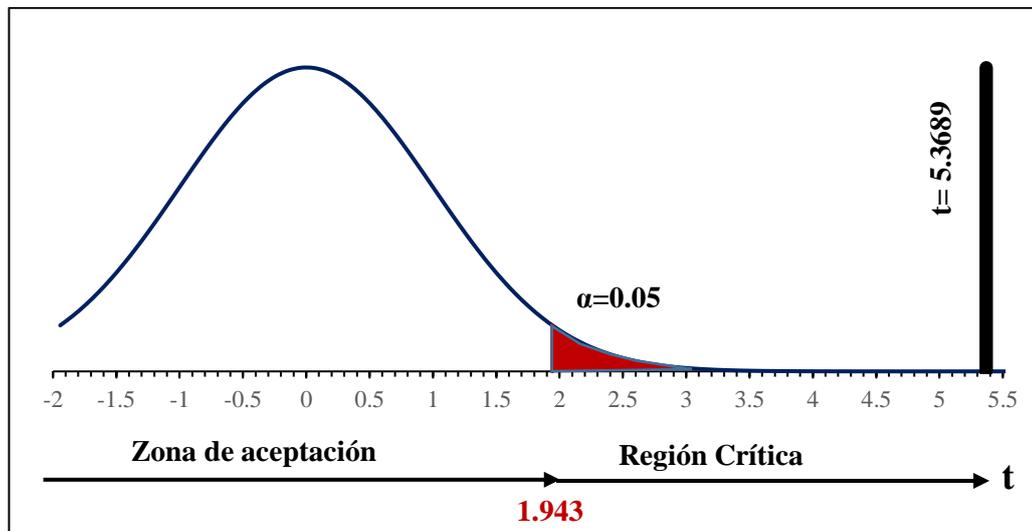


Figura 39. Curva de Gauss para correlaciones múltiples.

Autor: Jimmy Macas

H_0 : Hipótesis Nula

H_1 : Hipótesis Alternativa

H_0 : No se puede utilizar valores de resistividad eléctrica de suelos para correlacionar y obtener valores aproximados tanto de propiedades índices y mecánicas de suelos granulares en la ciudad de Ambato.

H_1 : Se puede utilizar valores de resistividad eléctrica de suelos para correlacionar y obtener valores aproximados tanto de propiedades índices y mecánicas de suelos granulares en la ciudad de Ambato.

Con el análisis realizado se acepta la Hipótesis Alternativa (**H_1**) el método de resistividad eléctrica si se puede utilizar para obtener valores aproximados de propiedades índices y mecánica de suelos granulares en la ciudad de Ambato.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Los suelos granulares estudiados en las 10 zonas planteadas corresponden a suelos del tipo: Arena limosa (SM), Arena Arcillosa (SC), y Arena pobremente graduada (SP) según las SUCS, y del tipo A-2-4, A-2-6 y A-3 según la AASHTO. Estos suelos tienen una considerable cantidad de arena y finos de baja plasticidad. Las correlaciones propuestas deberán ser aplicadas a este tipo de suelos, para los cuales su distribución granulométrica esté dentro del rango establecido tanto en la curva granulométrica como en la carta de plasticidad, y cuyas propiedades Índice y/o Mecánicas resulten cercanas.
- Los suelos granulares estudiados en las 10 zonas planteadas después de haber realizado el ensayo de gravedad específica corresponden a suelos de arena y arena limosa ya que entra en el rango de G_s (2.600 a 2.700), concordando con la clasificación granulométrica.
- Los valores CBR de laboratorio mayores para el 95% de la Densidad Seca Máxima corregidos son aceptables para su utilización en la construcción de Subrasante ya que dieron resultados entre 15.70% y 61.50%.
- Los resultados obtenidos indican que las resistividades eléctricas son sensibles a las variaciones del contenido de humedad cualquiera que sea la composición del suelo. Además, la resistividad eléctrica medida en el campo es inversamente proporcional al contenido de humedad ($\rho \propto 1/W_{nat}$) y se correlacionan mediante una función potencial.
- En suelos secos se presentan los mayores rangos de resistividad eléctrica en comparación a los suelos húmedos evidenciando la influencia del contenido de humedad.
- Los mayores valores de resistividad eléctrica de los suelos se obtuvieron en condiciones sueltas y con un bajo contenido de humedad siendo influenciado por la presencia de vacíos de aire.

- La medición de la resistividad eléctrica se presenta como una alternativa para medir indirectamente el contenido de humedad natural mediante correlaciones.
- En los resultados obtenidos se observaron que el grado de saturación puede ser correlacionado con la resistividad eléctrica, ésta es directamente proporcional al grado de saturación de aire ($\rho \propto G_a$), se correlacionan mediante una función potencial. Y en cambio es inversamente proporcional al grado de saturación de agua ($\rho \propto 1/G_w$), se correlacionan mediante una función polinomial. Eléctricamente la discontinuidad del agua de poro a un bajo contenido de humedad provoca una resistividad relativamente alta, mientras que, al aumentar el contenido de agua en el suelo la continuidad del agua de los poros mejora, causando una rápida disminución de la resistividad.
- La medición de la resistividad eléctrica se ve influenciada por la granulometría del suelo, en donde un suelo con más presencia de material fino opta por tener una resistividad baja, en cambio un suelo con partículas gruesas o arenas finas tiene una resistividad relativamente alta, es decir existe una relación directamente proporcional ($\rho \propto \%N^{\circ}200$), no se realizó ninguna correlación directa entre el porcentaje de partículas finas y la resistividad debido a su bajo coeficiente de determinación. Pero indirectamente si se puede determinar en la correlación N°10; N°14; N°15 y N°21.
- Los resultados de los límites de Atterberg indican una buena correlación entre el límite líquido, límite plástico y la resistividad eléctrica con un coeficiente de determinación $r^2 = 81\%$ se comportaron inversamente proporcional. Es decir si una muestra de suelo necesita mayor humedad para pasar de su condición sólido a plástico y por consiguiente a semilíquido va a tener una menor resistividad eléctrica ($\rho \propto 1/LL \propto 1/LP$). Los suelos con mayor índice de plasticidad, un mayor porcentaje de arcilla, o una fracción gruesa más pequeña generalmente tienen una menor resistividad eléctrica. La resistividad es inferior en suelo limoso probablemente a los mayores contenidos de mineral de arcilla, mientras que mayor resistividad en un suelo arenoso es el resultado del mineral predominantemente de cuarzo. Los resultados no son muy aceptables debido a que los ensayos en laboratorio se trabajan solo con su fracción fina de suelo y en condiciones más controladas, en cambio la

resistividad medida en campo toma en cuenta la fracción fina y gruesa así como el contenido de humedad natural.

- Los resultados obtenidos se observaron que el peso específico del suelo no tiene ninguna relación directa con la medida de la resistividad. La baja correlación podría deberse al hecho de que el peso unitario del suelo depende más de los constituyentes sólidos que la porción líquida del suelo mientras que la resistividad se ve afectada en gran medida por el contenido de humedad. La correlación entre el peso específico y la resistividad no son tan claras debido al reducido número de ensayos realizados, pero se ajustó mejor a una función lineal múltiple adicionando la humedad natural con un coeficiente de determinación $r^2 = 58\%$. Se entiende entonces que una muestra de poca humedad natural independientemente de los vacíos llenos de aire presentes en esta contribuye a un mayor peso específico y la resistividad en este caso va a ser alta.
- Según los resultados obtenidos en el proctor modificado existe una relación directamente proporcional entre la densidad seca máxima con la resistividad eléctrica de un suelo y la humedad óptima ($r^2=90\%$) y una relación directamente proporcional entre la humedad óptima y la resistividad con la humedad natural ($r^2=86\%$). Para determinar ambos parámetros se ajustaron mejor con una función lineal múltiple, en el cual interviene la humedad natural del suelo. Entonces para un suelo altamente saturado in-situ y que presente una resistividad alta va a necesitar una mayor humedad para llegar a su estado óptimo y alcanzar una densidad seca máxima más baja.
- Se puede establecer correlaciones indirectas con los distintos gráficos y ecuaciones encontrados para densidad seca máxima y humedad óptima. Los suelos con más porcentaje de partículas finas necesitan un mayor porcentaje de humedad para llegar a su estado óptimo que permite compactarlo al máximo con el menor esfuerzo y que hará que el suelo compactado alcance su permeabilidad más baja resultando una menor densidad seca máxima.
- Se concluye que existe una relación directamente proporcional entre el grado de compactación con el límite plástico y la resistividad ya que si el límite plástico aumenta el resultado para grado de compactación también aumenta, y si la resistividad aumenta el resultado para grado de compactación también va

a aumentar. Teóricamente esto no es así ya que se supone que un suelo más compactado genera menor resistividad. Probablemente esto se debe a la influencia y tendencia que genera el punto E7 teniendo la mayor $\rho(\Omega m)$ y $G_c(\%)$. De otra manera descartando este punto se observa que la tendencia es inversamente proporcional entre $\rho(\Omega m)$ y $G_c(\%)$. El resultado de la relación $G_c(\%)$ vs $\rho(\Omega m)$ está a libre discusión ya que interfieren distintos factores para sus resultados, siendo la humedad el más importante e influyente de todos. En resumen, mayor resistividad se genera en un suelo más compactado y con mayor límite plástico.

- La correlación obtenida entre el ensayo de penetración estándar y la resistividad eléctrica es una parábola por lo cual existe dos valores de resistividad para un mismo resultado de SPT. Entonces se asume que la resistividad en un rango de $(50\Omega m - 460\Omega m)$ tiene una relación inversamente proporcional con el SPT y que la resistividad en un rango de $(460\Omega m - 720\Omega m)$ tiene una relación directamente proporcional con el SPT. La relación directamente proporcional existe cuando la presencia de finos es escasa, independientemente de la humedad presente. Entonces si los resultados en campo son menores a $460\Omega m$ se asume que el suelo tiene una considerable presencia de material fino ($>M-C$). Y si los resultados en campo son mayores a $460\Omega m$ se asume que el suelo tiene poca presencia de material fino ($<M-L$).
- Se puede determinar parámetros útiles en el campo de la ingeniería civil ya que obtenido el valor de SPT se puede fácilmente determinar tanto su resistencia a la penetración y la presión admisible del suelo mediante las fórmulas: $R_p=(N^\circ*4)$ en Kg/cm^2 y $\sigma_{adm}=(N^\circ/10)$ en Kg/cm^2 así como la estimación del ángulo de fricción interna mediante ecuaciones o tablas normalizadas.
- La correlación obtenida entre el Ensayo de Relación de Soporte de California CBR y la resistividad eléctrica es una parábola invertida por lo cual existe dos valores de resistividad para un mismo resultado de CBR con un coeficiente de determinación bueno $r^2=66\%$. Entonces se asume que la resistividad en un rango de $(140\Omega m - 450\Omega m)$ tiene una relación directamente proporcional con el CBR y que la resistividad en un rango de $(450\Omega m - 720\Omega m)$ tiene una relación inversamente proporcional con el CBR. Si las mediciones en campo

son menores a $450\Omega\text{m}$ se asume que el suelo tiene una alta presencia de humedad. Y si los resultados en campo son mayores a $450\Omega\text{m}$ se asume que el suelo tiene poca presencia de humedad. Para ambos casos los resultados de CBR son desde 20% hasta 55%. Calificando como muy buenos para construcción de subrasante.

- Un suelo con alto valor de CBR, baja presencia de material fino y más arenoso que a su vez no se encuentre muy saturado in-situ va a ser un buen suelo para servirá como material de SUB-RASANTE en carreteras.
- Un suelo con baja presencia de material fino y más arenoso que a su vez necesite poca húmeda para llegar a su estado óptimo va a tener un valor de CBR menor en comparación a un suelo donde necesite mayor humedad para llegar a su estado óptimo.
- Un suelo que resulta muy sensible a los cambios de humedad (Arenas) va a tener como resultado un mayor CBR, según la correlación de CBR vs, Índice plástico y Humedad óptima con un coeficiente de determinación $r^2=72\%$.
- Si el suelo se encuentra en estado más sólido o si la humedad natural es mucho menor respecto a los límites líquido y plástico éste suelo va a optar por tener un valor de CBR mayor. Un suelo pre-consolidado es decir, un suelo que ha soportado presiones efectivas mayores a las encontradas al momento de la prueba por los estratos en estado natural va a soportar un mayor esfuerzo o un mayor CBR.
- El tamaño efectivo de las partículas (D_{10}) es un parámetro bien conocido en clasificación del suelo y la determinación de la permeabilidad. El tamaño efectivo D_{10} se refiere al tamaño del grupo de partículas que representan el 10% del material. Las arena limosas generalmente exhibe menor D_{10} que van desde 0.034 a 0.079 mm. Y las muestras de suelo de arena fina tienen un mayor D_{10} , valores que oscilan entre 0,10 y 0,11 mm. La correlación entre D_{10} y la resistividad eléctrica es eficaz para este tipo de suelos ya que su coeficiente de determinación $r^2=72\%$ y su gráfica es una parábola por lo cual existe dos valores de resistividad para un mismo resultado de D_{10} . Entonces se asume que la resistividad en un rango de ($50\Omega\text{m} - 250\Omega\text{m}$) tiene una relación inversamente proporcional con el D_{10} y que la resistividad en un rango de ($250\Omega\text{m} - 410\Omega\text{m}$) tiene una relación directamente proporcional con el D_{10} . La causa de este efecto

puede deberse a otras propiedades que influyen en la medición de resistividad como son la relación de vacíos y la humedad natural del suelo. La diferencia en tamaño de partículas es el motivo de diferentes comportamientos en arena-limosa y arena fina. En arena limosa las partículas finas tienden a reducir la permeabilidad y afectan a la transmisión de fluido que resulta en aumento de la resistividad. Los suelos arenosos tienen un tamaño de grano mayor que facilita la transmisión de iones en los poros de fluido que a su vez disminuye la resistividad eléctrica.

- La medición de la resistividad eléctrica es un método no destructivo y se podría aplicar para la estimación rápida de las propiedades del suelo. Las correlaciones obtenidas entre la resistividad eléctrica con varias propiedades índices y mecánicas muestran una mayor posibilidad de utilizar estudios de resistividad eléctrica como una eficaz herramienta de evaluación in-situ para la predicción de algunas propiedades del suelo.
- De los resultados anteriores se puede concluir que el contenido de humedad, límite líquido, límite plástico, porcentaje de finos, gravedad específica, densidad seca máxima, humedad óptima, SPT, CBR podrían ser estimados con las correlaciones de resistividad.
- Debido a que la investigación realizada es un proyecto Macro, se tendrá una mayor cantidad de muestras, por lo tanto con estas se generará mejor coeficiente de determinación en la regresión por mínimos cuadrados, entonces, tanto los ensayos de campo y laboratorio amplían sus rangos de trabajo y se tendrá una idea más clara de los fenómenos que ocurren en cada suelo.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar las mismas correlaciones pero con la resistividad eléctrica medida en laboratorio y así comparar sus resultados. Un método óptimo para obtener correlaciones entre la resistividad medida in-situ y otra en laboratorio sería realizando los ensayos para condiciones idénticas, con moldeo de muestras gemelas.
- Se recomienda trabajar diferentes tipos de suelo ya sean calizos, arcillosos, pedregosos, humíferos y mixtos, con el objetivo de obtener una mayor cantidad de resistividades y comparar los resultados de los parámetros previamente analizados en este trabajo.
- Los ensayos de resistividad se los deberá hacer en días favorables es decir sin la presencia de lluvia ya que la humedad es un factor muy influyente al momento de medir la resistividad, por lo que los resultados de correlaciones de verán afectados.
- Además, realizar estudios complementarios a esta investigación experimental que permita mejorar el conocimiento de las propiedades geotécnicas del suelo que influyen en el valor de la resistividad eléctrica. Dentro de los cuales se puede mencionar: Correlación entre la resistividad con la permeabilidad del suelo.
- Realizar la correlación entre la resistividad eléctrica con contenido de humedad y peso específico, bajo diferentes métodos de compactación (Proctor Estándar, Modificado y Reducido).
- Realizar la correlación entre resistividad eléctrica con propiedades químicas de los suelos (Contenido de sulfatos y hierros).

BIBLIOGRAFÍA

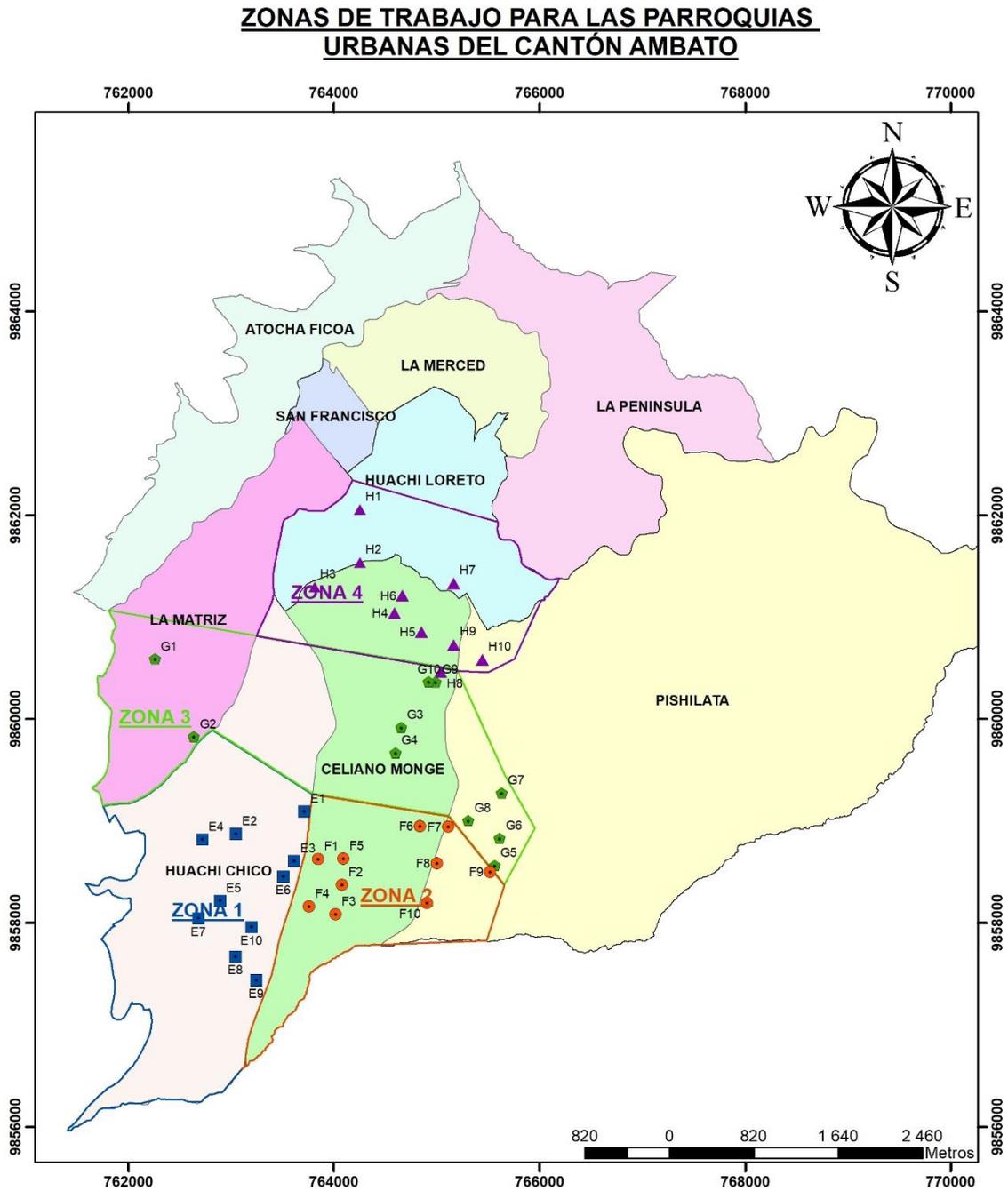
- [1] A. k. a. S. SyedIAE, «Correlation of Electrical Resistivity and SPT-N value from Standard Penetration Test (SPT) of Sandy Soil,» *Appl. Mech Master*, vol. 785, pp. 702-706, 2015.
- [2] t. C. H. B. a. L. R. B. Zeyad S. Abu-hassanein, «Electrical Resistivity of Compacted Clays,» *ASCELIBRARY*, pp. 1-10, 1996.
- [3] I. C. A. T. A. B. G. R. A. Samouëlian, «Electrical resistivity survey in soil science: a review,» *ELSEVIER*, p. 190, 2005.
- [4] S. O. F. I. S. M. Y. B. Syed Baharom, «Relationship of Plasticity Index of Soil with Laboratory and Field Electrical Resistivity Values,» *Scientific*, pp. 1-8, 2013.
- [5] A. V. E. L. a. F. G. E. Diego, Geotecnia y cimentaciones Norma Ecuatoriana de la Construcción, Ecuador, 2015.
- [6] F. Saddiqui, «Simple and multiple regression models for relationship between electrical resistivity and various soil properties for soil characterization,» *Springer*, pp. 259-267, 2012.
- [7] S. Iskandar, «Relationship of Plasticity Index of Soil with Laboratory and Field Electrical Resistivity Values.,» *Scientific*, vol. 356, pp. 719-724, 2013.
- [8] A. V. E. L. a. F. G. E. Diego, Peligro sísmico Norma Ecuatoriana de la Construcción, Ecuador, 2015.
- [9] M. H. et, «Soil Resistivity Measurements to Predict Moisture Content and Density in Loose and Dense Soil,» *Scientific*, vol. 356, pp. 911-917, 2013.
- [10] C. Park, «Experimental Study on Electrode Method for Electrical Resistivity Survey to Detect Cavities under Road Pavements,» *Sustainability*, pp. 1-22, 2017.
- [11] F. P. a. A. d. C. Pillajo, DETERMINACIÓN DEL CBR DE LABORATORIO EN SUELOS GRANULARES Y SU CORRELACIÓN CON EL DCP PARA LA APLICACIÓN EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS VECINALES,» PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR, Quito, 2001.
- [12] I. J. V. e. I. L. Benavides, ESTUDIO DE PELIGRO SÍSMICO DETERMINISTA PARA LAS ESTRUCTURAS DEL CANTÓN AMBATO, AMBATO, 2018.
- [13] M. M. E. R. Tester, «Users Guide for Earth Ground Resistance Tester,» Guayaquil, 2019.

- [14] I. S. R. Ing. Del Santo Matías, *Propiedades Índices de los suelos*, La Plata - Argentina, 2013.
- [15] I. A. F. G. Ing. Agr. L. Rucks, *Propiedades Físicas del suelos*, Montevideo-Uruguay, 2004.
- [16] J. B. y. R. Rodríguez, *Mecánica de suelos, Fundamentos de la mecánica de suelos*, Ciudad de Mexico, 2005.
- [17] V. I. A. Arango, *Manual de laboratorio de mecánica de suelos*, Medellín - Colombia, 2006.
- [18] C. Villalaz, *Mecánica de suelos y cimentaciones*, México D.F, 2017.
- [19] M. S. S. M. G. M. S. I. A. O. Huamán, *Diseño moderno de pavimentos asfálticos*, Lima -Perú, 2006.
- [20] J. M. Reynolds, de *An introduction to applied and Environmental Geophysics*, New-York, 1998, p. 418.
- [21] M. B. a. I. H. Philip Kearey, de *An introduction to geophysical Exploration*, Osney Mead, 2002, p. 418.
- [22] B. M. Das, *Fundamentos de ingeniería geotécnica*, México D.F, 2015.
- [23] M. G. Sánchez, *EVALUACIÓN DE LA TÉCNICA DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA PARA LA ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE RESIDUOS MINEROS*, Cartagena, 2013.
- [24] W. Lowrei, «Fundamentals of Geophysics,» 2013. [En línea]. Available: <http://ebooks.cambridge.org/ebook.jsf?bid=CBO9780511807107>. [Último acceso: 15 09 2019].
- [25] G. M. Aiassa, «Caracterización de procesos de infiltración en estado no saturado sobre suelos limosos compactados,» 2008. [En línea]. Available: <https://docplayer.es/65164424-Caracterizacion-de-procesos-de-infiltracion-en-estado-no-saturado-sobre-suelos-limosos-compactados.html>. [Último acceso: 10 09 2019].
- [26] J. Á. C. Uvidia, *Comportamiento de la resistividad eléctrica de los suelos ante variaciones de humedad y grado de compactación*, Cuenca, 2015.
- [27] R. R. Gómez, «Teoría y diseño de sistemas de tierras según las normas oficiales Mexicanas (NOM) E IEEE,» 2010. [En línea]. Available: <https://www.ruelsa.com/notas/tierras/pe01.html>. [Último acceso: 20 09 2019].
- [28] A. A. Hassan, «Electrical Resistivity Method for Water Content Characterisation of Unsaturated Clay Soil.,» 2014. [En línea]. Available: <http://etheses.dur.ac.uk/10806/>. [Último acceso: 23 08 2019].

- [29] P. Leonard J. Kazmier, Estadística aplicada a administración y economía., Mexico D.F, 2006.
- [30] C. M. Bercandino, Estadística y muestreo, Bogotá, 2012.
- [31] S. E. d. l. c. d. suelos, «Mapa de suelos del Ecuador,» 1986. [En línea]. Available: <http://repositorio.casadelacultura.gob.ec/handle/34000/17669>. [Último acceso: 01 10 2019].

ANEXOS

Anexo N° 1. Zonas de trabajo en las parroquias urbanas del Cantón Ambato

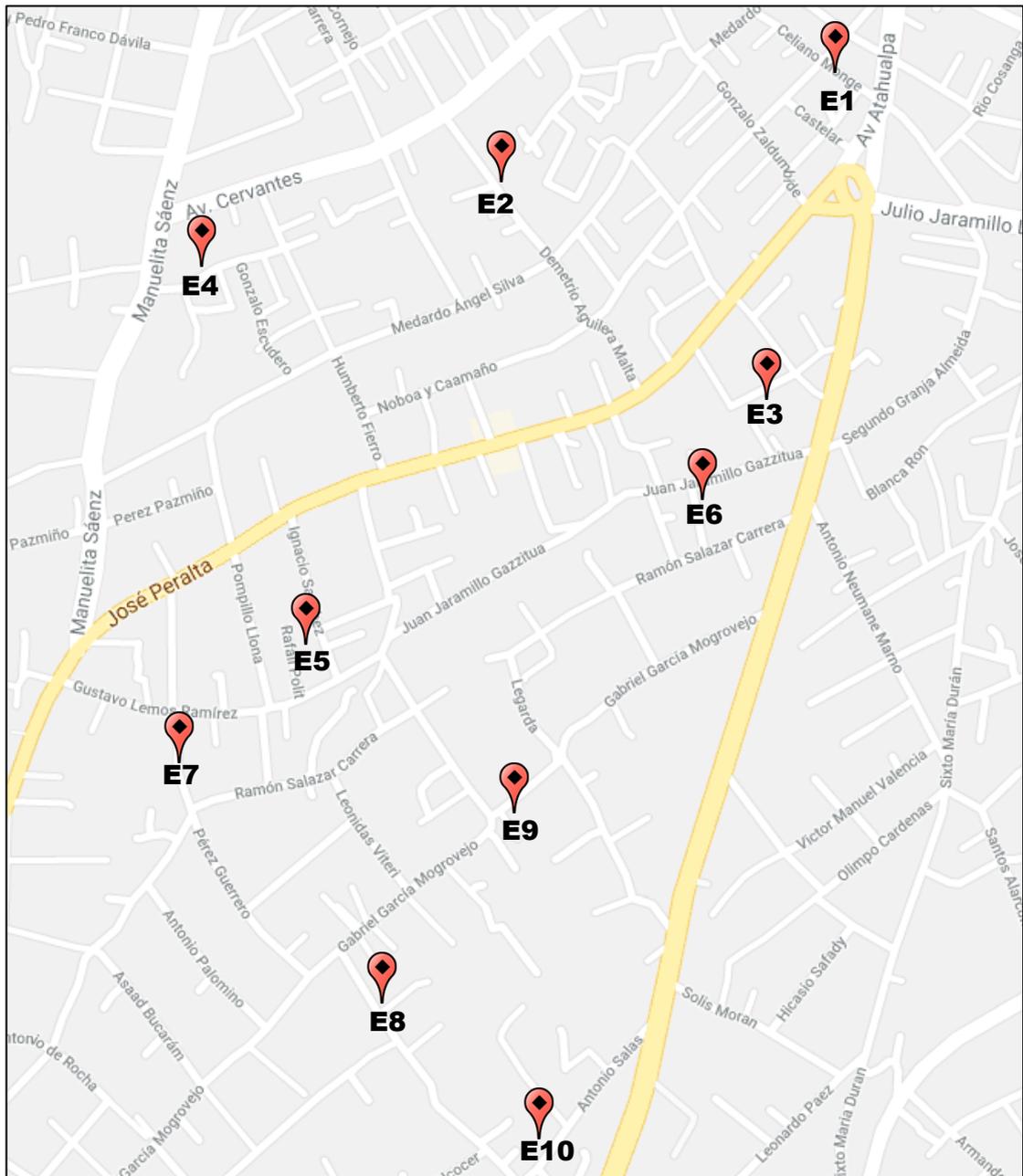


Zona	Parroquia	Investigador	N° Puntos	Id. Puntos
1	Huachi Chico	Jimmy Macas	10	E1-E2-E3-E4-E5 E6-E7-E8-E9-E10
2	Celiano Monge Pishilata	Esteban Tenecota	10	F1-F2-F3-F4-F5 F6-F7-F8-F9-F10
3	La Matriz Huachi Chico Celiano Monge Pishilata	Christian Pérez	10	G1-G2-G3-G4-G5 G6-G7-G8-G9-G10
4	Huachi Chico Celiano Monge	Patricio Mera	10	H1-H2-H3-H4-H5 H6-H7-H8-H9-H10

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica Carrera de Ingeniería Civil
ZONAS DE TRABAJO EN LAS ZONAS URBANAS DEL CANTÓN AMBATO
Investigadores: • Jimmy Macas • Christian Pérez • Esteban Tenecota • Patricio Mera
Escala: 1:50000 Fecha: Noviembre/2019 Lamina: L1

Fuente: ArcGIS
Autor: Jimmy Macas

Anexo N° 2. Puntos de recolección de muestras en la ZONA 1.



Fuente: Google Maps APIS

Anexo N° 3. Tabla de distribución “t” de Student

NIVEL DE SIGNIFICACIÓN PARA PRUEBAS DE UNA COLA						
Grados de libertad ν	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005	0,0005
	Nivel de significación para pruebas de dos colas					
	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,001
1	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	636,619
2	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	31,598
3	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	12,941
4	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610
5	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,859
6	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959
7	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	5,405
8	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	5,041
9	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781
10	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,587
11	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,437
12	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318
13	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	4,221
14	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140
15	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	4,073
16	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	4,015
17	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,965
18	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922
19	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,883
20	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,850
21	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,819
22	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,792
23	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,767
24	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,745
25	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,725
26	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,707
27	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,690
28	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,674
29	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,659
30	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,646
40	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,551
60	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,460
120	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617	3,373
∞	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,291

Fuente: Estadística y muestreo
 Autor: *Ciro Martínez Bencardino*

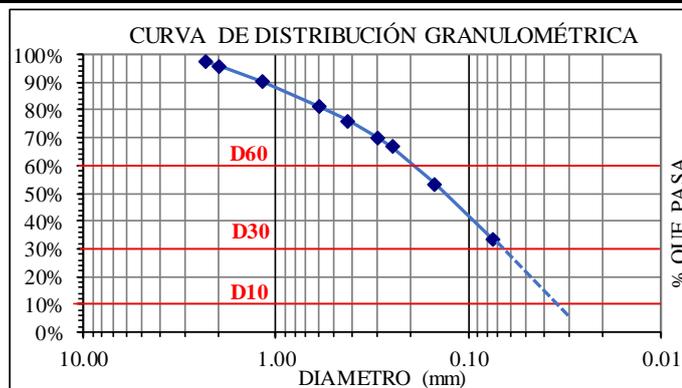
Anexo N° 4. Tablas de ensayos de las propiedades Índices y Mecánicas

 UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECANICA CARRERA DE INGENIERIA CIVIL					
TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO					
ENSAYO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA					
Elaborado por:	Jimmy Macas		Fecha:	18-jul-19	
Zona N°:	E1		Normativa:	IEEE STD 81-1983	
COORDENADAS (UTM)		Zona	Norte (m)	Este (m)	Elevación (m)
		17M	9859090	763711	2747
N° ensayo	1	2	3		
Resistividad ρ (Ω/m)	222.40	218.50	225.00		
Resistividad Prom. ρ (Ω/m)	221.97				
Resistencia R (Ω)	35.33				
 UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECANICA CARRERA DE INGENIERIA CIVIL					
TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO					
DENSIDAD DE CAMPO					
Elaborado por:	Jimmy Macas		Fecha:	18-jul-19	
Zona N°:	E1		Normativa:	AASHTO T 191 2014	
1. Contenido de Humedad					
N° Recipiente	14		42		
Masa suelo humedo + recipiente (gr)	113		108.2		
Masa suelo seco + recipiente (gr)	104.7		100.4		
Masa Recipiente (gr)	26.6		24.8		
Masa de agua W_w (gr)	8.3		7.8		
Masa suelo seco W_s (gr)	78.1		75.6		
Contenido de humedad (W%)	10.63%		10.32%		
W Promedio (%)	10.47%				
2. Determinación de la masa del Suelo Extraido					
Masa del suelo + recipiente (gr)			800.1		
Masa del recipiente (gr)			7.7		
Masa del suelo W_m (gr)			792.4		
3. Calibración del Cono de arena de Ottawa					
Masa inicial frasco + cono + arena (gr)			6348		
Masa final frasco + cono + arena (gr)			6005		
Masa Arena del Cono W_{sand} (gr)			343		
Volumen V_{sand} (cm^3)			209.44		
$\gamma_{sand} = W_{sand}/V_{sand}$ (gr/cm ³)			1.638		
4. Determinación de volumen del hueco en el suelo					
Lectura inicial frasco + cono + arena (gr)			7151		
Lectura final frasco + cono + arena (gr)			6107		
Masa de Arena en el hueco W_{sand} (gr)			701		
Volumen del suelo $V_m = W_{sand}/\gamma_{sand}$ (cm^3)			428.04		
5. Determinación del peso volumetrico de la masa					
$\gamma_m = W_m/V_m$ (gr/cm ³)			1.851		
6. Determinación del peso volumetrico seco					
$\gamma_d = \gamma_m/(1+w)$ (gr/cm ³)			1.676		
7. Determinación de la relación de Vacios (e)					
Peso específico relativo de los sólidos S_s			2.65		
Volumen de sólidos V_s (cm^3)			29.47		
Volumen de agua V_w (cm^3)			8.30		
Volumen de la muestra V_m (cm^3)			46.67		
Volumen de vacios V_v (cm^3)			17.20		
$e = V_v/V_s$			0.58		
8. Determinación de la Porosidad (n%)					
$n\% = V_v/V_m * 100$			36.85%		
9. Determinación del grado de saturación de agua y aire (Gw%) (Ga%)					
$G_w\% = V_w/V_v * 100$			48.26%		
$G_a\% = (V_v - V_w)/V_v * 100$			51.74%		



ENSAYO DE GRANULOMETRÍA

Elaborado por	Jimmy Macas		Fecha:	23-jul-19	
Zona N°:	E1		Normativa:	ASTM D-421-58 y AASHTO T-87-70	
PESO DE LA MUESTRA:	250	gr			
# Tamiz	Tamaño de partículas (mm)	P. Retenido Parcial	P. Retenido Acumulado	% Retenido	% Que pasa
#8	2.360	6.1	6.1	2.45%	97.55%
#10	2.000	3.7	9.8	3.94%	96.06%
#16	1.180	14.6	24.4	9.81%	90.19%
#30	0.600	22.1	46.5	18.70%	81.30%
#40	0.425	12.5	59.0	23.72%	76.28%
#50	0.300	14.8	73.8	29.67%	70.33%
#60	0.250	8.5	82.3	33.09%	66.91%
#100	0.150	33.1	115.4	46.40%	53.60%
#200	0.075	50.1	165.5	66.55%	33.45%
Pasa #200		83.2	83.2	33.45%	
TOTAL		248.7	248.7		
Resultados					
TNM	1.180	Cc:	5.59	Error permitido:	1.00%
D10	0.034			Error calculado:	0.52%
D30	0.067	Cu:	0.69	BIEN HECHO	
D60	0.190				
	Grava (G%)		Arena (S%)		Limo y Arcilla (finos%)
SUCS	0		67		33
AASHTO	2		65		33
SUCS	SC		Arena con arcilla de baja plasticidad		
AASHTO	A-2-4(0)		Arena arcillosa		



ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA PARA SUELOS FINOS

Elaborado por	Jimmy Macas		Fecha:	8-ago-19	
Zona N°:	E1		Normativa:	AASHTO T 100 2015	
GRAVEDAD ESPECÍFICA (Gs)					
Peso del picnómetro	165.40	gr	$G_s = \frac{W_s}{W_s + W_{pT} - W_{pws}} \times G_w \quad (2)$ <p>Donde:</p> <p>W_s es el peso en gramos de los sólidos</p> <p>W_{pT} es el peso del picnómetro + agua + suelo a temperatura Tx.</p> <p>G_w es la gravedad específica del agua a la temperatura Tx.</p>		
Temperatura del agua	23.50	°C			
Peso Picnómetro + agua (T°C) (W _{pT})	660.42	gr			
Peso Picnómetro+agua+suelo (W _{pws})	690.40	gr			
# Recipiente	B4				
Peso Recipiente	224.20	gr			
Peso Recipiente + suelo seco	271.80	gr			
Peso Suelo Seco (W _s)	47.60	gr			
Desplazamiento del agua (W _s +W _{pT} -W _{pws})	17.62	ml			
Factor de corrección por temperatura (K)	0.9992				
Gravedad Específica (G _s)	2.699				



TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADO "B"

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	29-jul-19
Zona N°:	E1	Normativa:	AASHTO T-180 y ASTM D-1557

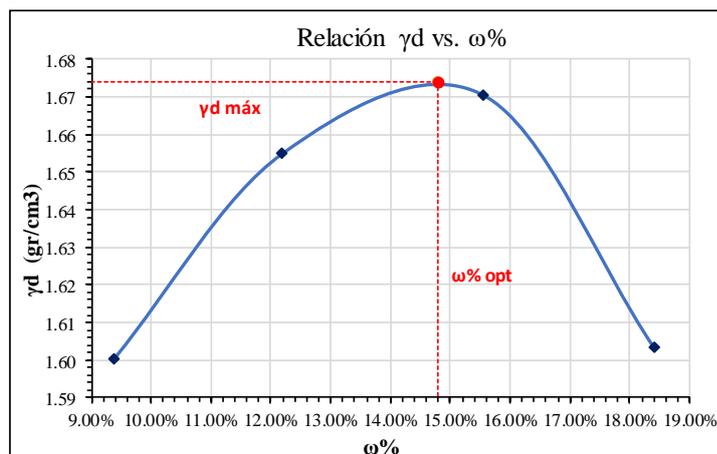
ESPECIFICACIONES DEL ENSAYO

N° de Golpes:	56	N° de capas:	5	Peso martillo:	10 lb
Altura de caída:	18" o 1.5ft	Volumen molde:	2328.79		cm ³
Peso molde:	14805	gr	Diámetro:	15.22	cm
Energía de compactación:	55986	lb/ft/ft ³	Altura:	12.8	cm
Ensayo número	1	2	3	4	
Peso inicial deseado (gr)	6000	6000	6000	6000	
Humedad inicial añadida (%)	6	9	12	15	
P. molde + suelo húmedo (gr)	18882	19129	19300	19226	
Peso suelo húmedo (gr)	4077	4324	4495	4421	
Peso unitario húmedo γ_m (gr/cm ³)	1.751	1.857	1.930	1.898	

CONTENIDO DE HUMEDAD

# Recipiente	A	B	C	D	E	F	G	H
R. + Suelo húmedo (gr)	74.4	73.9	76.2	76.0	68.3	70.0	75.9	73.1
R. + Suelo seco (gr)	68.9	68.4	69.2	68.6	60.5	61.8	65.8	63.1
Peso agua (gr)	5.5	5.5	7.0	7.4	7.8	8.2	10.1	10.0
Peso recipiente (gr)	10.0	10.1	9.9	9.8	9.7	9.7	9.9	9.7
Peso suelo seco (gr)	58.9	58.3	59.3	58.8	50.8	52.1	55.9	53.4
Contenido humedad $\omega\%$	9.3%	9.4%	11.8%	12.6%	15.4%	15.7%	18.1%	18.7%
Cont. Humedad prom. $\omega\%$	9.39%		12.19%		15.55%		18.40%	
Densidad seca γ_d (gr/cm ³)	1.600		1.655		1.670		1.603	
γ_d Máxima (gr/cm ³)	1.674							
$\omega\%$ optimo	14.80%							
Grado de compactación G_c (%)	100%							

Observaciones:





TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO

ENSAYO DE LÍMITE PLÁSTICO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	13-ago-19
Zona N°:	E1	Normativa:	AASHTO T-90-70

LÍMITE PLÁSTICO

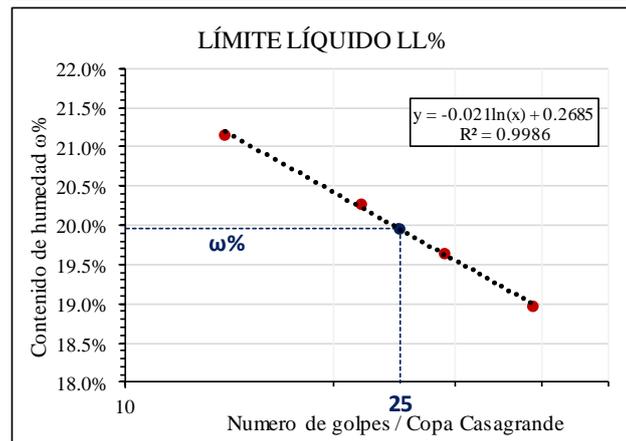
Número de muestra	1	2	3	4	5
# Recipiente	57	64	83	33	20
Masa Recipiente (gr)	6.00	6.10	6.10	6.10	6.00
Masa Muestra Húmeda + Recipiente (gr)	7.10	7.00	7.10	7.10	7.00
Masa Muestra seca + Recipiente (gr)	7.00	6.90	7.00	7.00	6.90
Masa Agua (gr)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Masa Muestra seca (gr)	1.00	0.80	0.90	0.90	0.90
Contenido de humedad (%)	10.0%	12.5%	11.1%	11.1%	11.1%
ω% promedio	11.17%				
Límite Plástico %	11.17%				

ENSAYO DE LÍMITE LIQUIDO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	14-ago-19
Zona N°:	E1	Normativa:	AASHTO T-90-70 y ASTM D-424-71

LÍMITE LÍQUIDO

# Recipiente	34	44	35	36	7A	77	12	16
Peso Recipiente (gr)	6.2	6.2	6.1	6.0	6.0	7.4	7.4	7.4
Peso Muestra Húmeda + Recipiente (gr)	15.3	16.0	14.0	14.7	14.5	15.4	17.7	17.8
Peso Muestra seca + Recipiente (gr)	13.7	14.3	12.7	13.2	13.2	14.0	16.1	16.1
Peso Agua (gr)	1.6	1.7	1.3	1.5	1.3	1.4	1.6	1.7
Peso de la muestra seca (gr)	7.5	8.1	6.6	7.2	7.2	6.6	8.7	8.7
Contenido de humedad (ω%)	21.3%	21.0%	19.7%	20.8%	18.1%	21.2%	18.4%	19.5%
ω% promedio	21.16%		20.27%		19.63%		18.97%	
Número de golpes	14		22		29		39	



ÍNDICE PLÁSTICO	
Límite Plástico Lp%:	11.17
Límite Líquido Ll%:	19.96
ÍNDICE PLÁSTICO Ip:	Ip= Ll - Lp
ÍNDICE PLÁSTICO Ip:	8.79

N° golpes :	25	LL = A*Ln(25)+B	
A=	-0.0214	LÍMITE LÍQUIDO	19.96%
B=	0.2685	LL%	



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



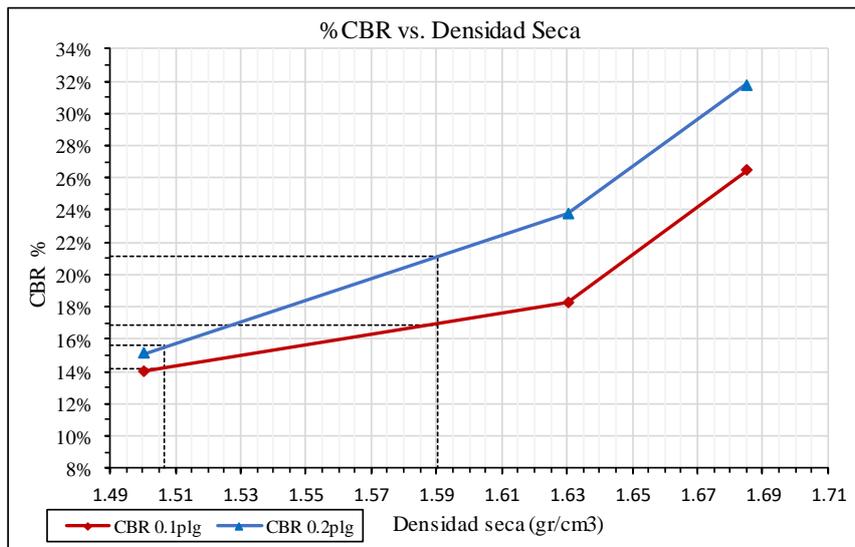
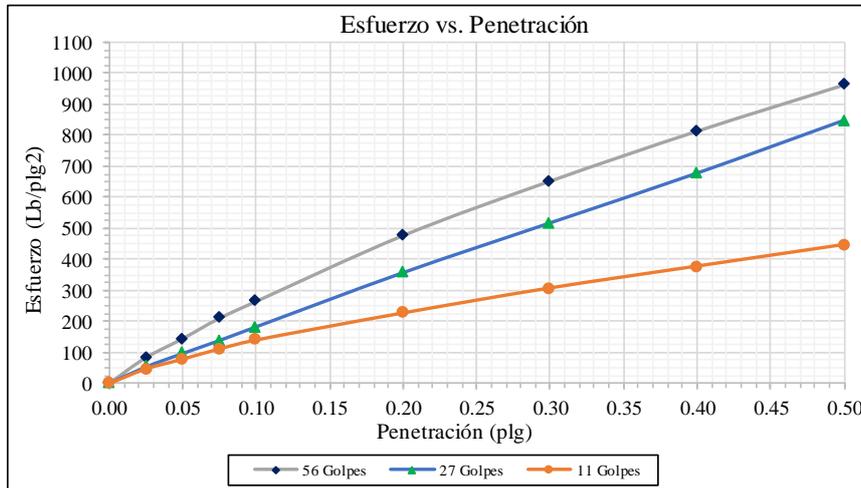
TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO
ENSAYO CBR DE LABORATORIO

Elaborado por:	Jimmy Macas		Fecha:	22-ago-19		
Zona N°:	EI		Normativa:	ASTM: D1883-73-AASHTO:T-193-63		
DATOS DE MOLDEO						
N° Molde	56A		27A		11A	
N° golpes por capa	56		27		11	
Muestra Húmeda + molde (gr)	14040		11022		10603	
Masa del molde (gr)	9636		6724		6681	
Masa muestra húmeda (gr)	4404		4298		3922	
Volumen de muestra (cm ³)	2277.36		2290.01		2244.32	
Peso unitario húmedo (gr/cm ³)	1.934		1.877		1.748	
CONTENIDO DE HUMEDAD						
	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
N° recipiente	6	7	3	8	1	25
Masa suelo húmedo + recipiente (gr)	101.2	117.2	108.2	109.2	185.5	123.9
Masa suelo seco + recipiente (gr)	93.6	107.9	98.8	99.9	171	112.4
Masa del agua (gr)	7.6	9.3	9.4	9.3	14.50	11.5
Masa del recipiente (gr)	43.3	43.4	34.2	40.7	80.4	44.6
Masa suelo seco (gr)	50.3	64.5	64.6	59.2	90.6	67.8
Contenido de humedad ω%	15.11%	14.42%	14.55%	15.71%	16.00%	16.96%
ω% Promedio	14.76%		15.13%		16.48%	
Peso unitario seco (gr/cm ³)	1.685		1.630		1.500	
DATOS DESPUÉS DE LA SATURACIÓN						
Muestra húmeda + molde (gr)	14169		11203		10933	
Masa Molde (gr)	9636		6724		6681	
Masa muestra húmeda (gr)	4533		4479		4252	
Masa agua absorbida (gr)	129		181		330	
% Agua absorbida	2.93%		4.21%		8.41%	
Esponjamiento inicial	1.20		1.15		2.45	
Esponjamiento final	1.27		1.28		3.00	
Esponjamiento total	0.07		0.13		0.55	
CONTENIDO DE HUMEDAD						
	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
N° recipiente	1	2	5	6	11	15
Masa suelo húmedo + recipiente (gr)	108.7	113.5	115.5	117	113.8	113
Masa suelo seco + recipiente (gr)	96.3	100.7	101.3	103	98.9	98.5
Masa del agua (gr)	12.4	12.8	14.2	14	14.9	14.5
Masa del recipiente (gr)	35.5	35.7	35.8	36.6	35.7	36
Masa suelo seco (gr)	60.8	65	65.5	66.4	63.2	62.5
Contenido de humedad ω%	20.39%	19.69%	21.68%	21.08%	23.58%	23.20%
ω% Promedio	20.04%		21.38%		23.39%	
ENSAYO						
N° MOLDE	1		2		3	
Penetración (p1g)	dial (lb)	Presión (lb/p1g2)	dial (lb)	Presión (lb/p1g2)	dial (lb)	Presión (lb/p1g2)
0.000	0	0.00	0	0.00	0	0.00
0.025	249	83.00	160	53.33	140	46.67
0.050	433	144.33	290	96.67	235	78.33
0.075	630	210.00	415	138.33	333	111.00
0.100	793	264.33	547	182.33	419	139.67
0.200	1430	476.67	1070	356.67	679	226.33
0.300	1956	652.00	1550	516.67	919	306.33
0.400	2439	813.00	2030	676.67	1129	376.33
0.500	2886	962.00	2540	846.67	1336	445.33
PORCENTAJES CBR (Corregidos)						
N° MOLDE	Presión	CBR 0.1	Densidad	Presión	CBR 0.2 p1g	Densidad
56A	264.33	26.433%	1.685	476.67	31.778%	1.685
27A	182.33	18.233%	1.630	356.67	23.778%	1.630
11A	139.67	13.967%	1.500	226.33	15.089%	1.500



TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO
ENSAYO CBR DE LABORATORIO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	22-ago-19
Zona N°:	EI	Normativa:	ASTM: D1883-73-AASHTO:T-193-63



DENSIDAD SECA MÁXIMA	1.674 gr/cm ³
----------------------	--------------------------

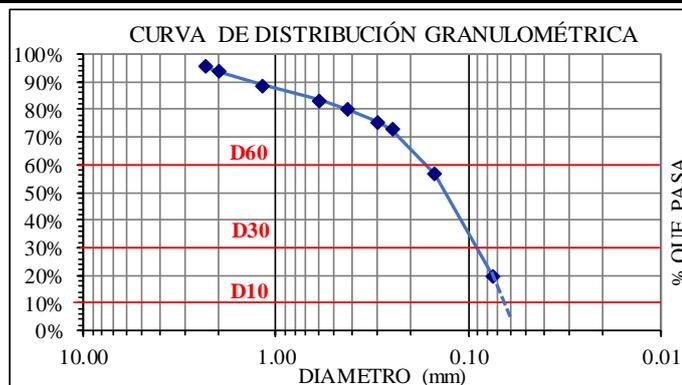
	DSM	% CBR 0.1plg	% CBR 0.2plg	% CBR MAYOR
90%	1.507	14.20%	15.60%	15.60%
95%	1.590	16.90%	21.10%	21.10%

 UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECANICA CARRERA DE INGENIERIA CIVIL 				
TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO				
ENSAYO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA				
Elaborado por:	Jimmy Macas		Fecha:	25-jun-19
Zona N°:	E2		Normativa:	IEEE STD 81-1983
COORDENADAS (UTM)		Zona	Norte (m)	Este (m)
		17M	9868885	763068
				Elevación (m)
				2791
N° ensayo	1	2	3	
Resistividad ρ (Ω/m)	126.10	134.40	153.90	
Resistividad Prom. ρ (Ω/m)	138.13			
Resistencia R (Ω)	21.9			
 UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECANICA CARRERA DE INGENIERIA CIVIL 				
TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO				
DENSIDAD DE CAMPO				
Elaborado por:	Jimmy Macas		Fecha:	25-jun-19
Zona N°:	E2		Normativa:	AASHTO T 191 2014
1. Contenido de Humedad				
N° Recipiente	68		63	
Masa suelo humedo + recipiente (gr)	105.1		109.6	
Masa suelo seco + recipiente (gr)	96.9		101.1	
Masa Recipiente (gr)	30.8		31.2	
Masa de agua W_w (gr)	8.2		8.5	
Masa suelo seco W_s (gr)	66.1		69.9	
Contenido de humedad (W%)	12.41%		12.16%	
W Promedio (%)	12.28%			
2. Determinación de la masa del Suelo Extraído				
Masa del suelo + recipiente (gr)	2194.00			
Masa del recipiente (gr)	9.20			
Masa del suelo W_m (gr)	2184.8			
3. Calibración del Cono de arena de Ottawa				
Masa inicial frasco + cono + arena (gr)	6217.40			
Masa final frasco + cono + arena (gr)	4725.40			
Masa Arena del Cono W_{sand} (gr)	1492			
Volumen V_{sand} (cm^3)	926.58			
$\gamma_{sand} = W_{sand}/V_{sand}$ (gr/cm ³)	1.610			
4. Determinación de volumen del hueco en el suelo				
Lectura inicial frasco + cono + arena (gr)	5840.4			
Lectura final frasco + cono + arena (gr)	1914.4			
Masa de Arena en el hueco W_{sand} (gr)	2434			
Volumen del suelo $V_m = W_{sand}/\gamma_{sand}$ (cm^3)	1511.59			
5. Determinación del peso volumetrico de la masa				
$\gamma_m = W_m/V_m$ (gr/cm ³)	1.445			
6. Determinación del peso volumetrico seco				
$\gamma_d = \gamma_m/(1+w)$ (gr/cm ³)	1.287			
7. Determinación de la relación de Vacios (e)				
Peso específico relativo de los sólidos S_s	2.65			
Volumen de sólidos V_s (cm^3)	24.94			
Volumen de agua V_w (cm^3)	8.20			
Volumen de la muestra V_m (cm^3)	51.41			
Volumen de vacios V_v (cm^3)	26.46			
$e = V_v/V_s$	1.06			
8. Determinación de la Porosidad (n%)				
$n\% = V_v/V_m * 100$	51.48%			
9. Determinación del grado de saturación de agua y aire (Gw%) (Ga%)				
$G_w\% = V_w/V_v * 100$	30.99%			
$G_a\% = (V_v - V_w)/V_v * 100$	69.01%			



ENSAYO DE GRANULOMETRÍA

Elaborado por	Jimmy Macas		Fecha:	22-jul-19	
Zona N°:	E2		Normativa:	ASTM D-421-58 y AASHTO T-87-70	
PESO DE LA MUESTRA:			250	gr	
# Tamiz	Tamaño de partículas (mm)	P. Retenido Parcial	P. Retenido Acumulado	% Retenido	% Que pasa
#8	2.360	10.8	10.8	4.35%	95.65%
#10	2.000	4.2	15.0	6.05%	93.95%
#16	1.180	12.6	27.6	11.13%	88.87%
#30	0.600	13.5	41.1	16.57%	83.43%
#40	0.425	8.1	49.2	19.84%	80.16%
#50	0.300	11.2	60.4	24.35%	75.65%
#60	0.250	6.9	67.3	27.14%	72.86%
#100	0.150	40.3	107.6	43.39%	56.61%
#200	0.075	91.5	199.1	80.28%	19.72%
Pasa #200		48.9	48.9	19.72%	
TOTAL		248.0	248.0		
Resultados					
TNM	2.360	Cc:	2.62	Error permitido:	1.00%
D10	0.065			Error calculado:	0.80%
D30	0.090	Cu:	0.73	BIEN HECHO	
D60	0.170				
	Grava (G%)		Arena (S%)		Limo y Arcilla (finos%)
SUCS	0		80		10
AASHTO	4		76		10
SUCS	SC	Arena con arcilla de baja plasticidad			
AASHTO	A-2-4(0)	Arena arcillosa			



ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA PARA SUELOS FINOS

Elaborado por	Jimmy Macas	Fecha:	8-ago-19
Zona N°:	E2	Normativa:	AASHTO T 100 2015
GRAVEDAD ESPECÍFICA (Gs)			
Peso del picnómetro	165.40	gr	$G_s = \frac{W_s}{W_s + W_{pt} - W_{pws}} \times G_w (2)$ <p>Donde: W_s es el peso en gramos de los sólidos W_{pws} es el peso del picnómetro + agua + suelo a temperatura T_x. G_w es la gravedad específica del agua a la temperatura T_x.</p>
Temperatura del agua	23.00	°C	
Peso Picnómetro + agua (W_{pt})	660.46	gr	
Peso Picnómetro+agua+suelo (W_{pws})	689.80	gr	
# Recipiente	01-012		
Peso Recipiente	199.70	gr	
Peso Recipiente + suelo seco	246.80	gr	
Peso Suelo Seco (W_s)	47.10	gr	
Desplazamiento del agua ($W_s + W_{pt} - W_{pws}$)	17.76	ml	
Factor de corrección por temperatura (K)	0.9993		
Gravedad Específica (G_s)	2.650		



TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADO "B"

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	26-jul-19
Zona N°:	E2	Normativa:	AASHTO T-180 y ASTM D-1557

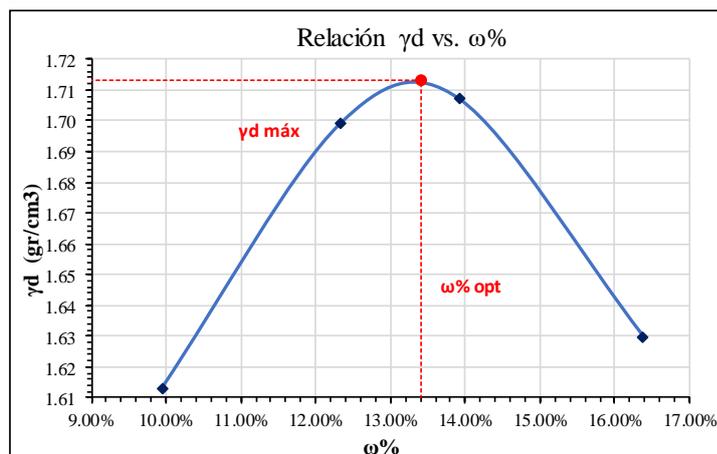
ESPECIFICACIONES DEL ENSAYO

N° de Golpes:	56	N° de capas:	5	Peso martillo:	10 lb
Altura de caída:	18" o 1.5ft	Volumen molde:	2328.79	cm ³	
Peso molde:	14805	gr	Diámetro:	15.22	cm
Energía de compactación:	55986	lb/ft ³	Altura:	12.8	cm
Ensayo número	1	2	3	4	
Peso inicial deseado (gr)	6000	6000	6000	6000	
Humedad inicial añadida (%)	6	9	12	15	
P. molde + suelo húmedo (gr)	18935	19249	19334	19222	
Peso suelo húmedo (gr)	4130	4444	4529	4417	
Peso unitario húmedo γ_m (gr/cm ³)	1.773	1.908	1.945	1.897	

CONTENIDO DE HUMEDAD

# Recipiente	13	14	17	18	19	20	21	22
R. + Suelo húmedo (gr)	101.1	102.4	112.6	111.2	107.3	109.4	105.3	104.4
R. + Suelo seco (gr)	95.3	96.3	105.0	104.0	100.0	101.1	96.7	96.1
Peso agua (gr)	5.8	6.1	7.6	7.2	7.3	8.3	8.6	8.3
Peso recipiente (gr)	36.0	36.0	44.5	44.4	45.1	44.0	44.6	45.0
Peso suelo seco (gr)	59.3	60.3	60.5	59.6	54.9	57.1	52.1	51.1
Contenido humedad $\omega\%$	9.8%	10.1%	12.6%	12.1%	13.3%	14.5%	16.5%	16.2%
Cont. Humedad prom. $\omega\%$	9.95%		12.32%		13.92%		16.37%	
Densidad seca γ_d (gr/cm ³)	1.613		1.699		1.707		1.630	
γ_d Máxima (gr/cm ³)	1.713							
$\omega\%$ optimo	13.40%							
Grado de compactación Gc (%)	75%							

Observaciones:





TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO

ENSAYO DE LÍMITE PLÁSTICO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	13-ago-19
Zona N°:	E2	Normativa:	AASHTO T-90-70

LÍMITE PLÁSTICO

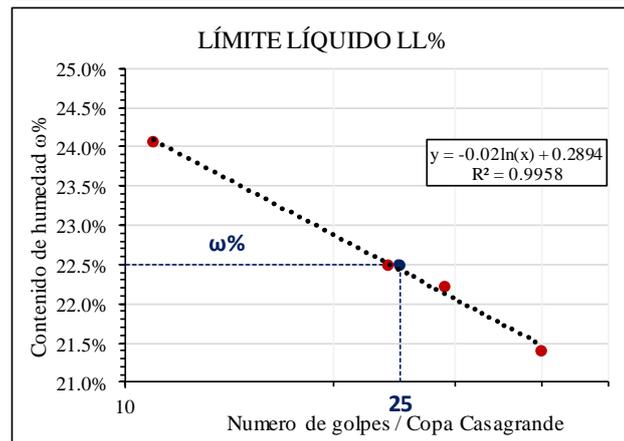
Número de muestra	1	2	3	4	5
# Recipiente	1	84	75	78	4
Masa Recipiente (gr)	4.30	4.10	4.20	4.40	4.20
Masa Muestra Húmeda + Recipiente (gr)	5.20	5.30	5.20	5.30	5.50
Masa Muestra seca + Recipiente (gr)	5.10	5.20	5.10	5.20	5.30
Masa Agua (gr)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20
Masa Muestra seca (gr)	0.80	1.10	0.90	0.80	1.10
Contenido de humedad (%)	12.5%	9.1%	11.1%	12.5%	18.2%
$\omega\%$ promedio	12.68%				
Límite Plástico %	12.68%				

ENSAYO DE LÍMITE LIQUIDO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	16-ago-19
Zona N°:	E2	Normativa:	AASHTO T-90-70 y ASTM D-424-71

LÍMITE LÍQUIDO

# Recipiente	20	33	34	36	42	64	18A	55
Peso Recipiente (gr)	6.0	6.1	6.2	6.0	6.1	6.0	6.1	6.1
Peso Muestra Húmeda + Recipiente (gr)	11.2	10.7	9.7	9.6	10.0	9.8	10.5	10.2
Peso Muestra seca + Recipiente (gr)	10.2	9.8	9.0	9.0	9.3	9.1	9.7	9.5
Peso Agua (gr)	1.0	0.9	0.7	0.6	0.7	0.7	0.8	0.7
Peso de la muestra seca (gr)	4.2	3.7	2.8	3.0	3.2	3.1	3.6	3.4
Contenido de humedad ($\omega\%$)	23.8%	24.3%	25.0%	20.0%	21.9%	22.6%	22.2%	20.6%
$\omega\%$ promedio	24.07%		22.50%		22.23%		21.41%	
Número de golpes	11		24		29		40	



ÍNDICE PLÁSTICO	
Límite Plástico Lp%:	12.68
Límite Líquido Ll%:	22.5
ÍNDICE PLÁSTICO Ip:	$I_p = L_l - L_p$
ÍNDICE PLÁSTICO Ip:	9.82

N° golpes :	25	$LL = A * \ln(25) + B$	
A=	-0.02	LÍMITE LÍQUIDO	22.50%
B=	0.2894	LL%	



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



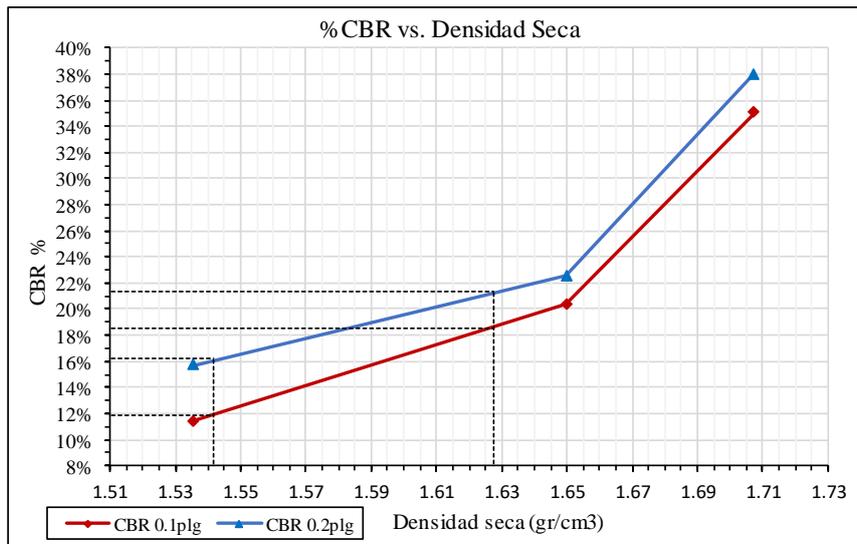
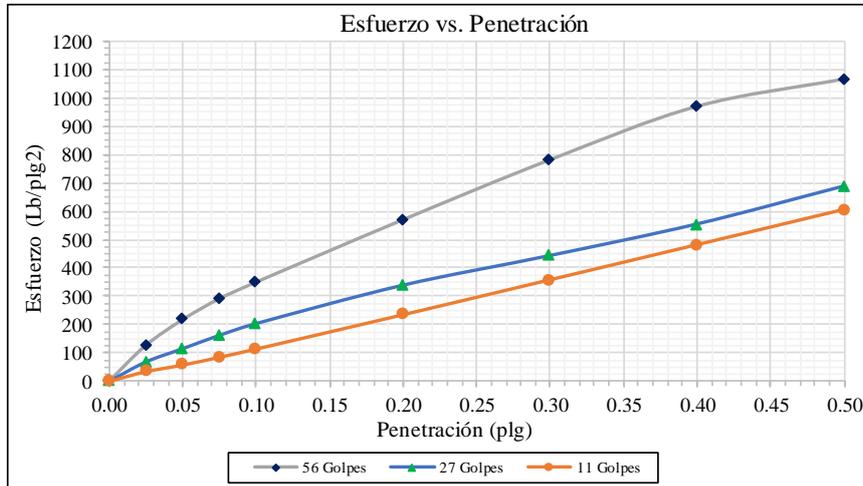
TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO
ENSAYO CBR DE LABORATORIO

Elaborado por:	Jimmy Macas		Fecha:	22-ago-19		
Zona N°:	E2		Normativa:	ASTM: D1883-73-AASHTO:T-193-63		
DATOS DE MOLDEO						
N° Molde	56A		27A		11A	
N° golpes por capa	56		27		11	
Muestra Húmeda + molde (gr)	14048		11039		10645	
Masa del molde (gr)	9636		6724		6681	
Masa muestra húmeda (gr)	4412		4315		3964	
Volumen de muestra (cm ³)	2277.36		2290.01		2244.32	
Peso unitario húmedo (gr/cm ³)	1.937		1.884		1.766	
CONTENIDO DE HUMEDAD						
	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
N° recipiente	A	B	D	E	F	G
Masa suelo húmedo + recipiente (gr)	67.6	74.4	75	84.5	76.5	81.4
Masa suelo seco + recipiente (gr)	60.7	66.8	66.7	75.4	67.7	72.1
Masa del agua (gr)	6.9	7.6	8.3	9.1	8.80	9.3
Masa del recipiente (gr)	9.9	10	9.8	9.7	9.6	9.8
Masa suelo seco (gr)	50.8	56.8	56.9	65.7	58.1	62.3
Contenido de humedad ω%	13.58%	13.38%	14.59%	13.85%	15.15%	14.93%
ω% Promedio	13.48%		14.22%		15.04%	
Peso unitario seco (gr/cm ³)	1.707		1.650		1.535	
DATOS DESPUÉS DE LA SATURACIÓN						
Muestra húmeda + molde (gr)	14183		11235		10975	
Masa Molde (gr)	9636		6724		6681	
Masa muestra húmeda (gr)	4547		4511		4294	
Masa agua absorbida (gr)	135		196		330	
% Agua absorbida	3.06%		4.54%		8.32%	
Esponjamiento inicial	2.10		2.66		6.71	
Esponjamiento final	2.22		2.81		7.1	
Esponjamiento total	0.12		0.15		0.39	
CONTENIDO DE HUMEDAD						
	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
N° recipiente	1	2	5	6	11	15
Masa suelo húmedo + recipiente (gr)	109	105.6	87.3	88.4	101.5	125.3
Masa suelo seco + recipiente (gr)	96.2	93.4	78	78.7	89.1	107.9
Masa del agua (gr)	12.8	12.2	9.3	9.7	12.4	17.4
Masa del recipiente (gr)	35.6	37.7	35.8	36.6	35.7	36
Masa suelo seco (gr)	60.6	55.7	42.2	42.1	53.4	71.9
Contenido de humedad ω%	21.12%	21.90%	22.04%	23.04%	23.22%	24.20%
ω% Promedio	21.51%		22.54%		23.71%	
ENSAYO						
N° MOLDE	1		2		3	
Penetración (p1g)	dial (lb)	Presión (lb/p1g2)	dial (lb)	Presión (lb/p1g2)	dial (lb)	Presión (lb/p1g2)
0.000	0	0.00	0	0.00	0	0.00
0.025	380	126.67	205	68.33	103	34.33
0.050	653	217.67	345	115.00	173	57.67
0.075	875	291.67	486	162.00	255	85.00
0.100	1050	350.00	610	203.33	342	114.00
0.200	1711	570.33	1015	338.33	704	234.67
0.300	2345	781.67	1328	442.67	1073	357.67
0.400	2910	970.00	1660	553.33	1443	481.00
0.500	3200	1066.67	2060	686.67	1815	605.00
PORCENTAJES CBR (Corregidos)						
N° MOLDE	Presión	CBR 0.1	Densidad	Presión	CBR 0.2 p1g	Densidad
56A	350.00	35.00%	1.707	570.33	38.02%	1.707
27A	203.33	20.33%	1.650	338.33	22.56%	1.650
11A	114.00	11.40%	1.535	234.67	15.64%	1.535



TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO
ENSAYO CBR DE LABORATORIO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	22-ago-19
Zona N°:	E2	Normativa:	ASTM: D1883-73-AASHTO:T-193-63



DENSIDAD SECA MÁXIMA	1.713 gr/cm³
----------------------	--------------

DSM	% CBR 0.1plg	% CBR 0.2plg	% CBR MA YOR
90%	1.542	11.90%	16.20%
95%	1.627	18.50%	21.30%

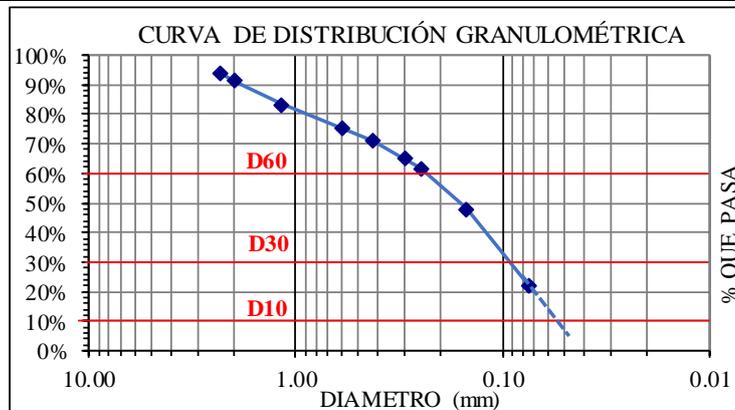
 UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECANICA CARRERA DE INGENIERIA CIVIL 				
TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO				
ENSAYO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA				
Elaborado por:	Jimmy Macas		Fecha:	10-jun-19
Zona N°:	E3		Normativa:	IEEE STD 81-1983
COORDENADAS (UTM)		Zona	Norte (m)	Este (m)
		17M	9858627	753598
Elevación (m)		2779		
N° ensayo	1	2	3	
Resistividad ρ (Ω/m)	241.20	227.40	268.90	
Resistividad Prom. ρ (Ω/m)	245.83			
Resistencia R (Ω)	39.5			
 UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECANICA CARRERA DE INGENIERIA CIVIL 				
TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO				
DENSIDAD DE CAMPO				
Elaborado por:	Jimmy Macas		Fecha:	10-jun-19
Zona N°:	E3		Normativa:	AASHTO T 191 2014
1. Contenido de Humedad				
N° Recipiente	84		59	
Masa suelo humedo + recipiente (gr)	130.7		115.5	
Masa suelo seco + recipiente (gr)	122.9		109.0	
Masa Recipiente (gr)	30.8		30.6	
Masa de agua W_w (gr)	7.8		6.5	
Masa suelo seco W_s (gr)	92.1		78.4	
Contenido de humedad (W%)	8.47%		8.29%	
W Promedio (%)	8.38%			
2. Determinación de la masa del Suelo Extraido				
Masa del suelo + recipiente (gr)			1982.00	
Masa del recipiente (gr)			12.50	
Masa del suelo W_m (gr)			1969.50	
3. Calibración del Cono de arena de Ottawa				
Masa inicial frasco + cono + arena (gr)			6217.40	
Masa final frasco + cono + arena (gr)			4725.40	
Masa Arena del Cono W_{sand} (gr)			1492.00	
Volumen V_{sand} (cm^3)			926.58	
$\gamma_{sand} = W_{sand}/V_{sand}$ (gr/cm ³)			1.610	
4. Determinación de volumen del hueco en el suelo				
Lectura inicial frasco + cono + arena (gr)			5670.50	
Lectura final frasco + cono + arena (gr)			2455.20	
Masa de Arena en el hueco W_{sand} (gr)			1723.30	
Volumen del suelo $V_m = W_{sand}/\gamma_{sand}$ (cm^3)			1070.22	
5. Determinación del peso volumetrico de la masa				
$\gamma_m = W_m/V_m$ (gr/cm ³)			1.840	
6. Determinación del peso volumetrico seco				
$\gamma_d = \gamma_m/(1+w)$ (gr/cm ³)			1.698	
7. Determinación de la relación de Vacios (e)				
Peso específico relativo de los sólidos S_s			2.65	
Volumen de sólidos V_s (cm^3)			34.75	
Volumen de agua V_w (cm^3)			7.80	
Volumen de la muestra V_m (cm^3)			54.29	
Volumen de vacios V_v (cm^3)			19.53	
$e = V_v/V_s$			0.56	
8. Determinación de la Porosidad (n%)				
$n\% = V_v/V_m * 100$			35.98%	
9. Determinación del grado de saturación de agua y aire (Gw%) (Ga%)				
$G_w\% = V_w/V_v * 100$			39.94%	
$G_a\% = (V_v - V_w)/V_v * 100$			60.06%	



TESIS: ANALISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES INDICE Y MECANICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO

ENSAYO DE GRANULOMETRÍA

Elaborado por	Jimmy Macas		Fecha:	22-jul-19	
Zona N°:	E3		Normativa:	ASTM D-421-58 y AASHTO T-87-70	
PESO DE LA MUESTRA:	250	gr			
# Tamiz	Tamaño de partículas (mm)	P. Retenido Parcial	P. Retenido Acumulado	% Retenido	% Que pasa
#8	2.360	14.1	14.1	5.67%	94.33%
#10	2.000	6.8	20.9	8.41%	91.59%
#16	1.180	20.2	41.1	16.53%	83.47%
#30	0.600	20.6	61.7	24.82%	75.18%
#40	0.425	10.2	71.9	28.92%	71.08%
#50	0.300	15.1	87.0	35.00%	65.00%
#60	0.250	8.0	95.0	38.21%	61.79%
#100	0.150	33.9	128.9	51.85%	48.15%
#200	0.075	65.0	193.9	78.00%	22.00%
Pasa #200		54.7	54.7	22.00%	
TOTAL		248.6	248.6		
Resultados					
TNM	2.360	Cc:	4.34	Error permitido:	1.00%
D10	0.053			Error calculado:	0.56%
D30	0.095	Cu:	0.74	BIEN HECHO	
D60	0.230				
	Grava (G%)		Arena (S%)		Limo y Arcilla (finos%)
SUCS	0		78		22
AASHTO	6		72		22
SUCS	SC	Arena con arcillas de baja plasticidad			
AASHTO	A-2-6(1)	Arena arcillosa			



ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA PARA SUELOS FINOS

Elaborado por	Jimmy Macas	Fecha:	7-ago-19
Zona N°:	E3	Normativa:	AASHTO T 100 2015
GRAVEDAD ESPECÍFICA (Gs)			
Peso del picnómetro	165.40	gr	$G_s = \frac{W_s}{W_s + W_{pt} - W_{pws}} \times G_w \quad (2)$ <p>Donde:</p> <p>W_s es el peso en gramos de los sólidos</p> <p>W_{pws} es el peso del picnómetro + agua + suelo a temperatura T_x.</p> <p>G_w es la gravedad específica del agua a la temperatura T_x.</p>
Temperatura del agua	23.00	°C	
Peso Picnómetro + agua (T°C) (Wpt)	660.46	gr	
Peso Picnómetro+agua+suelo (Wpws)	690.60	gr	
# Recipiente	B4		
Peso Recipiente	224.30	gr	
Peso Recipiente + suelo seco	272.30	gr	
Peso Suelo Seco (Ws)	48.00	gr	
Desplazamiento del agua (Ws+Wpt-Wpws)	17.86	ml	
Factor de corrección por temperatura (K)	0.9993		
Gravedad Específica (Gs)	2.685		



TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADO "B"

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	22-jul-19
Zona N°:	E3	Normativa:	AASHTO T-180 y ASTM D-1557

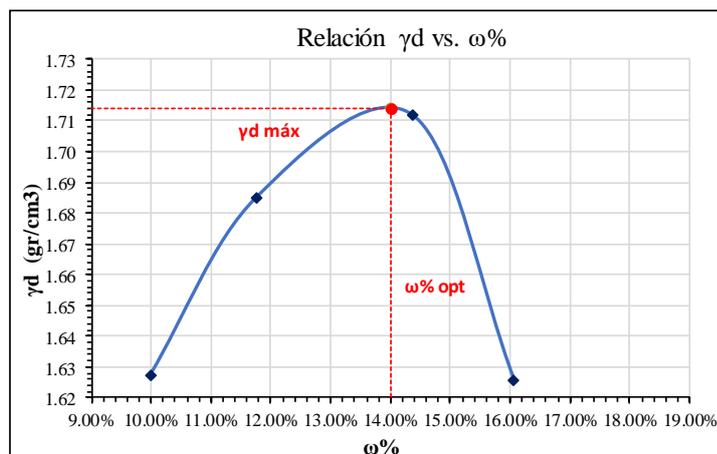
ESPECIFICACIONES DEL ENSAYO

N° de Golpes:	56	N° de capas:	5	Peso martillo:	10 lb
Altura de caída:	18' o 1.5ft	Volumen molde:	2328.79	cm ³	
Peso molde:	14805	gr	Diámetro:	15.22	cm
Energía de compactación:	55986	lb/ft/ft ³	Altura:	12.8	cm
Ensayo número	1	2	3	4	
Peso inicial deseado (gr)	6000	6000	6000	6000	
Humedad inicial añadida (%)	6	9	12	15	
P. molde + suelo húmedo (gr)	18973	19190	19364	19199	
Peso suelo húmedo (gr)	4168	4385	4559	4394	
Peso unitario húmedo γ_m (gr/cm ³)	1.790	1.883	1.958	1.887	

CONTENIDO DE HUMEDAD

# Recipiente	11	12	14	73	21	35	63	68
R. + Suelo húmedo (gr)	138.5	149.0	109.3	104.7	127.1	122.2	117.5	107.7
R. + Suelo seco (gr)	129.1	138.8	100.5	97.0	114.4	110.2	105.7	96.9
Peso agua (gr)	9.4	10.2	8.8	7.7	12.7	12.0	11.8	10.8
Peso recipiente (gr)	35.8	35.9	26.7	30.6	27.8	24.9	31.1	30.7
Peso suelo seco (gr)	93.3	102.9	73.8	66.4	86.6	85.3	74.6	66.2
Contenido humedad $\omega\%$	10.1%	9.9%	11.9%	11.6%	14.7%	14.1%	15.8%	16.3%
Cont. Humedad prom. $\omega\%$	9.99%		11.76%		14.37%		16.07%	
Densidad seca γ_d (gr/cm ³)	1.627		1.685		1.712		1.626	
γ_d Máxima (gr/cm ³)	1.714							
$\omega\%$ optimo	14.00%							
Grado de compactación G_c (%)	99%							

Observaciones:





TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO

ENSAYO DE LÍMITE PLÁSTICO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	7-ago-19
Zona N°:	E3	Normativa:	AASHTO T-90-70

LÍMITE PLÁSTICO

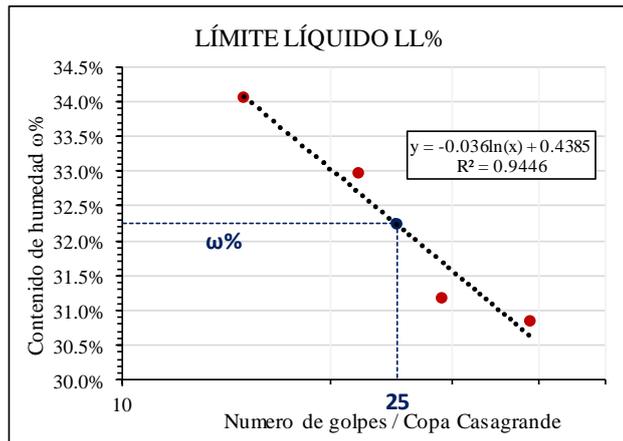
Número de muestra	1	2	3	4	5
# Recipiente	17A	35	33	34	54
Masa Recipiente (gr)	6.00	6.10	6.10	6.20	6.00
Masa Muestra Húmeda + Recipiente (gr)	7.70	7.30	6.90	7.30	6.80
Masa Muestra seca + Recipiente (gr)	7.30	7.10	6.80	7.10	6.70
Masa Agua (gr)	0.40	0.20	0.10	0.20	0.10
Masa Muestra seca (gr)	1.30	1.00	0.70	0.90	0.70
Contenido de humedad (%)	30.8%	20.0%	14.3%	22.2%	14.3%
$\omega\%$ promedio	20.31%				
Límite Plástico %	20.31%				

ENSAYO DE LÍMITE LIQUIDO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	7-ago-19
Zona N°:	E3	Normativa:	AASHTO T-90-70 y ASTM D-424-71

LÍMITE LÍQUIDO

# Recipiente	5	7	8	51	5	65	57	80
Peso Recipiente (gr)	4.2	4.3	6.9	4.3	7.4	6.1	4.3	7.4
Peso Muestra Húmeda + Recipiente (gr)	11.4	10.5	13.0	10.7	14.5	13.3	9.5	12.8
Peso Muestra seca + Recipiente (gr)	9.6	8.9	11.5	9.1	12.8	11.6	8.3	11.5
Peso Agua (gr)	1.8	1.6	1.5	1.6	1.7	1.7	1.2	1.3
Peso de la muestra seca (gr)	5.4	4.6	4.6	4.8	5.4	5.5	4.0	4.1
Contenido de humedad ($\omega\%$)	33.3%	34.8%	32.6%	33.3%	31.5%	30.9%	30.0%	31.7%
$\omega\%$ promedio	34.06%		32.97%		31.20%		30.85%	
Número de golpes	15		22		29		39	



ÍNDICE PLÁSTICO	
Límite Plástico Lp%:	20.31
Límite Líquido Ll%:	32.26
ÍNDICE PLÁSTICO Ip:	$I_p = L_l - L_p$
ÍNDICE PLÁSTICO Ip:	11.95

N° golpes :	25	LL = A*Ln(25)+B	
A=	-0.036	LÍMITE LÍQUIDO	32.26%
B=	0.4385	LL%	



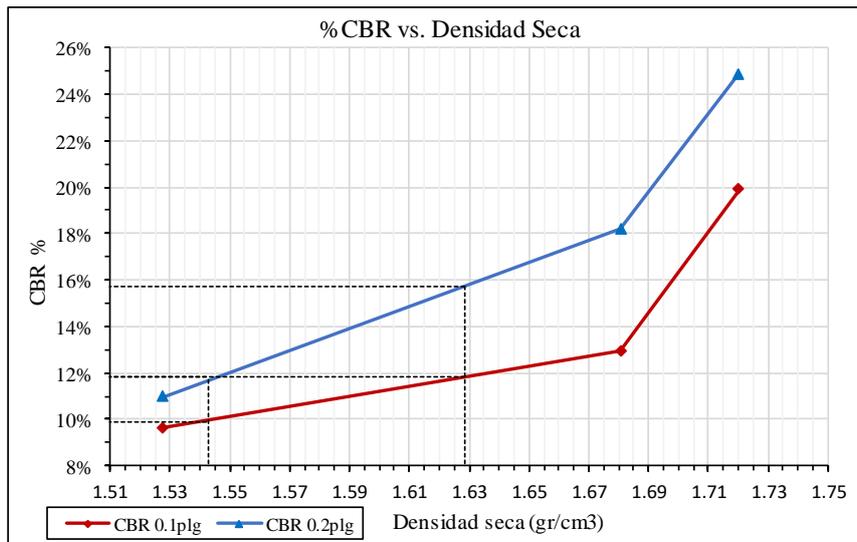
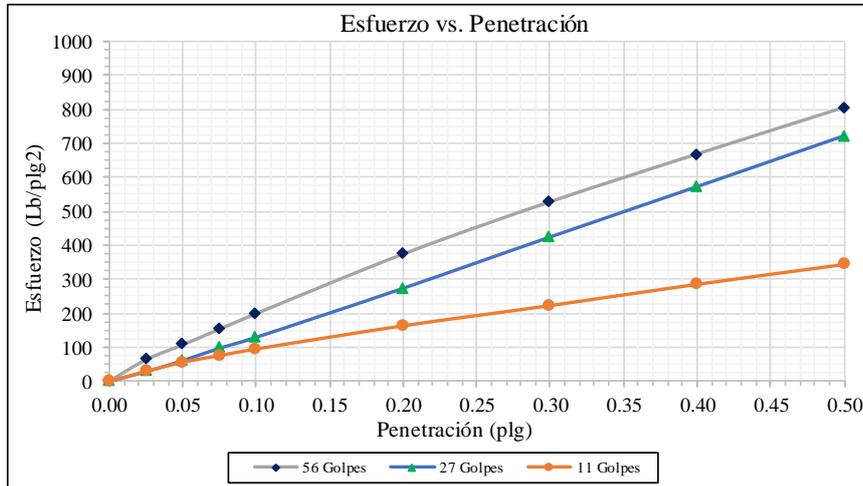
TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO
ENSAYO CBR DE LABORATORIO

Elaborado por:	Jimmy Macas		Fecha:	12-ago-19		
Zona N°:	E3		Normativa:	ASTM: D1883-73-AASHTO:T-193-63		
DATOS DE MOLDEO						
N° Molde	56		27		11A	
N° golpes por capa	56		27		11	
Muestra Húmeda + molde (gr)	13691		12761		11361	
Masa del molde (gr)	9632		8399		7389	
Masa muestra húmeda (gr)	4059		4362		3972	
Volumen de muestra (cm ³)	2068.63		2262.38		2250.25	
Peso unitario húmedo (gr/cm ³)	1.962		1.928		1.765	
CONTENIDO DE HUMEDAD						
	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
N° recipiente	50	69	17	25	4	1
Masa suelo húmedo + recipiente (gr)	121.2	115.5	104.9	106	111.8	110.5
Masa suelo seco + recipiente (gr)	110.2	104.9	94.7	95.4	100	99
Masa del agua (gr)	11	10.6	10.2	10.6	11.80	11.5
Masa del recipiente (gr)	31.1	30.5	24.6	24.3	25.6	23.7
Masa suelo seco (gr)	79.1	74.4	70.1	71.1	74.4	75.3
Contenido de humedad ω%	13.91%	14.25%	14.55%	14.91%	15.86%	15.27%
ω% Promedio	14.08%		14.73%		15.57%	
Peso unitario seco (gr/cm ³)	1.720		1.681		1.527	
DATOS DESPUÉS DE LA SATURACIÓN						
Muestra húmeda + molde (gr)	13787		12891		11738	
Masa Molde (gr)	9632		8399		7389	
Masa muestra húmeda (gr)	4155		4492		4349	
Masa agua absorbida (gr)	96		130		377	
% Agua absorbida	2.37%		2.98%		9.49%	
Esponjamiento inicial	3.21		1.88		8.44	
Esponjamiento final	3.44		2.16		8.79	
Esponjamiento total	0.23		0.28		0.35	
CONTENIDO DE HUMEDAD						
	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
N° recipiente	2	3	4	5	6	8
Masa suelo húmedo + recipiente (gr)	125.9	112.9	147.3	140.3	170.1	162.5
Masa suelo seco + recipiente (gr)	107.8	99.4	126.8	122.1	144.9	139.4
Masa del agua (gr)	18.1	13.5	20.5	18.2	25.2	23.1
Masa del recipiente (gr)	32.6	34.2	40.6	40.7	43.3	40.7
Masa suelo seco (gr)	75.2	65.2	86.2	81.4	101.6	98.7
Contenido de humedad ω%	24.07%	20.71%	23.78%	22.36%	24.80%	23.40%
ω% Promedio	22.39%		23.07%		24.10%	
ENSAYO						
N° MOLDE	1		2		3	
Penetración (p1g)	dial (lb)	Presión (lb/p1g ²)	dial (lb)	Presión (lb/p1g ²)	dial (lb)	Presión (lb/p1g ²)
0.000	0	0.00	0	0.00	0	0.00
0.025	190	63.33	86	28.67	90	30.00
0.050	322	107.33	183	61.00	170	56.67
0.075	458	152.67	292	97.33	229	76.33
0.100	596	198.67	388	129.33	288	96.00
0.200	1120	373.33	819	273.00	493	164.33
0.300	1580	526.67	1270	423.33	672	224.00
0.400	2000	666.67	1713	571.00	860	286.67
0.500	2410	803.33	2160	720.00	1035	345.00
PORCENTAJES CBR (Corregidos)						
N° MOLDE	Presión	CBR 0.1	Densidad	Presión	CBR 0.2 p1g	Densidad
56	198.67	19.87%	1.720	373.33	24.89%	1.720
27	129.33	12.93%	1.681	273.00	18.20%	1.681
11A	96.00	9.60%	1.527	164.33	10.96%	1.527



TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO
ENSAYO CBR DE LABORATORIO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	12-ago-19
Zona N°:	E3	Normativa:	ASTM: D1883-73-AASHTO:T-193-63



DENSIDAD SECA MÁXIMA	1.714 gr/cm³
----------------------	--------------

DSM	% CBR 0.1plg	% CBR 0.2plg	% CBR MA YOR
90%	1.543	9.90%	11.80%
95%	1.628	11.80%	15.70%

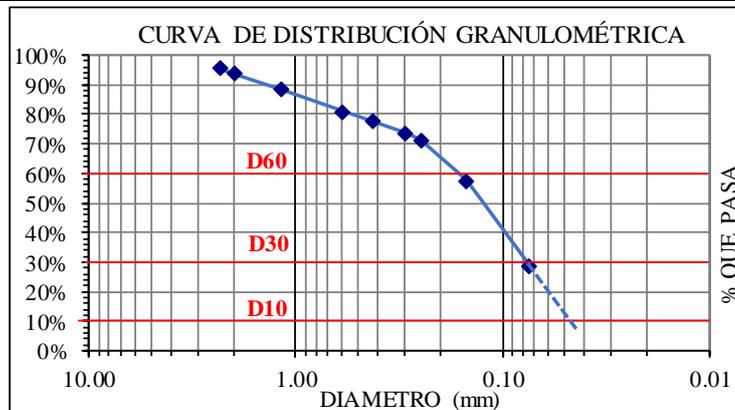
 UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECANICA CARRERA DE INGENIERIA CIVIL 				
TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO				
ENSAYO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA				
Elaborado por:	Jimmy Macas		Fecha:	27-jul-19
Zona N°:	E4		Normativa:	IEEE STD 81-1983
COORDENADAS (UTM)		Zona	Norte (m)	Este (m)
		17M	9858819	762766
				Elevación (m)
				2795
N° ensayo	1	2	3	
Resistividad ρ (Ω/m)	713.70	658.40	676.00	
Resistividad Prom. ρ (Ω/m)	682.70			
Resistencia R (Ω)	108.7			
 UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECANICA CARRERA DE INGENIERIA CIVIL 				
TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO				
DENSIDAD DE CAMPO				
Elaborado por:	Jimmy Macas		Fecha:	27-jun-19
Zona N°:	E4		Normativa:	AASHTO T 191 2014
1. Contenido de Humedad				
N° Recipiente	63		68	
Masa suelo humedo + recipiente (gr)	115.7		111.1	
Masa suelo seco + recipiente (gr)	110.4		106.0	
Masa Recipiente (gr)	31.1		30.8	
Masa de agua W_w (gr)	5.3		5.1	
Masa suelo seco W_s (gr)	79.3		75.2	
Contenido de humedad (W%)	6.68%		6.78%	
W Promedio (%)	6.73%			
2. Determinación de la masa del Suelo Extraído				
Masa del suelo + recipiente (gr)	737.50			
Masa del recipiente (gr)	9.70			
Masa del suelo W_m (gr)	727.80			
3. Calibración del Cono de arena de Ottawa				
Masa inicial frasco + cono + arena (gr)	6348.00			
Masa final frasco + cono + arena (gr)	6005.00			
Masa Arena del Cono W_{sand} (gr)	343.00			
Volumen V_{sand} (cm^3)	209.44			
$\gamma_{sand} = W_{sand}/V_{sand}$ (gr/cm ³)	1.638			
4. Determinación de volumen del hueco en el suelo				
Lectura inicial frasco + cono + arena (gr)	7182.00			
Lectura final frasco + cono + arena (gr)	6027.00			
Masa de Arena en el hueco W_{sand} (gr)	812.00			
Volumen del suelo $V_m = W_{sand}/\gamma_{sand}$ (cm^3)	495.82			
5. Determinación del peso volumetrico de la masa				
$\gamma_m = W_m/V_m$ (gr/cm ³)	1.468			
6. Determinación del peso volumetrico seco				
$\gamma_d = \gamma_m/(1+w)$ (gr/cm ³)	1.375			
7. Determinación de la relación de Vacios (e)				
Peso específico relativo de los sólidos S_s	2.65			
Volumen de sólidos V_s (cm^3)	29.92			
Volumen de agua V_w (cm^3)	5.30			
Volumen de la muestra V_m (cm^3)	57.63			
Volumen de vacios V_v (cm^3)	27.71			
$e = V_v/V_s$	0.93			
8. Determinación de la Porosidad (n%)				
$n\% = V_v/V_m * 100$	48.08%			
9. Determinación del grado de saturación de agua y aire (Gw%) (Ga%)				
$G_w\% = V_w/V_v * 100$	19.13%			
$G_a\% = (V_v - V_w)/V_v * 100$	80.87%			



TESIS: ANALISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES INDICE Y MECANICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO

ENSAYO DE GRANULOMETRÍA

Elaborado por:	Jimmy Macas		Fecha:	22-jul-19	
Zona N°:	E4		Normativa:	ASTM D-421-58 y AASHTO T-87-70	
PESO DE LA MUESTRA:	250	gr			
# Tamiz	Tamaño de partículas (mm)	P. Retenido Parcial	P. Retenido Acumulado	% Retenido	% Que pasa
#8	2.360	10.9	10.9	4.39%	95.61%
#10	2.000	4.2	15.1	6.08%	93.92%
#16	1.180	13.7	28.8	11.60%	88.40%
#30	0.600	18.6	47.4	19.09%	80.91%
#40	0.425	8.0	55.4	22.31%	77.69%
#50	0.300	9.4	64.8	26.10%	73.90%
#60	0.250	5.9	70.7	28.47%	71.53%
#100	0.150	34.5	105.2	42.37%	57.63%
#200	0.075	71.1	176.3	71.00%	29.00%
Pasa #200		72.0	72.0	29.00%	
TOTAL		248.3	248.3		
Resultados					
TNM	2.000	Cc:	3.54	Error permitido:	1.00%
D10	0.048			Error calculado:	0.68%
D30	0.075	Cu:	0.69	BIEN HECHO	
D60	0.170				
	Grava (G%)		Arena (S%)		Limo y Arcilla (finos%)
SUCS	0		71		29
AASHTO	4		67		29
SUCS	SM	Arena con limos de baja plasticidad			
AASHTO	A-2-4(0)	Arena Limosa			



ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA PARA SUELOS FINOS

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	7-ago-19
Zona N°:	E4	Normativa:	AASHTO T 100 2015
GRAVEDAD ESPECÍFICA (Gs)			
Peso del picnómetro	165.40	gr	$G_s = \frac{W_s}{W_s + W_{pt} - W_{pws}} \times G_w \quad (2)$ <p>Donde:</p> <p>W_s es el peso en gramos de los sólidos</p> <p>W_{pws} es el peso del picnómetro + agua + suelo a temperatura T_x.</p> <p>G_w es la gravedad específica del agua a la temperatura T_x.</p>
Temperatura del agua	23.00	°C	
Peso Picnómetro + agua (W_{pt})	660.46	gr	
Peso Picnómetro+agua+suelo (W_{pws})	691.10	gr	
# Recipiente	40		
Peso Recipiente	115.60	gr	
Peso Recipiente + suelo seco	164.40	gr	
Peso Suelo Seco (W_s)	48.80	gr	
Desplazamiento del agua ($W_s + W_{pt} - W_{pws}$)	18.16	ml	
Factor de corrección por temperatura (K)	0.9993		
Gravedad Específica (G_s)	2.685		



TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADO "B"

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	29-jul-19
Zona N°:	E4	Normativa:	AASHTO T-180 y ASTM D-1557

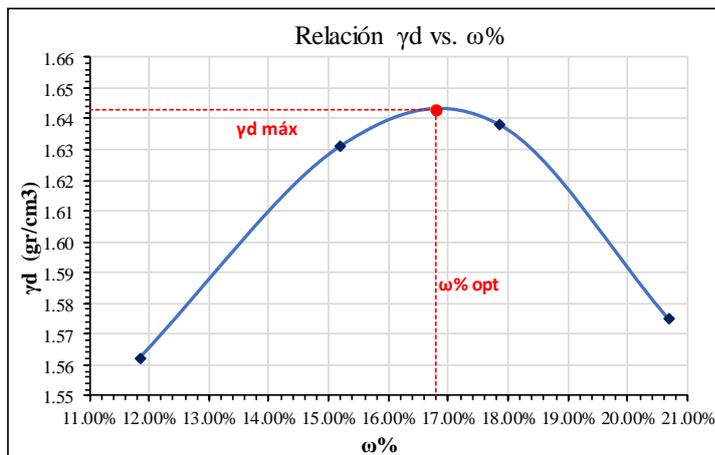
ESPECIFICACIONES DEL ENSAYO

N° de Golpes:	56	N° de capas:	5	Peso martillo:	10 lb
Altura de caída:	18" o 1.5ft	Volumen molde:	2328.79		cm ³
Peso molde:	14805	gr	Diámetro:	15.22	cm
Energía de compactación:	55986	lb/ft/ft ³	Altura:	12.8	cm
Ensayo número	1	2	3	4	
Peso inicial deseado (gr)	6000	6000	6000	6000	
Humedad inicial añadida (%)	9	12	15	18	
P. molde + suelo húmedo (gr)	18874	19181	19301	19231	
Peso suelo húmedo (gr)	4069	4376	4496	4426	
Peso unitario húmedo γ_m (gr/cm ³)	1.747	1.879	1.931	1.901	

CONTENIDO DE HUMEDAD

# Recipiente	17	18	19	20	21	22	13	14
R. + Suelo húmedo (gr)	100.2	99.1	107.0	105.6	102.7	109.0	102.3	100.4
R. + Suelo seco (gr)	94.0	93.6	98.9	97.4	93.9	99.3	91.0	89.3
Peso agua (gr)	6.2	5.5	8.1	8.2	8.8	9.7	11.3	11.1
Peso recipiente (gr)	44.5	44.4	45.1	44.0	44.6	45.0	36.0	36.0
Peso suelo seco (gr)	49.5	49.2	53.8	53.4	49.3	54.3	55.0	53.3
Contenido humedad $\omega\%$	12.5%	11.2%	15.1%	15.4%	17.8%	17.9%	20.5%	20.8%
Cont. Humedad prom. $\omega\%$	11.85%		15.21%		17.86%		20.69%	
Densidad seca γ_d (gr/cm ³)	1.562		1.631		1.638		1.575	
γ_d Máxima (gr/cm ³)	1.643							
$\omega\%$ optimo	16.80%							
Grado de compactación Gc (%)	84%							

Observaciones:





TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO

ENSAYO DE LÍMITE PLÁSTICO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	13-ago-19
Zona N°:	E4	Normativa:	AASHTO T-90-70

LÍMITE PLÁSTICO

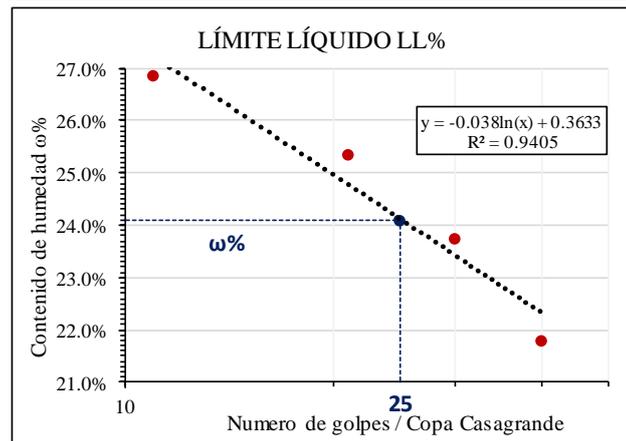
Número de muestra	1	2	3	4	5
# Recipiente	51	5	8	57	85
Masa Recipiente (gr)	4.30	4.30	6.90	4.30	4.30
Masa Muestra Húmeda + Recipiente (gr)	5.50	5.40	8.10	5.40	5.60
Masa Muestra seca + Recipiente (gr)	5.30	5.20	7.90	5.20	5.40
Masa Agua (gr)	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Masa Muestra seca (gr)	1.00	0.90	1.00	0.90	1.10
Contenido de humedad (%)	20.0%	22.2%	20.0%	22.2%	18.2%
$\omega\%$ promedio	20.53%				
Límite Plástico %	20.53%				

ENSAYO DE LÍMITE LIQUIDO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	16-ago-19
Zona N°:	E4	Normativa:	AASHTO T-90-70 y ASTM D-424-71

LÍMITE LÍQUIDO

# Recipiente	1	84	51	31	8J	85	38	83
Peso Recipiente (gr)	4.3	4.1	4.3	7.4	6.9	4.3	6.2	6.1
Peso Muestra Húmeda + Recipiente (gr)	8.6	8.3	8.8	11.8	12.0	9.1	10.3	9.8
Peso Muestra seca + Recipiente (gr)	7.7	7.4	7.9	10.9	11.0	8.2	9.5	9.2
Peso Agua (gr)	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9	0.8	0.6
Peso de la muestra seca (gr)	3.4	3.3	3.6	3.5	4.1	3.9	3.3	3.1
Contenido de humedad ($\omega\%$)	26.5%	27.3%	25.0%	25.7%	24.4%	23.1%	24.2%	19.4%
$\omega\%$ promedio	26.87%		25.36%		23.73%		21.80%	
Número de golpes	11		21		30		40	



ÍNDICE PLÁSTICO	
Límite Plástico Lp%:	20.53
Límite Líquido Ll%:	24.10
ÍNDICE PLÁSTICO Ip:	$I_p = L_l - L_p$
ÍNDICE PLÁSTICO Ip:	3.57

N° golpes :	25	LL = A*Ln(25)+B	
A=	-0.038	LÍMITE LÍQUIDO	24.10%
B=	0.3633	LL%	



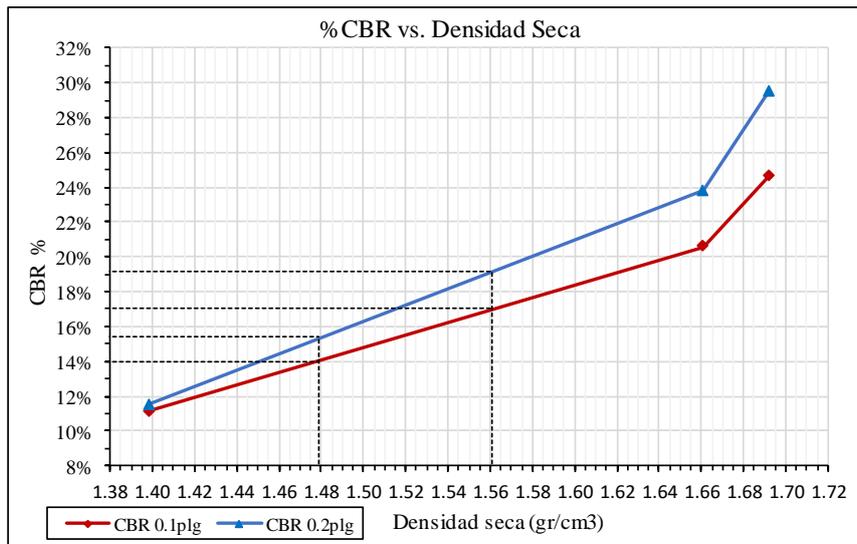
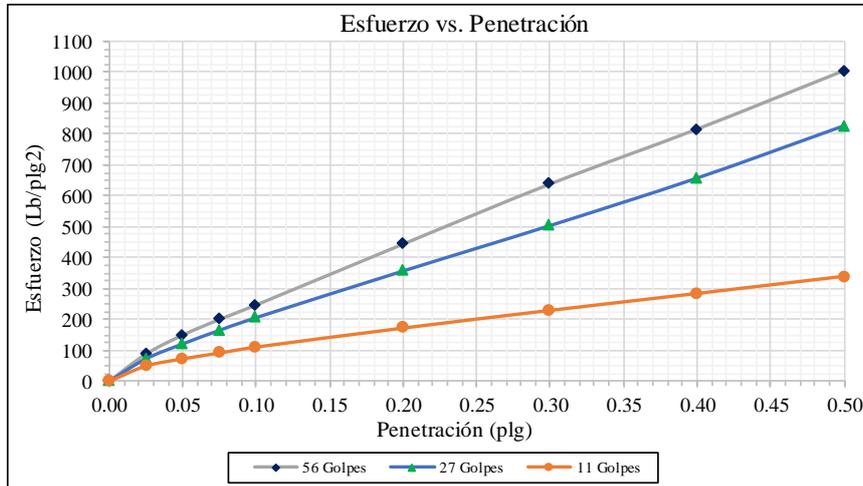
TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO
ENSAYO CBR DE LABORATORIO

Elaborado por:	Jimmy Macas		Fecha:	13-sep-19		
Zona N°:	E4		Normativa:	ASTM: D1883-73-AASHTO:T-193-63		
DATOS DE MOLDEO						
N° Molde	56		27		11A	
N° golpes por capa	56		27		11	
Muestra Húmeda + molde (gr)	14234		12410		12066	
Masa del molde (gr)	9645		8399		8352	
Masa muestra húmeda (gr)	4589		4011		3714	
Volumen de muestra (cm ³)	2316.56		2059.56		2262.27	
Peso unitario húmedo (gr/cm ³)	1.981		1.948		1.642	
CONTENIDO DE HUMEDAD						
	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
N° recipiente	36	43	27	35	19	16
Masa suelo húmedo + recipiente (gr)	99.7	118.2	121.7	104.6	97.5	104.2
Masa suelo seco + recipiente (gr)	88.8	104.5	107.4	92.9	87	92.3
Masa del agua (gr)	10.9	13.7	14.3	11.7	10.50	11.9
Masa del recipiente (gr)	24.7	24.4	25.1	24.6	26.4	24.2
Masa suelo seco (gr)	64.1	80.1	82.3	68.3	60.6	68.1
Contenido de humedad ω%	17.00%	17.10%	17.38%	17.13%	17.33%	17.47%
ω% Promedio	17.05%		17.25%		17.40%	
Peso unitario seco (gr/cm ³)	1.692		1.661		1.398	
DATOS DESPUÉS DE LA SATURACIÓN						
Muestra húmeda + molde (gr)	14345		12589		12318	
Masa Molde (gr)	9645		8399		8352	
Masa muestra húmeda (gr)	4700		4190		3966	
Masa agua absorbida (gr)	111		179		252	
% Agua absorbida	2.42%		4.46%		6.79%	
Esponjamiento inicial	1.38		1.50		8.57	
Esponjamiento final	1.58		1.78		8.69	
Esponjamiento total	0.20		0.28		0.12	
CONTENIDO DE HUMEDAD						
	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
N° recipiente	89	65	57	60	59	74
Masa suelo húmedo + recipiente (gr)	108.1	102.7	104.3	103.4	107.9	120.7
Masa suelo seco + recipiente (gr)	95.7	90.5	90.2	91.6	92.4	103.6
Masa del agua (gr)	12.4	12.2	14.1	11.8	15.5	17.1
Masa del recipiente (gr)	31.3	31	31	30.9	30.6	31.1
Masa suelo seco (gr)	64.4	59.5	59.2	60.7	61.8	72.5
Contenido de humedad ω%	19.25%	20.50%	23.82%	19.44%	25.08%	23.59%
ω% Promedio	19.88%		21.63%		24.33%	
ENSAYO						
N° MOLDE	1		2		3	
Penetración (p1g)	dial (lb)	Presión (lb/p1g ²)	dial (lb)	Presión (lb/p1g ²)	dial (lb)	Presión (lb/p1g ²)
0.000	0	0.00	0	0.00	0	0.00
0.025	263	87.67	218	72.67	149	49.67
0.050	448	149.33	363	121.00	219	73.00
0.075	600	200.00	495	165.00	275	91.67
0.100	740	246.67	618	206.00	333	111.00
0.200	1330	443.33	1070	356.67	517	172.33
0.300	1912	637.33	1510	503.33	688	229.33
0.400	2444	814.67	1970	656.67	852	284.00
0.500	3011	1003.67	2477	825.67	1018	339.33
PORCENTAJES CBR (Corregidos)						
N° MOLDE	Presión	CBR 0.1	Densidad	Presión	CBR 0.2 p1g	Densidad
56	246.67	24.67%	1.692	443.33	29.56%	1.692
27	206.00	20.60%	1.661	356.67	23.78%	1.661
11A	111.00	11.10%	1.398	172.33	11.49%	1.398



TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO
ENSAYO CBR DE LABORATORIO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	13-sep-19
Zona N°:	E4	Normativa:	ASTM: D1883-73-AASHTO:T-193-63



DENSIDAD SECA MÁXIMA	1.643 gr/cm³
----------------------	--------------

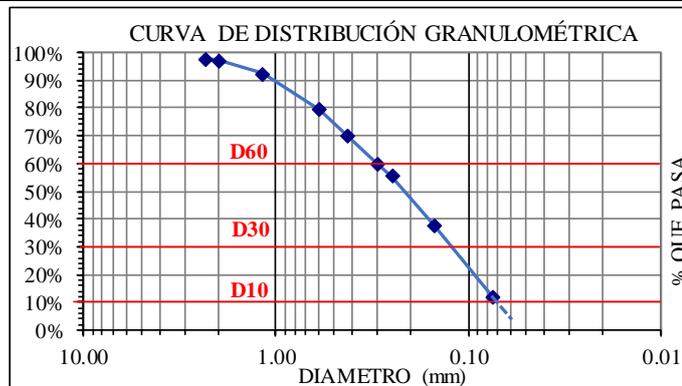
DSM	% CBR 0.1plg	% CBR 0.2plg	% CBR MA YOR
90%	1.479	14.00%	15.40%
95%	1.561	17.00%	19.20%

 UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECANICA CARRERA DE INGENIERIA CIVIL 				
TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO				
ENSAYO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA				
Elaborado por:	Jimmy Macas		Fecha:	10-jul-19
Zona N°:	E5		Normativa:	IEEE STD 81-1983
COORDENADAS (UTM)		Zona	Norte (m)	Este (m)
		17M	9858337	762897
Elevación (m)		2793		
N° ensayo	1	2	3	
Resistividad ρ (Ω/m)	319.50	316.30	311.60	
Resistividad Prom. ρ (Ω/m)	315.80			
Resistencia R (Ω)	50.26			
 UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECANICA CARRERA DE INGENIERIA CIVIL 				
TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO				
DENSIDAD DE CAMPO				
Elaborado por:	Jimmy Macas		Fecha:	10-jul-19
Zona N°:	E5		Normativa:	AASHTO T 191 2014
1. Contenido de Humedad				
N° Recipiente	63		68	
Masa suelo humedo + recipiente (gr)	118.5		124	
Masa suelo seco + recipiente (gr)	112.4		117.6	
Masa Recipiente (gr)	31.1		30.8	
Masa de agua W_w (gr)	6.1		6.4	
Masa suelo seco W_s (gr)	81.3		86.8	
Contenido de humedad (W%)	7.50%		7.37%	
W Promedio (%)	7.44%			
2. Determinación de la masa del Suelo Extraído				
Masa del suelo + recipiente (gr)	1027.00			
Masa del recipiente (gr)	6.30			
Masa del suelo W_m (gr)	1020.70			
3. Calibración del Cono de arena de Ottawa				
Masa inicial frasco + cono + arena (gr)	6348.00			
Masa final frasco + cono + arena (gr)	6005.00			
Masa Arena del Cono W_{sand} (gr)	343.00			
Volumen V_{sand} (cm^3)	209.44			
$\gamma_{sand} = W_{sand}/V_{sand}$ (gr/cm ³)	1.638			
4. Determinación de volumen del hueco en el suelo				
Lectura inicial frasco + cono + arena (gr)	7169.00			
Lectura final frasco + cono + arena (gr)	5800.00			
Masa de Arena en el hueco W_{sand} (gr)	1026.00			
Volumen del suelo $V_m = W_{sand}/\gamma_{sand}$ (cm^3)	626.49			
5. Determinación del peso volumetrico de la masa				
$\gamma_m = W_m/V_m$ (gr/cm ³)	1.629			
6. Determinación del peso volumetrico seco				
$\gamma_d = \gamma_m/(1+w)$ (gr/cm ³)	1.516			
7. Determinación de la relación de Vacios (e)				
Peso específico relativo de los sólidos S_s	2.65			
Volumen de sólidos V_s (cm^3)	30.68			
Volumen de agua V_w (cm^3)	6.10			
Volumen de la muestra V_m (cm^3)	53.64			
Volumen de vacios V_v (cm^3)	22.97			
$e = V_v/V_s$	0.75			
8. Determinación de la Porosidad (n%)				
$n\% = V_v/V_m * 100$	42.81%			
9. Determinación del grado de saturación de agua y aire (Gw%) (Ga%)				
$G_w\% = V_w/V_v * 100$	26.56%			
$G_a\% = (V_v - V_w)/V_v * 100$	73.44%			



ENSAYO DE GRANULOMETRÍA

Elaborado por	Jimmy Macas		Fecha:	23-jul-19	
Zona N°:	E5		Normativa:	ASTM D-421-58 y AASHTO T-87-70	
PESO DE LA MUESTRA:	250	gr			
# Tamiz	Tamaño de partículas (mm)	P. Retenido Parcial	P. Retenido Acumulado	% Retenido	% Que pasa
#8	2.360	5.1	5.1	2.06%	97.94%
#10	2.000	2.2	7.3	2.94%	97.06%
#16	1.180	11.6	18.9	7.62%	92.38%
#30	0.600	31.9	50.8	20.48%	79.52%
#40	0.425	24.1	74.9	30.19%	69.81%
#50	0.300	23.9	98.8	39.82%	60.18%
#60	0.250	11.8	110.6	44.58%	55.42%
#100	0.150	44.1	154.7	62.35%	37.65%
#200	0.075	64.0	218.7	88.15%	11.85%
Pasa #200		29.4	29.4	11.85%	
TOTAL		248.1	248.1		
Resultados					
TNM	1.180	Cc:	4.23	Error permitido:	1.00%
D10	0.071			Error calculado:	0.76%
D30	0.140	Cu:	0.92	BIEN HECHO	
D60	0.300				
	Grava (G%)		Arena (S%)		Limo y Arcilla (finos%)
SUCS	0		88		12
AASHTO	2		76		12
SUCS	SP-SM	Arena pobremente graduada con limos de baja plasticidad			
AASHTO	A-2-4(0)	Arena Limosa			



ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA PARA SUELOS FINOS

Elaborado por	Jimmy Macas	Fecha:	8-ago-19
Zona N°:	E5	Normativa:	AASHTO T 100 2015
GRAVEDAD ESPECÍFICA (Gs)			
Peso del picnómetro	165.40	gr	$G_s = \frac{W_s}{W_s + W_{pt} - W_{pws}} \times G_w \quad (2)$ <p>Donde:</p> <p>W_s es el peso en gramos de los sólidos</p> <p>W_{pws} es el peso del picnómetro + agua + suelo a temperatura Tx.</p> <p>G_w es la gravedad específica del agua a la temperatura Tx.</p>
Temperatura del agua	23.00	°C	
Peso Picnómetro + agua (T°C) (Wpt)	660.46	gr	
Peso Picnómetro+agua+suelo (Wpws)	690.40	gr	
# Recipiente	B1		
Peso Recipiente	119.80	gr	
Peso Recipiente + suelo seco	167.80	gr	
Peso Suelo Seco (Ws)	48.00	gr	
Desplazamiento del agua (Ws+Wpt-Wpws)	18.06	ml	
Factor de corrección por temperatura (K)	0.9993		
Gravedad Específica (Gs)	2.655		



TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADO "B"

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	30-jul-19
Zona N°:	E5	Normativa:	AASHTO T-180 y ASTM D-1557

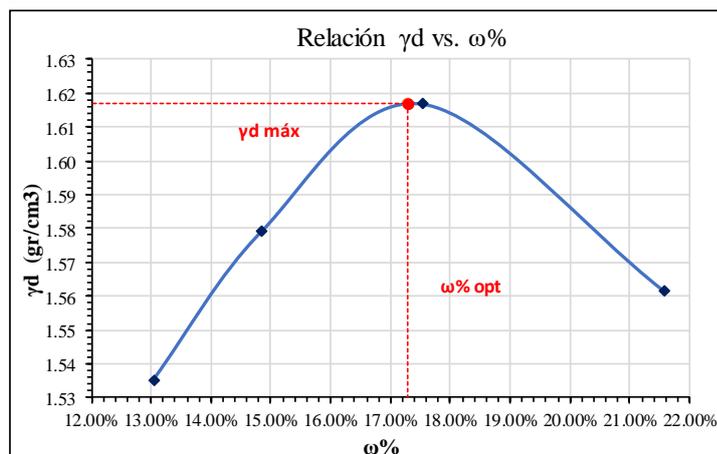
ESPECIFICACIONES DEL ENSAYO

N° de Golpes:	56	N° de capas:	5	Peso martillo:	10 lb
Altura de caída:	18" o 1.5ft	Volumen molde:	2328.79	cm ³	
Peso molde:	14805	gr	Diámetro:	15.22	cm
Energía de compactación:	55986	lb/ft/ft ³	Altura:	12.8	cm
Ensayo número	1	2	3	4	
Peso inicial deseado (gr)	6000	6000	6000	6000	
Humedad inicial añadida (%)	9	12	15	18	
P. molde + suelo húmedo (gr)	18847	19029	19231	19226	
Peso suelo húmedo (gr)	4042	4224	4426	4421	
Peso unitario húmedo γ_m (gr/cm ³)	1.736	1.814	1.901	1.898	

CONTENIDO DE HUMEDAD

# Recipiente	C	D	E	F	G	H	A	B
R. + Suelo húmedo (gr)	69.7	60.9	64.9	63.5	63.4	60.7	60.3	64.1
R. + Suelo seco (gr)	62.8	55.0	57.7	56.6	55.4	53.1	51.4	54.6
Peso agua (gr)	6.9	5.9	7.2	6.9	8.0	7.6	8.9	9.5
Peso recipiente (gr)	9.9	9.8	9.7	9.7	9.9	9.7	10.0	10.7
Peso suelo seco (gr)	52.9	45.2	48.0	46.9	45.5	43.4	41.4	43.9
Contenido humedad $\omega\%$	13.0%	13.1%	15.0%	14.7%	17.6%	17.5%	21.5%	21.6%
Cont. Humedad prom. $\omega\%$	13.05%		14.86%		17.55%		21.57%	
Densidad seca γ_d (gr/cm ³)	1.535		1.579		1.617		1.562	
γ_d Máxima (gr/cm ³)	1.617							
$\omega\%$ optimo	17.30%							
Grado de compactación G_c (%)	94%							

Observaciones:





TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO

ENSAYO DE LÍMITE PLÁSTICO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	13-ago-19
Zona N°:	E5	Normativa:	AASHTO T-90-70

LÍMITE PLÁSTICO

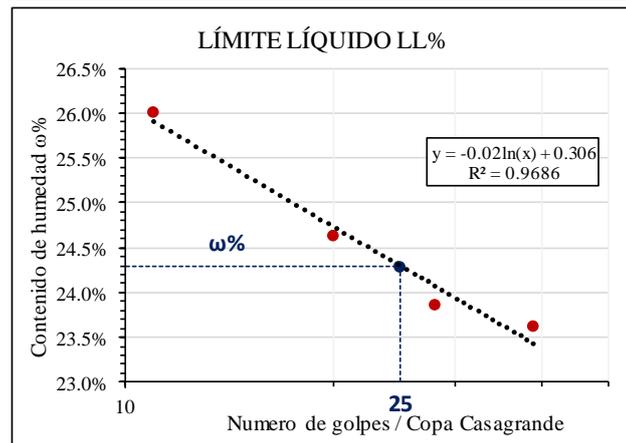
Número de muestra	1	2	3	4	5
# Recipiente	80	62	77	12	21
Masa Recipiente (gr)	7.40	7.40	7.30	7.40	7.30
Masa Muestra Húmeda + Recipiente (gr)	8.40	8.40	8.40	8.40	8.40
Masa Muestra seca + Recipiente (gr)	8.20	8.20	8.20	8.20	8.20
Masa Agua (gr)	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Masa Muestra seca (gr)	0.80	0.80	0.90	0.80	0.90
Contenido de humedad (%)	25.0%	25.0%	22.2%	25.0%	22.2%
ω% promedio	23.89%				
Límite Plástico %	23.89%				

ENSAYO DE LÍMITE LIQUIDO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	15-ago-19
Zona N°:	E5	Normativa:	AASHTO T-90-70 y ASTM D-424-71

LÍMITE LÍQUIDO

# Recipiente	21	57	20	64	1	85	33	38
Peso Recipiente (gr)	7.3	6.1	6.0	6.0	4.4	4.3	6.1	6.1
Peso Muestra Húmeda + Recipiente (gr)	12.8	10.8	11.3	10.8	9.8	9.8	10.6	11.0
Peso Muestra seca + Recipiente (gr)	11.7	9.8	10.2	9.9	8.8	8.7	9.8	10.0
Peso Agua (gr)	1.1	1.0	1.1	0.9	1.0	1.1	0.8	1.0
Peso de la muestra seca (gr)	4.4	3.7	4.2	3.9	4.4	4.4	3.7	3.9
Contenido de humedad (ω%)	25.0%	27.0%	26.2%	23.1%	22.7%	25.0%	21.6%	25.6%
ω% promedio	26.01%		24.63%		23.86%		23.63%	
Número de golpes	11		20		28		39	



ÍNDICE PLÁSTICO	
Límite Plástico Lp%:	23.89
Límite Líquido Ll%:	24.29
ÍNDICE PLÁSTICO Ip:	Ip= Ll - Lp
ÍNDICE PLÁSTICO Ip:	0.4

N° golpes :	25	LL = A*Ln(25)+B	
A=	-0.0196	LÍMITE LÍQUIDO	24.29%
B=	0.306	LL%	



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



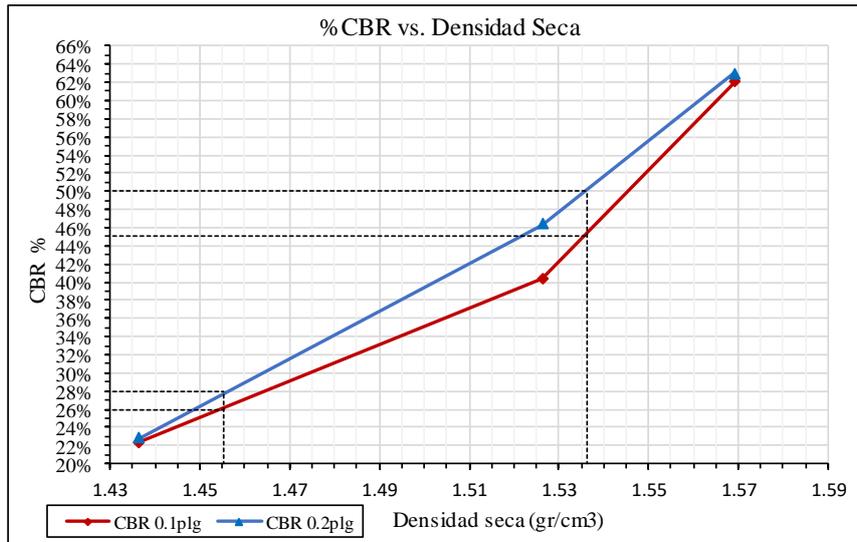
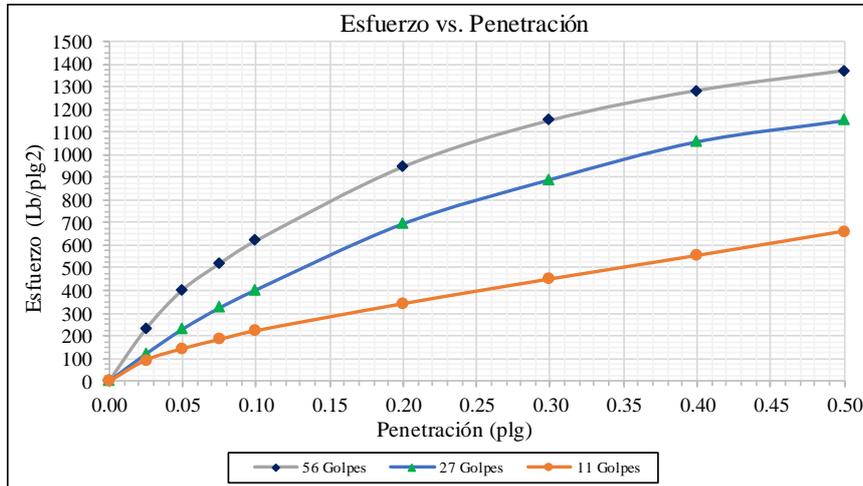
TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO
ENSAYO CBR DE LABORATORIO

Elaborado por:	Jimmy Macas		Fecha:	11-sep-19		
Zona N°:	E5		Normativa:	ASTM: D1883-73-AASHTO:T-193-63		
DATOS DE MOLDEO						
N° Molde	56		27		11	
N° golpes por capa	56		27		11	
Muestra Húmeda + molde (gr)	12476		10770		10780	
Masa del molde (gr)	8300		6726		6969	
Masa muestra húmeda (gr)	4176		4044		3811	
Volumen de muestra (cm ³)	2268.24		2255.68		2253.34	
Peso unitario húmedo (gr/cm ³)	1.841		1.793		1.691	
CONTENIDO DE HUMEDAD						
	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
N° recipiente	13	21	20	25	18	22
Masa suelo húmedo + recipiente (gr)	145.3	171.6	163.4	170.7	153	147.9
Masa suelo seco + recipiente (gr)	129.1	152.9	145.8	151.8	136.5	132.5
Masa del agua (gr)	16.2	18.7	17.6	18.9	16.50	15.4
Masa del recipiente (gr)	36	44.5	44	44.6	44.4	45
Masa suelo seco (gr)	93.1	108.4	101.8	107.2	92.1	87.5
Contenido de humedad ω%	17.40%	17.25%	17.29%	17.63%	17.92%	17.60%
ω% Promedio	17.33%		17.46%		17.76%	
Peso unitario seco (gr/cm ³)	1.569		1.526		1.436	
DATOS DESPUÉS DE LA SATURACIÓN						
Muestra húmeda + molde (gr)	12528		10920		10950	
Masa Molde (gr)	8300		6726		6969	
Masa muestra húmeda (gr)	4228		4194		3981	
Masa agua absorbida (gr)	52		150		170	
% Agua absorbida	1.25%		3.71%		4.46%	
Esponjamiento inicial	4.40		5.60		5.5	
Esponjamiento final	4.62		5.86		5.82	
Esponjamiento total	0.22		0.26		0.32	
CONTENIDO DE HUMEDAD						
	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
N° recipiente	1	2	6	5	15	11
Masa suelo húmedo + recipiente (gr)	104.8	109.9	112.9	111.4	108.2	109.6
Masa suelo seco + recipiente (gr)	92.3	96.7	99	97.3	94.5	94.9
Masa del agua (gr)	12.5	13.2	13.9	14.1	13.7	14.7
Masa del recipiente (gr)	35.5	35.7	36.6	35.8	36	35.7
Masa suelo seco (gr)	56.8	61	62.4	61.5	58.5	59.2
Contenido de humedad ω%	22.01%	21.64%	22.28%	22.93%	23.42%	24.83%
ω% Promedio	21.82%		22.60%		24.12%	
ENSAYO						
N° MOLDE	1		2		3	
Penetración (p1g)	dial (lb)	Presión (lb/p1g ²)	dial (lb)	Presión (lb/p1g ²)	dial (lb)	Presión (lb/p1g ²)
0.000	0	0.00	0	0.00	0	0.00
0.025	687	229.00	360	120.00	280	93.33
0.050	1207	402.33	690	230.00	433	144.33
0.075	1552	517.33	970	323.33	553	184.33
0.100	1858	619.33	1210	403.33	670	223.33
0.200	2835	945.00	2085	695.00	1025	341.67
0.300	3450	1150.00	2669	889.67	1350	450.00
0.400	3845	1281.67	3170	1056.67	1660	553.33
0.500	4108	1369.33	3450	1150.00	1980	660.00
PORCENTAJES CBR (Corregidos)						
N° MOLDE	Presión	CBR 0.1	Densidad	Presión	CBR 0.2 p1g	Densidad
56	619.33	61.93%	1.569	945.00	63.00%	1.569
27	403.33	40.33%	1.526	695.00	46.33%	1.526
11	223.33	22.33%	1.436	341.67	22.78%	1.436



TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO
ENSAYO CBR DE LABORATORIO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	11-sep-19
Zona N°:	E5	Normativa:	ASTM: D1883-73-AASHTO:T-193-63



DENSIDAD SECA MÁXIMA	1.617 gr/cm³
----------------------	--------------

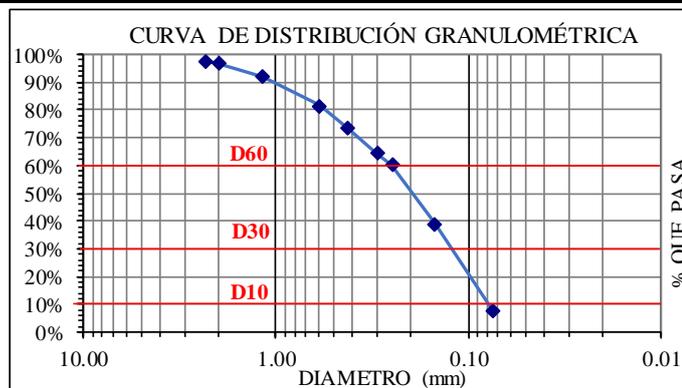
DSM	% CBR 0.1plg	% CBR 0.2plg	% CBR MA YOR
90%	1.455	26.00%	27.90%
95%	1.536	45.00%	50.00%

 UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECANICA CARRERA DE INGENIERIA CIVIL 				
TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO				
ENSAYO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA				
Elaborado por:	Jimmy Macas		Fecha:	1-jul-19
Zona N°:	E6		Normativa:	IEEE STD 81-1983
COORDENADAS (UTM)		Zona	Norte (m)	Este (m)
		17M	9858445	763509
				Elevación (m)
				2766
N° ensayo	1	2	3	
Resistividad ρ (Ω/m)	135.70	142.60	150.70	
Resistividad Prom. ρ (Ω/m)	143.00			
Resistencia R (Ω)	22.8			
 UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECANICA CARRERA DE INGENIERIA CIVIL 				
TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO				
DENSIDAD DE CAMPO				
Elaborado por:	Jimmy Macas		Fecha:	1-jul-19
Zona N°:	E6		Normativa:	AASHTO T 191 2014
1. Contenido de Humedad				
N° Recipiente	14		42	
Masa suelo humedo + recipiente (gr)	115.7		107.6	
Masa suelo seco + recipiente (gr)	104.6		98.8	
Masa Recipiente (gr)	26.7		24.9	
Masa de agua W_w (gr)	11.1		8.8	
Masa suelo seco W_s (gr)	77.9		73.9	
Contenido de humedad (W%)	14.25%		11.91%	
W Promedio (%)	13.08%			
2. Determinación de la masa del Suelo Extraído				
Masa del suelo + recipiente (gr)	828.10			
Masa del recipiente (gr)	3.20			
Masa del suelo W_m (gr)	824.90			
3. Calibración del Cono de arena de Ottawa				
Masa inicial frasco + cono + arena (gr)	6348.00			
Masa final frasco + cono + arena (gr)	6005.00			
Masa Arena del Cono W_{sand} (gr)	343.00			
Volumen V_{sand} (cm^3)	209.44			
$\gamma_{sand} = W_{sand}/V_{sand}$ (gr/cm ³)	1.638			
4. Determinación de volumen del hueco en el suelo				
Lectura inicial frasco + cono + arena (gr)	7180.00			
Lectura final frasco + cono + arena (gr)	6044.00			
Masa de Arena en el hueco W_{sand} (gr)	793.00			
Volumen del suelo $V_m = W_{sand}/\gamma_{sand}$ (cm^3)	484.22			
5. Determinación del peso volumetrico de la masa				
$\gamma_m = W_m/V_m$ (gr/cm ³)	1.704			
6. Determinación del peso volumetrico seco				
$\gamma_d = \gamma_m/(1+w)$ (gr/cm ³)	1.507			
7. Determinación de la relación de Vacios (e)				
Peso específico relativo de los sólidos S_s	2.65			
Volumen de sólidos V_s (cm^3)	29.40			
Volumen de agua V_w (cm^3)	11.10			
Volumen de la muestra V_m (cm^3)	52.24			
Volumen de vacios V_v (cm^3)	22.85			
$e = V_v/V_s$	0.78			
8. Determinación de la Porosidad (n%)				
$n\% = V_v/V_m * 100$	43.73%			
9. Determinación del grado de saturación de agua y aire (Gw%) (Ga%)				
$G_w\% = V_w/V_v * 100$	48.58%			
$G_a\% = (V_v - V_w)/V_v * 100$	51.42%			



ENSAYO DE GRANULOMETRÍA

Elaborado por	Jimmy Macas		Fecha:	23-jul-19	
Zona N°:	E6		Normativa:	ASTM D-421-58 y AASHTO T-87-70	
PESO DE LA MUESTRA:	250	gr			
# Tamiz	Tamaño de partículas (mm)	P. Retenido Parcial	P. Retenido Acumulado	% Retenido	% Que pasa
#8	2.360	5.8	5.8	2.33%	97.67%
#10	2.000	2.1	7.9	3.18%	96.82%
#16	1.180	11.5	19.4	7.80%	92.20%
#30	0.600	26.0	45.4	18.26%	81.74%
#40	0.425	20.5	65.9	26.51%	73.49%
#50	0.300	21.9	87.8	35.32%	64.68%
#60	0.250	10.7	98.5	39.62%	60.38%
#100	0.150	53.2	151.7	61.02%	38.98%
#200	0.075	77.9	229.6	92.36%	7.64%
Pasa #200		19.0	19.0	7.64%	
TOTAL		248.6	248.6		
Resultados					
TNM	1.180	Cc:	3.16	Error permitido:	1.00%
D10	0.079			Error calculado:	0.56%
D30	0.130	Cu:	0.86	BIEN HECHO	
D60	0.250				
	Grava (G%)		Arena (S%)		Limo y Arcilla (finos%)
SUCS	0		82		8
AASHTO	2		80		8
SUCS	SP-SM	Arena pobremente graduada con limos de baja plasticidad			
AASHTO	A-2-4(0)	Arena Limosa			



ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA PARA SUELOS FINOS

Elaborado por	Jimmy Macas	Fecha:	1-jul-19
Zona N°:	E6	Normativa:	AASHTO T 100 2015
GRAVEDAD ESPECÍFICA (Gs)			
Peso del picnómetro	165.40	gr	$G_s = \frac{W_s}{W_s + W_{pt} - W_{pws}} \times G_w \quad (2)$ <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> W_s es el peso en gramos de los sólidos W_p/W_s es el peso del picnómetro + agua + suelo a temperatura Tx. G_w es la gravedad específica del agua a la temperatura Tx.
Temperatura del agua	23.00	°C	
Peso Picnómetro + agua (T°C) (Wpt)	660.46	gr	
Peso Picnómetro+agua+suelo (Wpws)	690.30	gr	
# Recipiente	50		
Peso Recipiente	103.90	gr	
Peso Recipiente + suelo seco	151.80	gr	
Peso Suelo Seco (Ws)	47.90	gr	
Desplazamiento del agua (Ws+Wpt-Wpws)	18.06	ml	
Factor de corrección por temperatura (K)	0.9993		
Gravedad Específica (Gs)	2.650		



TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADO "B"

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	1-jul-19
Zona N°:	E6	Normativa:	AASHTO T-180 y ASTM D-1557

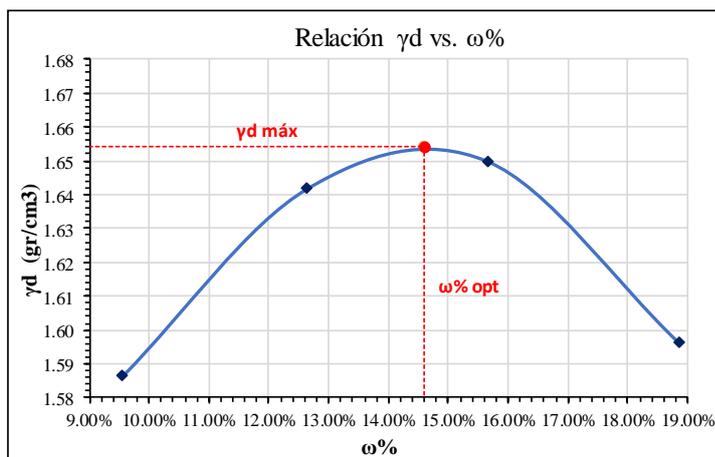
ESPECIFICACIONES DEL ENSAYO

N° de Golpes:	56	N° de capas:	5	Peso martillo:	10 lb
Altura de caída:	18" o 1.5ft	Volumen molde:	2328.79	cm ³	
Peso molde:	14805	gr	Diámetro:	15.22	cm
Energía de compactación:	55986	lb/ft/ft ³	Altura:	12.8	cm
Ensayo número	1	2	3	4	
Peso inicial deseado (gr)	6000	6000	6000	6000	
Humedad inicial añadida (%)	6	9	12	15	
P. molde + suelo húmedo (gr)	18853	19112	19249	19224	
Peso suelo húmedo (gr)	4048	4307	4444	4419	
Peso unitario húmedo γ_m (gr/cm ³)	1.738	1.849	1.908	1.898	

CONTENIDO DE HUMEDAD

# Recipiente	13	14	17	18	19	20	21	22
R. + Suelo húmedo (gr)	99.5	97.4	105.2	107.5	103.3	106.2	104.5	108.6
R. + Suelo seco (gr)	93.9	92.1	98.5	100.3	95.5	97.7	95.2	98.3
Peso agua (gr)	5.6	5.3	6.7	7.2	7.8	8.5	9.3	10.3
Peso recipiente (gr)	36.0	36.0	44.5	44.4	45.1	44.0	44.6	45.0
Peso suelo seco (gr)	57.9	56.1	54.0	55.9	50.4	53.7	50.6	53.3
Contenido humedad $\omega\%$	9.7%	9.4%	12.4%	12.9%	15.5%	15.8%	18.4%	19.3%
Cont. Humedad prom. $\omega\%$	9.56%		12.64%		15.65%		18.85%	
Densidad seca γ_d (gr/cm ³)	1.587		1.642		1.650		1.597	
γ_d Máxima (gr/cm ³)	1.654							
$\omega\%$ optimo	14.60%							
Grado de compactación G_c (%)	91%							

Observaciones:





TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO

ENSAYO DE LÍMITE PLÁSTICO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	12-ago-19
Zona N°:	E6	Normativa:	AASHTO T-90-70

LÍMITE PLÁSTICO

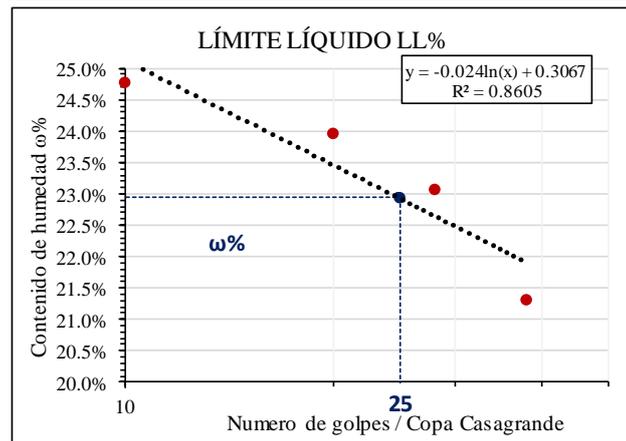
Número de muestra	1	2	3	4	5
# Recipiente	20	64	57	83	56
Masa Recipiente (gr)	6.00	6.20	6.10	6.10	6.20
Masa Muestra Húmeda + Recipiente (gr)	7.00	7.20	7.20	7.10	7.20
Masa Muestra seca + Recipiente (gr)	6.90	7.00	7.00	6.90	7.10
Masa Agua (gr)	0.10	0.20	0.20	0.20	0.10
Masa Muestra seca (gr)	0.90	0.80	0.90	0.80	0.90
Contenido de humedad (%)	11.1%	25.0%	22.2%	25.0%	11.1%
ω% promedio	18.89%				
Límite Plástico %	18.89%				

ENSAYO DE LÍMITE LIQUIDO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	14-ago-19
Zona N°:	E6	Normativa:	AASHTO T-90-70 y ASTM D-424-71

LÍMITE LÍQUIDO

# Recipiente	5	51	7	65	80	57	62	77
Peso Recipiente (gr)	4.3	4.4	4.3	6.1	7.3	4.3	7.3	7.3
Peso Muestra Húmeda + Recipiente (gr)	10.7	11.1	11.8	13.6	13.8	10.6	14.8	14.6
Peso Muestra seca + Recipiente (gr)	9.4	9.8	10.4	12.1	12.5	9.5	13.5	13.3
Peso Agua (gr)	1.3	1.3	1.4	1.5	1.3	1.1	1.3	1.3
Peso de la muestra seca (gr)	5.1	5.4	6.1	6.0	5.2	5.2	6.2	6.0
Contenido de humedad (ω%)	25.5%	24.1%	23.0%	25.0%	25.0%	21.2%	21.0%	21.7%
ω% promedio	24.78%		23.98%		23.08%		21.32%	
Número de golpes	10		20		28		38	



ÍNDICE PLÁSTICO	
Límite Plástico Lp%:	18.89
Límite Líquido Ll%:	22.94
ÍNDICE PLÁSTICO Ip:	Ip= Ll - Lp
ÍNDICE PLÁSTICO Ip:	4.05

N° golpes :	25	LL = A*Ln(25)+B	
A=	-0.024	LÍMITE LÍQUIDO	
B=	0.3067	LL%	22.94%



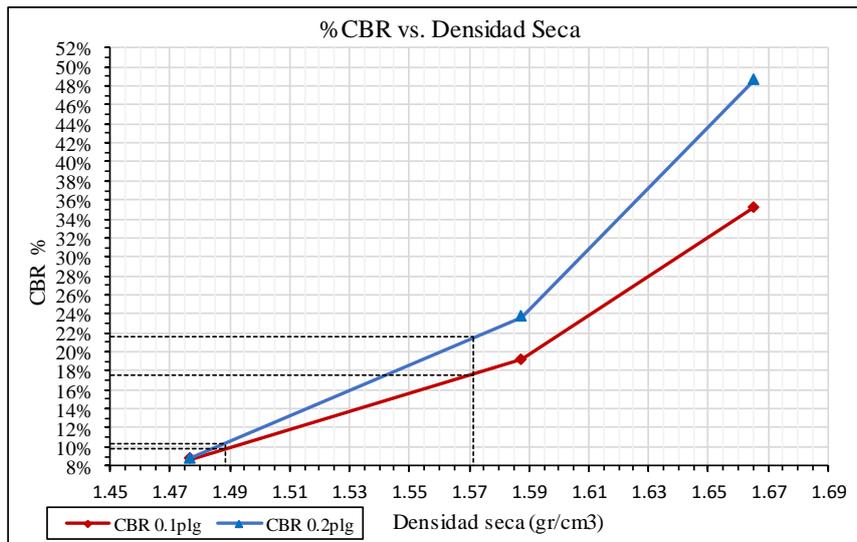
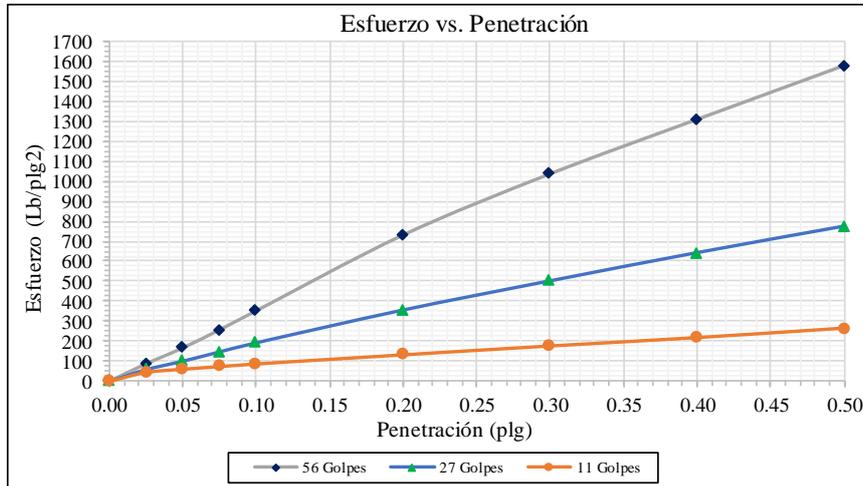
TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO
ENSAYO CBR DE LABORATORIO

Elaborado por:	Jimmy Macas		Fecha:	10-sep-19		
Zona N°:	E6		Normativa:	ASTM: D1883-73-AASHTO:T-193-63		
DATOS DE MOLDEO						
N° Molde	56		27		11	
N° golpes por capa	56		27		11	
Muestra Húmeda + molde (gr)	12625		10900		10855	
Masa del molde (gr)	8300		6726		6969	
Masa muestra húmeda (gr)	4325		4174		3886	
Volumen de muestra (cm ³)	2264.61		2268.33		2253.34	
Peso unitario húmedo (gr/cm ³)	1.910		1.840		1.725	
CONTENIDO DE HUMEDAD						
	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
N° recipiente	90	36	19	8	74	60
Masa suelo húmedo + recipiente (gr)	123.3	107.7	110.9	114	113.4	129.7
Masa suelo seco + recipiente (gr)	111.4	97.1	99.3	102	101.6	115.5
Masa del agua (gr)	11.9	10.6	11.6	12	11.80	14.2
Masa del recipiente (gr)	30.6	24.7	26.4	26.6	31.2	30.9
Masa suelo seco (gr)	80.8	72.4	72.9	75.4	70.4	84.6
Contenido de humedad ω%	14.73%	14.64%	15.91%	15.92%	16.76%	16.78%
ω% Promedio	14.68%		15.91%		16.77%	
Peso unitario seco (gr/cm ³)	1.665		1.587		1.477	
DATOS DESPUÉS DE LA SATURACIÓN						
Muestra húmeda + molde (gr)	12708		11050		11120	
Masa Molde (gr)	8300		6726		6969	
Masa muestra húmeda (gr)	4408		4324		4151	
Masa agua absorbida (gr)	83		150		265	
% Agua absorbida	1.92%		3.59%		6.82%	
Esponjamiento inicial	1.38		1.50		8.57	
Esponjamiento final	1.58		1.78		8.69	
Esponjamiento total	0.20		0.28		0.12	
CONTENIDO DE HUMEDAD						
	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
N° recipiente	1	2	5	6	11	15
Masa suelo húmedo + recipiente (gr)	104.2	109.5	111	112.6	109.8	107.7
Masa suelo seco + recipiente (gr)	92.3	96.7	97.3	99	94.9	94.5
Masa del agua (gr)	11.9	12.8	13.7	13.6	14.9	13.2
Masa del recipiente (gr)	35.5	35.7	35.8	36.6	35.7	36
Masa suelo seco (gr)	56.8	61	61.5	62.4	59.2	58.5
Contenido de humedad ω%	20.95%	20.98%	22.28%	21.79%	25.17%	22.56%
ω% Promedio	20.97%		22.04%		23.87%	
ENSAYO						
N° MOLDE	1		2		3	
Penetración (p1g)	dial (lb)	Presión (lb/p1g ²)	dial (lb)	Presión (lb/p1g ²)	dial (lb)	Presión (lb/p1g ²)
0.000	0	0.00	0	0.00	0	0.00
0.025	262	87.33	175	58.33	133	44.33
0.050	500	166.67	302	100.67	182	60.67
0.075	770	256.67	440	146.67	220	73.33
0.100	1055	351.67	576	192.00	260	86.67
0.200	2190	730.00	1065	355.00	395	131.67
0.300	3105	1035.00	1500	500.00	526	175.33
0.400	3920	1306.67	1920	640.00	650	216.67
0.500	4725	1575.00	2315	771.67	790	263.33
PORCENTAJES CBR (Corregidos)						
N° MOLDE	Presión	CBR 0.1	Densidad	Presión	CBR 0.2 p1g	Densidad
56	351.67	35.17%	1.665	730.00	48.67%	1.665
27	192.00	19.20%	1.587	355.00	23.67%	1.587
11	86.67	8.67%	1.477	131.67	8.78%	1.477



TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO
ENSAYO CBR DE LABORATORIO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	10-sep-19
Zona N°:	E6	Normativa:	ASTM: D1883-73-AASHTO:T-193-63



DENSIDAD SECA MÁXIMA	1.654 gr/cm³
----------------------	--------------

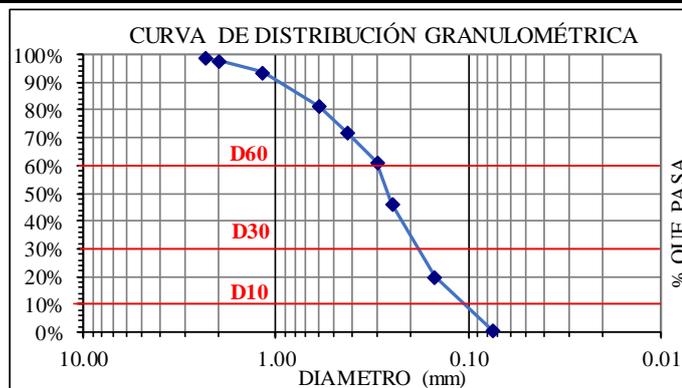
DSM	% CBR 0.1plg	% CBR 0.2plg	% CBR MA YOR
90%	1.489	9.80%	10.30%
95%	1.571	17.60%	21.60%

 UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECANICA CARRERA DE INGENIERIA CIVIL 				
TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO				
ENSAYO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA				
Elaborado por:	Jimmy Macas		Fecha:	4-jul-19
Zona N°:	E7		Normativa:	IEEE STD 81-1983
COORDENADAS (UTM)		Zona	Norte (m)	Este (m)
		17M	9858042	762682
				Elevación (m)
				2810
N° ensayo	1	2	3	
Resistividad ρ (Ω/m)	715.00	724.60	730.12	
Resistividad Prom. ρ (Ω/m)	723.24			
Resistencia R (Ω)	115.11			
 UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECANICA CARRERA DE INGENIERIA CIVIL 				
TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO				
DENSIDAD DE CAMPO				
Elaborado por:	Jimmy Macas		Fecha:	4-jul-19
Zona N°:	E7		Normativa:	AASHTO T 191 2014
1. Contenido de Humedad				
N° Recipiente	68		74	
Masa suelo humedo + recipiente (gr)	123.4		128.6	
Masa suelo seco + recipiente (gr)	118.7		123.6	
Masa Recipiente (gr)	30.8		31.2	
Masa de agua W_w (gr)	4.7		5	
Masa suelo seco W_s (gr)	87.9		92.4	
Contenido de humedad (W%)	5.35%		5.41%	
W Promedio (%)	5.38%			
2. Determinación de la masa del Suelo Extraído				
Masa del suelo + recipiente (gr)	1116.9			
Masa del recipiente (gr)	6.3			
Masa del suelo W_m (gr)	1110.6			
3. Calibración del Cono de arena de Ottawa				
Masa inicial frasco + cono + arena (gr)	6348			
Masa final frasco + cono + arena (gr)	6005			
Masa Arena del Cono W_{sand} (gr)	343			
Volumen V_{sand} (cm^3)	209.44			
$\gamma_{sand} = W_{sand}/V_{sand}$ (gr/cm ³)	1.638			
4. Determinación de volumen del hueco en el suelo				
Lectura inicial frasco + cono + arena (gr)	7176			
Lectura final frasco + cono + arena (gr)	5898			
Masa de Arena en el hueco W_{sand} (gr)	935			
Volumen del suelo $V_m = W_{sand}/\gamma_{sand}$ (cm^3)	570.92			
5. Determinación del peso volumetrico de la masa				
$\gamma_m = W_m/V_m$ (gr/cm ³)	1.945			
6. Determinación del peso volumetrico seco				
$\gamma_d = \gamma_m/(1+w)$ (gr/cm ³)	1.846			
7. Determinación de la relación de Vacios (e)				
Peso específico relativo de los sólidos S_s	2.65			
Volumen de sólidos V_s (cm^3)	33.17			
Volumen de agua V_w (cm^3)	4.70			
Volumen de la muestra V_m (cm^3)	47.60			
Volumen de vacios V_v (cm^3)	14.43			
$e = V_v/V_s$	0.44			
8. Determinación de la Porosidad (n%)				
$n\% = V_v/V_m * 100$	30.32%			
9. Determinación del grado de saturación de agua y aire (Gw%) (Ga%)				
$G_w\% = V_w/V_v * 100$	32.56%			
$G_a\% = (V_v - V_w)/V_v * 100$	67.44%			



ENSAYO DE GRANULOMETRÍA

Elaborado por	Jimmy Macas		Fecha:	23-jul-19	
Zona N°:	E7		Normativa:	ASTM D-421-58 y AASHTO T-87-70	
PESO DE LA MUESTRA:			250	gr	
# Tamiz	Tamaño de partículas (mm)	P. Retenido Parcial	P. Retenido Acumulado	% Retenido	% Que pasa
#8	2.360	3.5	3.5	1.41%	98.59%
#10	2.000	2.0	5.5	2.21%	97.79%
#16	1.180	10.5	16.0	6.43%	93.57%
#30	0.600	30.1	46.1	18.54%	81.46%
#40	0.425	24.5	70.6	28.39%	71.61%
#50	0.300	25.8	96.4	38.76%	61.24%
#60	0.250	37.6	134.0	53.88%	46.12%
#100	0.150	65.4	199.4	80.18%	19.82%
#200	0.075	48.5	247.9	99.68%	0.32%
Pasa #200		0.8	0.8	0.32%	
TOTAL		248.7	248.7		
Resultados					
TNM	1.180	Cc:	2.73	Error permitido:	1.00%
D10	0.110			Error calculado:	0.52%
D30	0.190	Cu:	1.09	BIEN HECHO	
D60	0.300				
	Grava (G%)		Arena (S%)		Limo y Arcilla (finos%)
SUCS	0		99		1
AASHTO	1		98		1
SUCS	SP	Arena pobremente graduada			
AASHTO	A-3(0)	Arena fina			



ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA PARA SUELOS FINOS

Elaborado por	Jimmy Macas		Fecha:	7-ago-19	
Zona N°:	E7		Normativa:	AASHTO T 100 2015	
GRAVEDAD ESPECÍFICA (Gs)					
Peso del picnómetro	165.40	gr	$G_s = \frac{W_s}{W_s + W_{pt} - W_{pws}} \times G_w \quad (2)$ <p>Donde:</p> <p>W_s es el peso en gramos de los sólidos</p> <p>W_p/W_s es el peso del picnómetro + agua + suelo a temperatura Tx.</p> <p>G_w es la gravedad específica del agua a la temperatura Tx.</p>		
Temperatura del agua	23.00	°C			
Peso Picnómetro + agua (T°C) (Wpt)	660.46	gr			
Peso Picnómetro+agua+suelo (Wpws)	691.30	gr			
# Recipiente	55	g			
Peso Recipiente	81.80	gr			
Peso Recipiente + suelo seco	131.80	gr			
Peso Suelo Seco (Ws)	50.00	gr			
Desplazamiento del agua (Ws+Wpt-Wpws)	19.16	ml			
Factor de corrección por temperatura (K)	0.9993				
Gravedad Específica (Gs)	2.607				



TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADO "B"

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	7-ago-19
Zona N°:	E7	Normativa:	AASHTO T-180 y ASTM D-1557

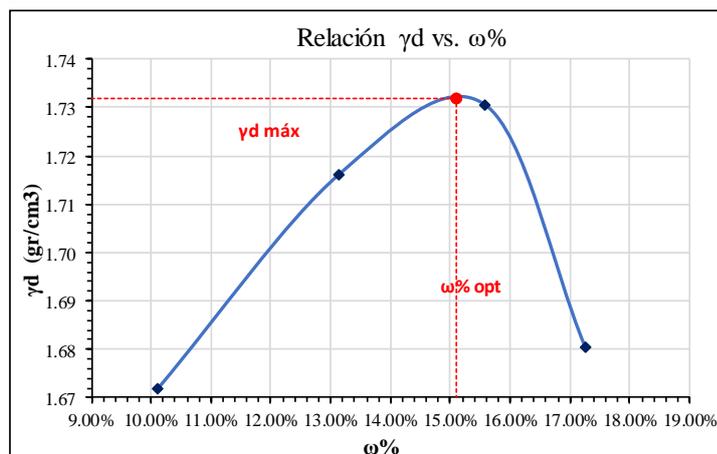
ESPECIFICACIONES DEL ENSAYO

N° de Golpes:	56	N° de capas:	5	Peso martillo:	10 lb
Altura de caída:	18" o 1.5ft	Volumen molde:	2328.79	cm ³	
Peso molde:	14805	gr	Diámetro:	15.22	cm
Energía de compactación:	55986	lb/ft ³	Altura:	12.8	cm
Ensayo número	1	2	3	4	
Peso inicial deseado (gr)	6000	6000	6000	6000	
Humedad inicial añadida (%)	9	12	15	18	
P. molde + suelo húmedo (gr)	19092	19326	19463	19394	
Peso suelo húmedo (gr)	4287	4521	4658	4589	
Peso unitario húmedo γ_m (gr/cm ³)	1.841	1.941	2.000	1.971	

CONTENIDO DE HUMEDAD

# Recipiente	11	55	65	90	59	89	12	22
R. + Suelo húmedo (gr)	99.6	103.2	105.2	104.8	104.8	106.4	108.3	107.5
R. + Suelo seco (gr)	93.5	96.3	96.6	96.2	94.9	96.2	96.0	95.3
Peso agua (gr)	6.1	6.9	8.6	8.6	9.9	10.2	12.3	12.2
Peso recipiente (gr)	30.9	30.4	31.1	30.7	30.8	31.3	25.3	24.0
Peso suelo seco (gr)	62.6	65.9	65.5	65.5	64.1	64.9	70.7	71.3
Contenido humedad $\omega\%$	9.7%	10.5%	13.1%	13.1%	15.4%	15.7%	17.4%	17.1%
Cont. Humedad prom. $\omega\%$	10.11%		13.13%		15.58%		17.25%	
Densidad seca γ_d (gr/cm ³)	1.672		1.716		1.731		1.681	
γ_d Máxima (gr/cm ³)	1.732							
$\omega\%$ óptimo	15.10%							
Grado de compactación Gc (%)	107%							

Observaciones:





TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO

ENSAYO DE LÍMITE PLÁSTICO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	12-ago-19
Zona N°:	E7	Normativa:	AASHTO T-90-70

LÍMITE PLÁSTICO

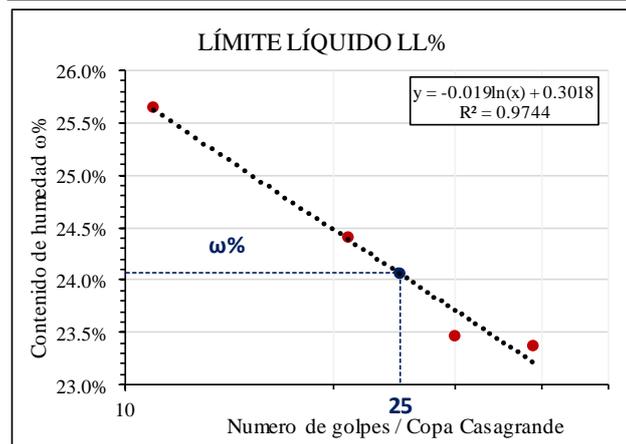
Número de muestra	1	2	3	4	5
# Recipiente	9	36	61	47	44
Masa Recipiente (gr)	6.00	5.90	6.10	6.00	6.20
Masa Muestra Húmeda + Recipiente (gr)	7.20	7.20	7.20	7.10	7.70
Masa Muestra seca + Recipiente (gr)	6.90	6.90	7.00	6.90	7.40
Masa Agua (gr)	0.30	0.30	0.20	0.20	0.30
Masa Muestra seca (gr)	0.90	1.00	0.90	0.90	1.20
Contenido de humedad (%)	33.3%	30.0%	22.2%	22.2%	25.0%
$\omega\%$ promedio	26.56%				
Límite Plástico %	26.56%				

ENSAYO DE LÍMITE LÍQUIDO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	15-ago-19
Zona N°:	E7	Normativa:	AASHTO T-90-70 y ASTM D-424-71

LÍMITE LÍQUIDO

# Recipiente	38	42	R2	58	55	J10	32	59
Peso Recipiente (gr)	6.2	6.1	6.0	6.0	6.1	6.0	5.2	6.2
Peso Muestra Húmeda + Recipiente (gr)	10.8	10.3	11.1	11.6	11.6	11.0	10.0	10.9
Peso Muestra seca + Recipiente (gr)	9.8	9.5	10.1	10.5	10.5	10.1	9.1	10.0
Peso Agua (gr)	1.0	0.8	1.0	1.1	1.1	0.9	0.9	0.9
Peso de la muestra seca (gr)	3.6	3.4	4.1	4.5	4.4	4.1	3.9	3.8
Contenido de humedad ($\omega\%$)	27.8%	23.5%	24.4%	24.4%	25.0%	22.0%	23.1%	23.7%
$\omega\%$ promedio	25.65%		24.42%		23.48%		23.38%	
Número de golpes	11		21		30		39	



ÍNDICE PLÁSTICO	
Límite Plástico Lp%:	25.56
Límite Líquido Ll%:	24.06
ÍNDICE PLÁSTICO Ip:	Ip= Ll - Lp
ÍNDICE PLÁSTICO Ip:	-1.5
No Plástico	

N° golpes :	25	LL = A*Ln(25)+B	
A=	-0.019	LÍMITE LÍQUIDO	24.06%
B=	0.3018	LL%	



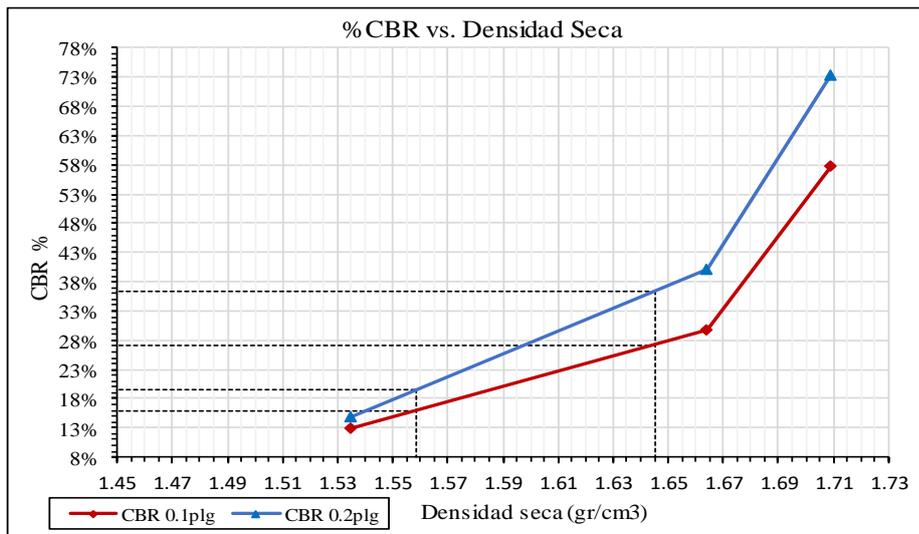
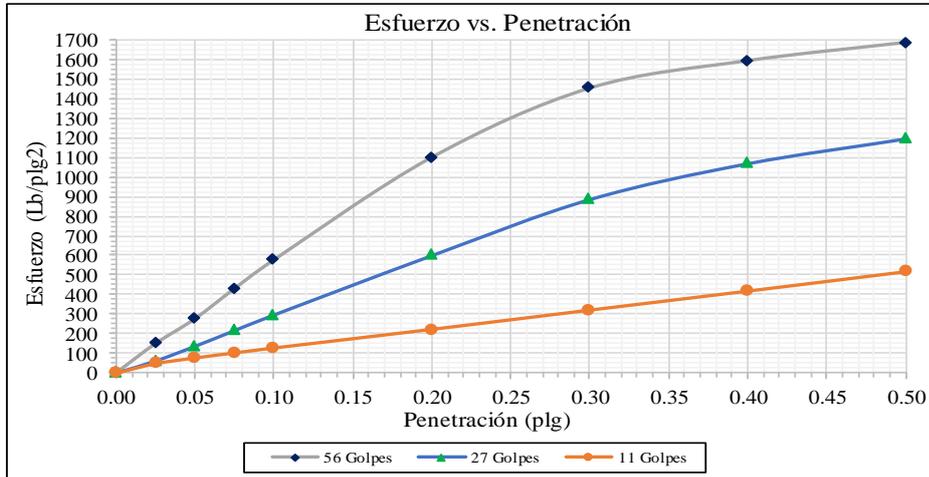
TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO
ENSAYO CBR DE LABORATORIO

Elaborado por:	Jimmy Macas		Fecha:	11-sep-19		
Zona N°:	E7		Normativa:	ASTM: D1883-73-AASHTO:T-193-63		
DATOS DE MOLDEO						
N° Molde	56		27		11	
N° golpes por capa	56		27		11	
Muestra Húmeda + molde (gr)	12754		11074		11014	
Masa del molde (gr)	8300		6726		6969	
Masa muestra húmeda (gr)	4454		4348		4045	
Volumen de muestra (cm ³)	2264.61		2268.33		2253.34	
Peso unitario húmedo (gr/cm ³)	1.967		1.917		1.795	
CONTENIDO DE HUMEDAD						
	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
N° recipiente	2	1	3	7	6	8
Masa suelo húmedo + recipiente (gr)	132.6	201.5	137.7	144.7	139.8	136.6
Masa suelo seco + recipiente (gr)	119.7	185.4	124.2	131.2	125.9	122.6
Masa del agua (gr)	12.9	16.1	13.5	13.5	13.90	14
Masa del recipiente (gr)	32.7	80.4	34.2	43.5	43.3	40.7
Masa suelo seco (gr)	87	105	90	87.7	82.6	81.9
Contenido de humedad ω%	14.83%	15.33%	15.00%	15.39%	16.83%	17.09%
ω% Promedio	15.08%		15.20%		16.96%	
Peso unitario seco (gr/cm ³)	1.709		1.664		1.535	
DATOS DESPUÉS DE LA SATURACIÓN						
Muestra húmeda + molde (gr)	12830		11181		11179	
Masa Molde (gr)	8300		6726		6969	
Masa muestra húmeda (gr)	4530		4455		4210	
Masa agua absorbida (gr)	76		107		165	
% Agua absorbida	1.71%		2.46%		4.08%	
Esponjamiento inicial	1.38		1.50		8.57	
Esponjamiento final	1.58		1.78		8.69	
Esponjamiento total	0.20		0.28		0.12	
CONTENIDO DE HUMEDAD						
	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
N° recipiente	7	16	3	4	9	17
Masa suelo húmedo + recipiente (gr)	149	140.2	155.3	155.1	174.1	182.7
Masa suelo seco + recipiente (gr)	132.4	125.6	137.3	137.9	151.3	159.9
Masa del agua (gr)	16.6	14.6	18	17.2	22.8	22.8
Masa del recipiente (gr)	36.1	36.1	36.5	36.5	36.6	44.5
Masa suelo seco (gr)	96.3	89.5	100.8	101.4	114.7	115.4
Contenido de humedad ω%	17.24%	16.31%	17.86%	16.96%	19.88%	19.76%
ω% Promedio	16.78%		17.41%		19.82%	
ENSAYO						
N° MOLDE	1		2		3	
Penetración (p1g)	dial (lb)	Presión (lb/p1g ²)	dial (lb)	Presión (lb/p1g ²)	dial (lb)	Presión (lb/p1g ²)
0.000	0	0.00	0	0.00	0	0.00
0.025	450	150.00	185	61.67	145	48.33
0.050	830	276.67	410	136.67	233	77.67
0.075	1290	430.00	651	217.00	310	103.33
0.100	1730	576.67	890	296.67	386	128.67
0.200	3300	1100.00	1800	600.00	670	223.33
0.300	4360	1453.33	2660	886.67	964	321.33
0.400	4780	1593.33	3210	1070.00	1254	418.00
0.500	5059	1686.33	3590	1196.67	1550	516.67
PORCENTAJES CBR (Corregidos)						
N° MOLDE	Presión	CBR 0.1	Densidad	Presión	CBR 0.2 p1g	Densidad
56	576.67	57.67%	1.709	1100.00	73.33%	1.709
27	296.67	29.67%	1.664	600.00	40.00%	1.664
11	128.67	12.87%	1.535	223.33	14.89%	1.535



TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO
ENSAYO CBR DE LABORATORIO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	11-sep-19
Zona N°:	E7	Normativa:	ASTM: D1883-73-AASHTO:T-193-63



DENSIDAD SECA MÁXIMA	1.732 gr/cm³
----------------------	--------------

	DSM	% CBR 0.1plg	% CBR 0.2plg	% CBR MAYOR
90%	1.559	16.00%	19.50%	19.50%
95%	1.645	27.10%	36.40%	36.40%

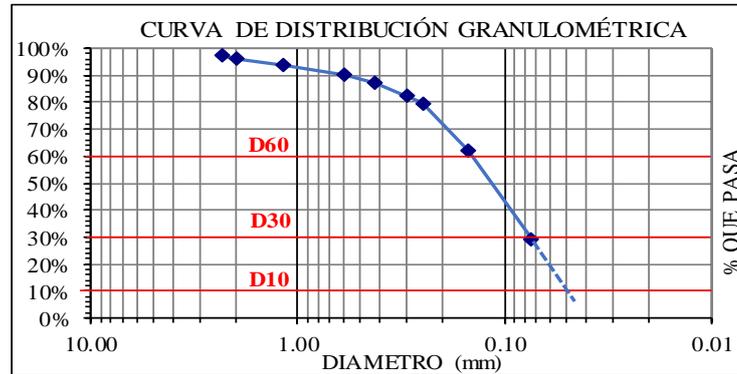
 UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECANICA CARRERA DE INGENIERIA CIVIL					
TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO					
ENSAYO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA					
Elaborado por:	Jimmy Macas		Fecha:	16-jul-19	
Zona N°:	E8		Normativa:	IEEE STD 81-1983	
COORDENADAS (UTM)		Zona	Norte (m)	Este (m)	Elevación (m)
		17M	9857644	762995	2808
N° ensayo	1	2	3		
Resistividad ρ (Ω/m)	182.20	193.50	175.20		
Resistividad Prom. ρ (Ω/m)	183.63				
Resistencia R (Ω)	29.20				
 UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECANICA CARRERA DE INGENIERIA CIVIL					
TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO					
DENSIDAD DE CAMPO					
Elaborado por:	Jimmy Macas		Fecha:	16-jul-19	
Zona N°:	E8		Normativa:	AASHTO T 191 2014	
1. Contenido de Humedad					
N° Recipiente	63		68		
Masa suelo humedo + recipiente (gr)	107.4		108.7		
Masa suelo seco + recipiente (gr)	100		101.9		
Masa Recipiente (gr)	31.1		30.8		
Masa de agua Ww (gr)	7.4		6.8		
Masa suelo seco Ws (gr)	68.9		71.1		
Contenido de humedad (W%)	10.74%		9.56%		
W Promedio (%)	10.15%				
2. Determinación de la masa del Suelo Extraído					
Masa del suelo + recipiente (gr)	949.9				
Masa del recipiente (gr)	3.0				
Masa del suelo Wm (gr)	946.9				
3. Calibración del Cono de arena de Ottawa					
Masa inicial frasco + cono + arena (gr)	6348.00				
Masa final frasco + cono + arena (gr)	6005.00				
Masa Arena del Cono W_{sand} (gr)	343.00				
Volumen V_{sand} (cm ³)	209.44				
$\gamma_{sand} = W_{sand}/V_{sand}$ (gr/cm ³)	1.638				
4. Determinación de volumen del hueco en el suelo					
Lectura inicial frasco + cono + arena (gr)	7165.00				
Lectura final frasco + cono + arena (gr)	5911.00				
Masa de Arena en el hueco W_{sand} (gr)	911.00				
Volumen del suelo V_m = W_{sand}/γ_{sand} (cm ³)	556.27				
5. Determinación del peso volumetrico de la masa					
$\gamma_m = W_m/V_m$ (gr/cm ³)	1.702				
6. Determinación del peso volumetrico seco					
$\gamma_d = \gamma_m/(1+w)$ (gr/cm ³)	1.545				
7. Determinación de la relación de Vacios (e)					
Peso específico relativo de los sólidos S_s	2.65				
Volumen de sólidos V_s (cm ³)	26.00				
Volumen de agua V_w (cm ³)	7.40				
Volumen de la muestra V_m (cm ³)	44.82				
Volumen de vacios V_v (cm ³)	18.82				
$e = V_v/V_s$	0.72				
8. Determinación de la Porosidad (n%)					
$n\% = V_v/V_m * 100$	41.99%				
9. Determinación del grado de saturación de agua y aire (Gw%) (Ga%)					
$G_w\% = V_w/V_v * 100$	39.31%				
$G_a\% = (V_v - V_w)/V_v * 100$	60.69%				



TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO

ENSAYO DE GRANULOMETRÍA

Elaborado por	Jimmy Macas		Fecha:	23-jul-19	
Zona N°:	E8		Normativa:	ASTM D-421-58 y AASHTO T-87-70	
PESO DE LA MUESTRA:			250	gr	
# Tamiz	Tamaño de partículas (mm)	P. Retenido Parcial	P. Retenido Acumulado	% Retenido	% Que pasa
#8	2.360	6.6	6.6	2.65%	97.35%
#10	2.000	2.3	8.9	3.58%	96.42%
#16	1.180	6.4	15.3	6.15%	93.85%
#30	0.600	9.1	24.4	9.80%	90.20%
#40	0.425	7.4	31.8	12.78%	87.22%
#50	0.300	11.9	43.7	17.56%	82.44%
#60	0.250	6.8	50.5	20.29%	79.71%
#100	0.150	43.5	94.0	37.77%	62.23%
#200	0.075	81.5	175.5	70.51%	29.49%
Pasa #200		73.4	73.4	29.49%	
TOTAL		248.9	248.9		
Resultados					
TNM	1.180	Cc:	3.19	Error permitido:	1.00%
D10	0.047			Error calculado:	0.44%
D30	0.075	Cu:	0.80	BIEN HECHO	
D60	0.150				
		Grava (G%)	Arena (S%)	Limo y Arcilla (finos%)	
SUCS	0		71	29	
AASHTO	3		69	29	
SUCS	SM	Arena con limos de baja plasticidad			
AASHTO	A-2-4(0)	Arena Limosa			



ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA PARA SUELOS FINOS

Elaborado por	Jimmy Macas	Fecha:	7-ago-19
Zona N°:	E8	Normativa:	AASHTO T 100 2015
GRAVEDAD ESPECÍFICA (Gs)			
Peso del picnómetro	165.40	gr	$G_s = \frac{W_s}{W_s + W_{pt} - W_{pws}} \times G_w \quad (2)$ <p>Donde: W_s es el peso en gramos de los sólidos W_{pws} es el peso del picnómetro + agua + suelo a temperatura Tx. G_w es la gravedad específica del agua a la temperatura Tx.</p>
Temperatura del agua	23.00	°C	
Peso Picnómetro + agua (T°C) (W _{pt})	660.46	gr	
Peso Picnómetro+agua+suelo (W _{pws})	691.40	gr	
# Recipiente	100		
Peso Recipiente	131.00	gr	
Peso Recipiente + suelo seco	180.20	gr	
Peso Suelo Seco (W _s)	49.20	gr	
Desplazamiento del agua (W _s +W _{pt} -W _{pws})	18.26	ml	
Factor de corrección por temperatura (K)	0.9993		
Gravedad Específica (G _s)	2.692		



TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADO "B"

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	7-ago-19
Zona N°:	E8	Normativa:	AASHTO T-180 y ASTM D-1557

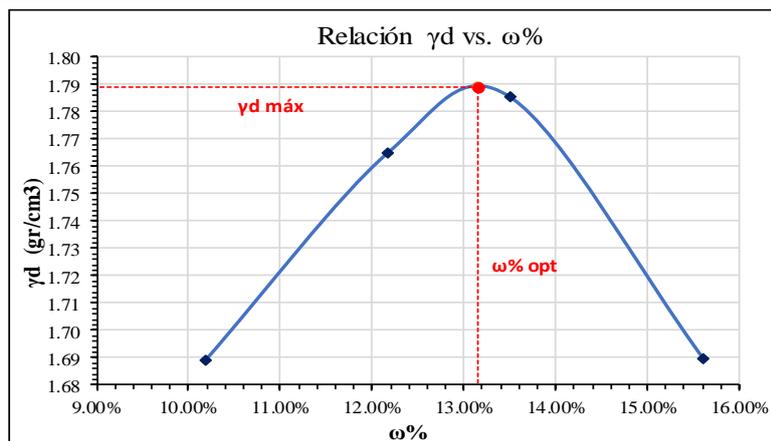
ESPECIFICACIONES DEL ENSAYO

N° de Golpes:	56	N° de capas:	5	Peso martillo:	10 lb
Altura de caída:	18' o 1.5ft	Volumen molde:	2328.79		cm ³
Peso molde:	14805	gr	Diámetro:	15.22	cm
Energía de compactación:	55986	lb/ft ³	Altura:	12.8	cm
Ensayo número	1	2	3	4	
Peso inicial deseado (gr)	6000	6000	6000	6000	
Humedad inicial añadida (%)	6	9	12	15	
P. molde + suelo húmedo (gr)	19139	19416	19524	19354	
Peso suelo húmedo (gr)	4334	4611	4719	4549	
Peso unitario húmedo γ_m (gr/cm ³)	1.861	1.980	2.026	1.953	

CONTENIDO DE HUMEDAD

# Recipiente	15	16	23	24	25	26	27	28
R. + Suelo húmedo (gr)	105.1	105.8	112.2	107.3	105.9	106.6	109.2	107.1
R. + Suelo seco (gr)	98.8	99.3	104.8	100.7	98.6	99.3	100.4	98.8
Peso agua (gr)	6.3	6.5	7.4	6.6	7.3	7.3	8.8	8.3
Peso recipiente (gr)	36.2	36.2	45.0	45.6	44.8	45.0	44.7	45.0
Peso suelo seco (gr)	62.6	63.1	59.8	55.1	53.8	54.3	55.7	53.8
Contenido humedad $\omega\%$	10.1%	10.3%	12.4%	12.0%	13.6%	13.4%	15.8%	15.4%
Cont. Humedad prom. $\omega\%$	10.18%		12.18%		13.51%		15.61%	
Densidad seca γ_d (gr/cm ³)	1.689		1.765		1.785		1.690	
γ_d Máxima (gr/cm ³)	1.789							
$\omega\%$ optimo	13.15%							
Grado de compactación G_c (%)	86%							

Observaciones:





TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO

ENSAYO DE LÍMITE PLÁSTICO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	12-ago-19
Zona N°:	E8	Normativa:	AASHTO T-90-70

LÍMITE PLÁSTICO

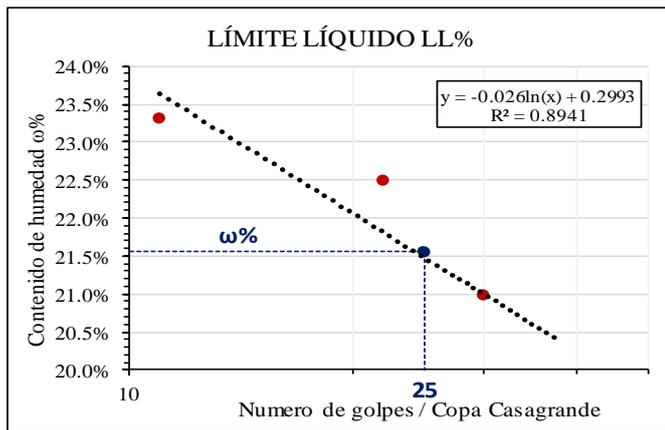
Número de muestra	1	2	3	4	5
# Recipiente	17A	35	33	34	54
Masa Recipiente (gr)	6.00	6.10	6.10	6.20	6.00
Masa Muestra Húmeda + Recipiente (gr)	7.30	7.20	7.20	7.40	7.20
Masa Muestra seca + Recipiente (gr)	7.10	7.00	7.00	7.20	7.00
Masa Agua (gr)	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Masa Muestra seca (gr)	1.10	0.90	0.90	1.00	1.00
Contenido de humedad (%)	18.2%	22.2%	22.2%	20.0%	20.0%
ω% promedio	20.53%				
Límite Plástico %	20.53%				

ENSAYO DE LÍMITE LIQUIDO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	15-ago-19
Zona N°:	E8	Normativa:	AASHTO T-90-70 y ASTM D-424-71

LÍMITE LÍQUIDO

# Recipiente	75	84	18A	31	54	56	8	78
Peso Recipiente (gr)	4.2	4.2	6.1	7.4	6.0	6.2	6.9	4.3
Peso Muestra Húmeda + Recipiente (gr)	10.0	9.5	11.4	13.0	10.8	10.6	12.7	9.9
Peso Muestra seca + Recipiente (gr)	8.9	8.5	10.4	12.0	9.9	9.9	11.7	9.0
Peso Agua (gr)	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	0.7	1.0	0.9
Peso de la muestra seca (gr)	4.7	4.3	4.3	4.6	3.9	3.7	4.8	4.7
Contenido de humedad (ω%)	23.4%	23.3%	23.3%	21.7%	23.1%	18.9%	20.8%	19.1%
ω% promedio	23.33%		22.50%		21.00%		19.99%	
Número de golpes	11		22		30		38	



ÍNDICE PLÁSTICO

Límite Plástico Lp% :	20.53
Límite Líquido Ll% :	21.56
ÍNDICE PLÁSTICO Ip:	Ip= Ll - Lp
ÍNDICE PLÁSTICO Ip:	1.03

N° golpes :	25	LL = A*Ln(25)+B
A=	-0.026	LÍMITE LÍQUIDO LL%
B=	0.2993	21.56%



TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO

ENSAYO CBR DE LABORATORIO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	6-sep-19
Zona N°:	E8	Normativa:	ASTM: D1883-73-AASHTO:T-193-63

DATOS DE MOLDEO

N° Molde	56	27	11A
N° golpes por capa	56	27	11
Muestra Húmeda + molde (gr)	14595	12534	12403
Masa del molde (gr)	9645	8399	8352
Masa muestra húmeda (gr)	4950	4135	4051
Volumen de muestra (cm ³)	2316.56	2059.56	2262.27
Peso unitario húmedo (gr/cm ³)	2.137	2.008	1.791

CONTENIDO DE HUMEDAD

	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
N° recipiente	90	53	11	86	1	7
Masa suelo húmedo + recipiente (gr)	143.1	111.1	115.8	126	155.8	135.2
Masa suelo seco + recipiente (gr)	129.2	102.3	105.5	114.1	146.5	123.3
Masa del agua (gr)	13.9	8.8	10.3	11.9	9.30	11.9
Masa del recipiente (gr)	30.5	30.8	30.7	31	80.4	43.4
Masa suelo seco (gr)	98.7	71.5	74.8	83.1	66.1	79.9
Contenido de humedad ω%	14.08%	12.31%	13.77%	14.32%	14.07%	14.89%
ω% Promedio	13.20%		14.05%		14.48%	
Peso unitario seco (gr/cm ³)	1.888		1.760		1.564	

DATOS DESPUÉS DE LA SATURACIÓN

Muestra húmeda + molde (gr)	14680	12687	12701
Masa Molde (gr)	9645	8399	8352
Masa muestra húmeda (gr)	5035	4288	4349
Masa agua absorbida (gr)	85	153	298
% Agua absorbida	1.72%	3.70%	7.36%
Esponjamiento inicial	1.10	4.21	7.7
Esponjamiento final	1.19	4.36	8.5
Esponjamiento total	0.09	0.15	0.8

CONTENIDO DE HUMEDAD

	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
N° recipiente	24	35	8	19	36	9
Masa suelo húmedo + recipiente (gr)	105.5	99.8	97.9	99.7	102.1	100.9
Masa suelo seco + recipiente (gr)	91.5	87.8	86.6	87.4	87.7	87.5
Masa del agua (gr)	14	12	11.3	12.3	14.4	13.4
Masa del recipiente (gr)	24.1	24.6	26.6	26.4	24.7	25.9
Masa suelo seco (gr)	67.4	63.2	60	61	63	61.6
Contenido de humedad ω%	20.77%	18.99%	18.83%	20.16%	22.86%	21.75%
ω% Promedio	19.88%		19.50%		22.31%	

ENSAYO

N° MOLDE	1		2		3	
	dial (lb)	Presión (lb/plg ²)	dial (lb)	Presión (lb/plg ²)	dial (lb)	Presión (lb/plg ²)
0.000	0	0.00	0	0.00	0	0.00
0.025	275	91.67	142	47.33	126	42.00
0.050	550	183.33	333	111.00	173	57.67
0.075	808	269.33	498	166.00	203	67.67
0.100	1035	345.00	645	215.00	240	80.00
0.200	2050	683.33	1261	420.33	354	118.00
0.300	2863	954.33	1867	622.33	467	155.67
0.400	3585	1195.00	2471	823.67	573	191.00
0.500	4178	1392.67	2890	963.33	677	225.67

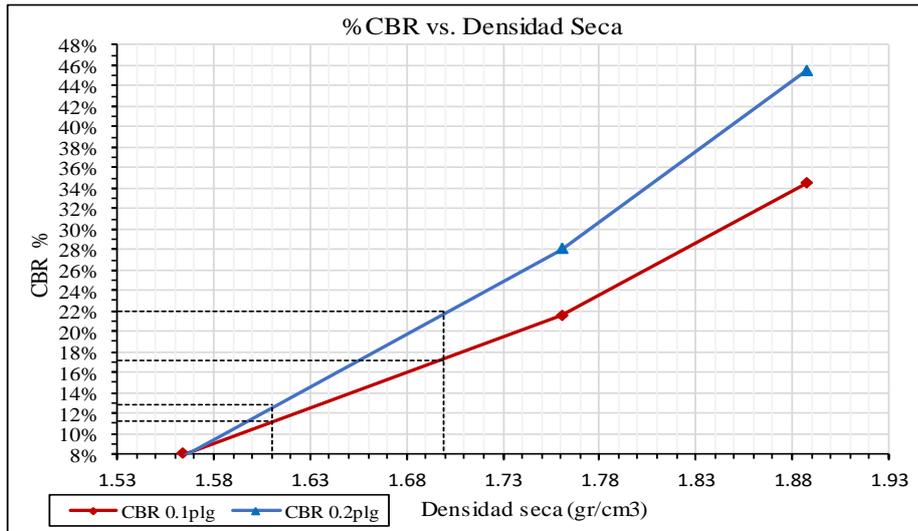
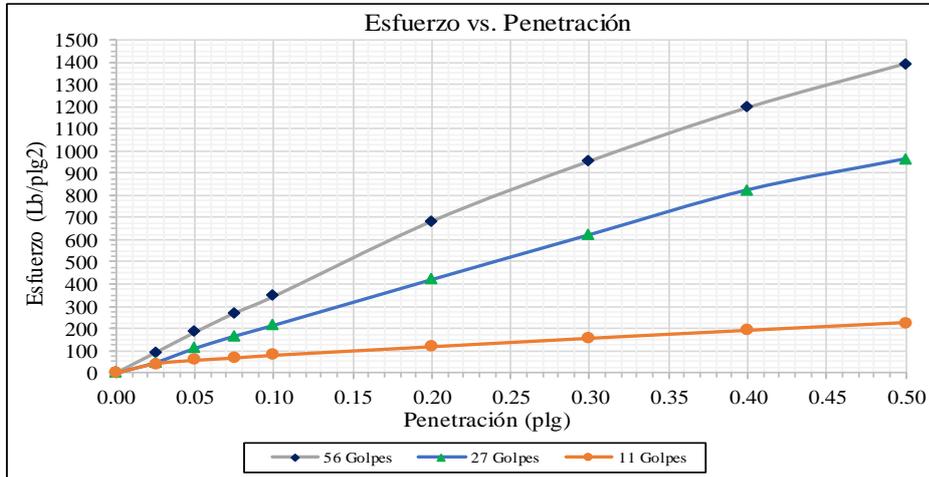
PORCENTAJES CBR (Corregidos)

N° MOLDE	Presión	CBR 0.1	Densidad	Presión	CBR 0.2 plg	Densidad
56	345.00	34.50%	1.888	683.33	45.56%	1.888
27	215.00	21.50%	1.760	420.33	28.02%	1.760
11A	80.00	8.00%	1.564	118.00	7.87%	1.564



TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO
ENSAYO CBR DE LABORATORIO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	6-sep-19
Zona N°:	E8	Normativa:	ASTM: D1883-73-AASHTO:T-193-63



DENSIDAD SECA MÁXIMA	1.789 gr/cm³
----------------------	--------------

	DSM	% CBR 0.1plg	% CBR 0.2plg	% CBR MAYOR
90%	1.610	11.20%	12.80%	12.80%
95%	1.700	17.20%	22.00%	22.00%

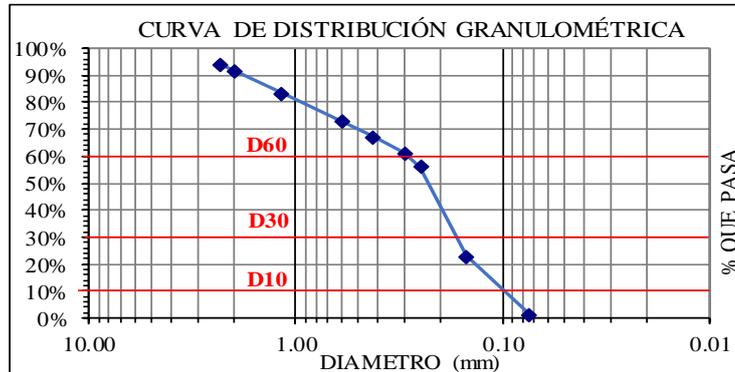
 UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECANICA CARRERA DE INGENIERIA CIVIL 				
TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO				
ENSAYO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA				
Elaborado por:	Jimmy Macas		Fecha:	14-jun-19
Zona N°:	E9		Normativa:	IEEE STD 81-1983
COORDENADAS (UTM)		Zona	Norte (m)	Este (m)
		17M	9857435	763239
Elevación (m)		2814		
N° ensayo	1	2	3	
Resistividad ρ (Ω/m)	54.60	41.40	42.70	
Resistividad Prom. ρ (Ω/m)	46.23			
Resistencia R (Ω)	7.40			
 UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECANICA CARRERA DE INGENIERIA CIVIL 				
TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO				
DENSIDAD DE CAMPO				
Elaborado por:	Jimmy Macas		Fecha:	14-jul-19
Zona N°:	E9		Normativa:	AASHTO T 191 2014
1. Contenido de Humedad				
N° Recipiente	65		50	
Masa suelo humedo + recipiente (gr)	92.7		99.1	
Masa suelo seco + recipiente (gr)	82.8		88.1	
Masa Recipiente (gr)	31.1		31.2	
Masa de agua Ww (gr)	9.9		11	
Masa suelo seco Ws (gr)	51.7		56.9	
Contenido de humedad (W%)	19.15%		19.33%	
W Promedio (%)	19.24%			
2. Determinación de la masa del Suelo Extraído				
Masa del suelo + recipiente (gr)	1708.60			
Masa del recipiente (gr)	7.20			
Masa del suelo Wm (gr)	1701.40			
3. Calibración del Cono de arena de Ottawa				
Masa inicial frasco + cono + arena (gr)	6217.40			
Masa final frasco + cono + arena (gr)	4725.40			
Masa Arena del Cono W_{sand} (gr)	1492.00			
Volumen V_{sand} (cm ³)	926.58			
$\gamma_{sand} = W_{sand}/V_{sand}$ (gr/cm ³)	1.610			
4. Determinación de volumen del hueco en el suelo				
Lectura inicial frasco + cono + arena (gr)	6217.40			
Lectura final frasco + cono + arena (gr)	3138.70			
Masa de Arena en el hueco W_{sand} (gr)	1586.70			
Volumen del suelo V_m = W_{sand}/γ_{sand} (cm ³)	985.39			
5. Determinación del peso volumetrico de la masa				
$\gamma_m = W_m/V_m$ (gr/cm ³)	1.727			
6. Determinación del peso volumetrico seco				
$\gamma_d = \gamma_m/(1+w)$ (gr/cm ³)	1.448			
7. Determinación de la relación de Vacios (e)				
Peso específico relativo de los sólidos S_s	2.65			
Volumen de sólidos V_s (cm ³)	19.51			
Volumen de agua V_w (cm ³)	9.90			
Volumen de la muestra V_m (cm ³)	35.68			
Volumen de vacios V_v (cm ³)	16.17			
$e = V_v/V_s$	0.83			
8. Determinación de la Porosidad (n%)				
$n\% = V_v/V_m * 100$	45.32%			
9. Determinación del grado de saturación de agua y aire (Gw%) (Ga%)				
$G_w\% = V_w/V_v * 100$	61.24%			
$G_a\% = (V_v - V_w)/V_v * 100$	38.76%			



TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO

ENSAYO DE GRANULOMETRÍA

Elaborado por	Jimmy Macas		Fecha:	22-jul-19	
Zona N°:	E9		Normativa:	ASTM D-421-58 y AASHTO T-87-70	
PESO DE LA MUESTRA:			250	gr	
# Tamiz	Tamaño de partículas (mm)	P. Retenido Parcial	P. Retenido Acumulado	% Retenido	% Que pasa
#8	2.360	14.2	14.2	5.74%	94.26%
#10	2.000	6.3	20.5	8.28%	91.72%
#16	1.180	20.8	41.3	16.68%	83.32%
#30	0.600	25.8	67.1	27.10%	72.90%
#40	0.425	13.8	80.9	32.67%	67.33%
#50	0.300	15.0	95.9	38.73%	61.27%
#60	0.250	12.4	108.3	43.74%	56.26%
#100	0.150	83.0	191.3	77.26%	22.74%
#200	0.075	52.8	244.1	98.59%	1.41%
Pasa #200		3.5	3.5	1.41%	
TOTAL		247.6	247.6		
Resultados					
TNM	2.360	Cc:	2.80	Error permitido:	1.00%
D10	0.100			Error calculado:	0.96%
D30	0.170	Cu:	1.03	BIEN HECHO	
D60	0.280				
	Grava (G%)		Arena (S%)		Limo y Arcilla (finos%)
SUCS	0		99		1
AASHTO	6		93		1
SUCS	SP	Arena pobremente graduada			
AASHTO	A-3(0)	Arena fina			



ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA PARA SUELOS FINOS

Elaborado por	Jimmy Macas	Fecha:	8-ago-19
Zona N°:	E9	Normativa:	AASHTO T 100 2015
GRAVEDAD ESPECÍFICA (Gs)			
Peso del picnómetro	165.40	gr	$G_s = \frac{W_s}{W_s + W_{pt} - W_{pws}} \times G_w \quad (2)$ <p>Donde: W_s es el peso en gramos de los sólidos W_{pws} es el peso del picnómetro + agua + suelo a temperatura Tx. G_w es la gravedad específica del agua a la temperatura Tx.</p>
Temperatura del agua	23.00	°C	
Peso Picnómetro + agua (T°C) (W _{pt})	660.46	gr	
Peso Picnómetro+agua+suelo (W _{pws})	689.30	gr	
# Recipiente	100		
Peso Recipiente	131.00	gr	
Peso Recipiente + suelo seco	177.80	gr	
Peso Suelo Seco (W _s)	46.80	gr	
Desplazamiento del agua (W _s +W _{pt} -W _{pws})	17.96	ml	
Factor de corrección por temperatura (K)	0.9993		
Gravedad Específica (G _s)	2.603		



TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADO "B"

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	24-jul-19
Zona N°:	E9	Normativa:	AASHTO T-180 y ASTM D-1557

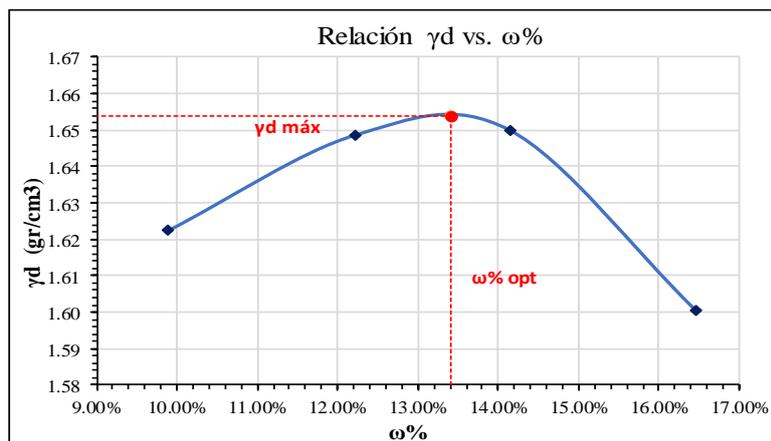
ESPECIFICACIONES DEL ENSAYO

N° de Golpes:	56	N° de capas:	5	Peso martillo:	10 lb
Altura de caída:	18' o 1.5ft	Volumen molde:	2328.79		cm ³
Peso molde:	14805	gr	Diámetro:	15.22	cm
Energía de compactación:	55986	lb/ft ³	Altura:	12.8	cm
Ensayo número	1	2	3	4	
Peso inicial deseado (gr)	6000	6000	6000	6000	
Humedad inicial añadida (%)	6	9	12	15	
P. molde + suelo húmedo (gr)	18957	19114	19191	19146	
Peso suelo húmedo (gr)	4152	4309	4386	4341	
Peso unitario húmedo γ_m (gr/cm ³)	1.783	1.850	1.883	1.864	

CONTENIDO DE HUMEDAD

# Recipiente	13	14	17	18	19	20	21	22
R. + Suelo húmedo (gr)	88.7	86.6	100.5	100.4	109.0	105.2	105.1	107.6
R. + Suelo seco (gr)	83.9	82.1	94.7	94.0	101.0	97.7	96.6	98.7
Peso agua (gr)	4.8	4.5	5.8	6.4	8.0	7.5	8.5	8.9
Peso recipiente (gr)	36.0	36.0	44.5	44.4	45.1	44.0	44.6	45.0
Peso suelo seco (gr)	47.9	46.1	50.2	49.6	55.9	53.7	52.0	53.7
Contenido humedad $\omega\%$	10.0%	9.8%	11.6%	12.9%	14.3%	14.0%	16.3%	16.6%
Cont. Humedad prom. $\omega\%$	9.89%		12.23%		14.14%		16.46%	
Densidad seca γ_d (gr/cm ³)	1.622		1.649		1.650		1.601	
γ_d Máxima (gr/cm ³)	1.654							
$\omega\%$ optimo	13.40%							
Grado de compactación G_c (%)	88%							

Observaciones:





TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO

ENSAYO DE LÍMITE PLÁSTICO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	7-ago-19
Zona N°:	E9	Normativa:	AASHTO T-90-70

LÍMITE PLÁSTICO

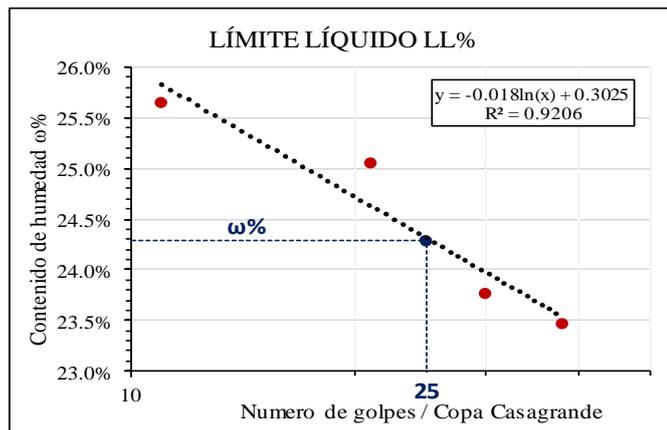
Número de muestra	1	2	3	4	5
# Recipiente	9	36	61	47	44
Masa Recipiente (gr)	6.00	5.90	6.10	6.00	6.20
Masa Muestra Húmeda + Recipiente (gr)	7.20	7.50	7.80	8.50	7.40
Masa Muestra seca + Recipiente (gr)	6.90	7.20	7.50	8.00	7.20
Masa Agua (gr)	0.30	0.30	0.30	0.50	0.20
Masa Muestra seca (gr)	0.90	1.30	1.40	2.00	1.00
Contenido de humedad (%)	33.3%	23.1%	21.4%	25.0%	20.0%
ω% promedio	24.57%				
Límite Plástico %	24.57%				

ENSAYO DE LÍMITE LÍQUIDO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	14-ago-19
Zona N°:	E9	Normativa:	AASHTO T-90-70 y ASTM D-424-71

LÍMITE LÍQUIDO

# Recipiente	12	44	5	16	34	35	7A	36
Peso Recipiente (gr)	7.4	6.2	7.4	7.3	6.2	6.1	6.0	6.0
Peso Muestra Húmeda + Recipiente (gr)	14.7	13.1	12.6	12.1	13.0	11.8	11.0	11.0
Peso Muestra seca + Recipiente (gr)	13.2	11.7	11.6	11.1	11.7	10.7	10.1	10.0
Peso Agua (gr)	1.5	1.4	1.0	1.0	1.3	1.1	0.9	1.0
Peso de la muestra seca (gr)	5.8	5.5	4.2	3.8	5.5	4.6	4.1	4.0
Contenido de humedad (ω%)	25.9%	25.5%	23.8%	26.3%	23.6%	23.9%	22.0%	25.0%
ω% promedio	25.66%		25.06%		23.77%		23.48%	
Número de golpes	11		21		30		38	



ÍNDICE PLÁSTICO	
Límite Plástico Lp% :	24.57
Límite Líquido Ll% :	24.30
ÍNDICE PLÁSTICO Ip:	Ip= Ll - Lp
ÍNDICE PLÁSTICO Ip:	-0.27
No plástico	

N° golpes :	25	LL = A*Ln(25)+B	
A=	-0.0185	LÍMITE LÍQUIDO LL%	24.30%
B=	0.3025		



TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO

ENSAYO CBR DE LABORATORIO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	12-ago-19
Zona N°:	E9	Normativa:	ASTM: D1883-73-AASHTO:T-193-63

DATOS DE MOLDEO

N° Molde	6A	A2	M1
N° golpes por capa	56	27	11
Muestra Húmeda + molde (gr)	12255	13589	13619
Masa del molde (gr)	7734	9292	9640
Masa muestra húmeda (gr)	4521	4297	3979
Volumen de muestra (cm ³)	2270.14	2288.21	2337.98
Peso unitario húmedo (gr/cm ³)	1.992	1.878	1.702

CONTENIDO DE HUMEDAD

	Superior		Inferior		Superior		Inferior	
N° recipiente	15	16	23	24	25	26		
Masa suelo húmedo + recipiente (gr)	63.2	58.2	74.8	74.1	82	85.3		
Masa suelo seco + recipiente (gr)	60.1	55.5	71	70.6	77.2	80		
Masa del agua (gr)	3.1	2.7	3.8	3.5	4.80	5.3		
Masa del recipiente (gr)	36.2	36.2	45	45.6	44.8	45		
Masa suelo seco (gr)	23.9	19.3	26	25	32.4	35		
Contenido de humedad ω%	12.97%	13.99%	14.62%	14.00%	14.81%	15.14%		
ω% Promedio	13.48%		14.31%		14.98%			
Peso unitario seco (gr/cm ³)	1.755		1.643		1.480			

DATOS DESPUÉS DE LA SATURACIÓN

Muestra húmeda + molde (gr)	12272	13650	13847
Masa Molde (gr)	7734	9292	9640
Masa muestra húmeda (gr)	4538	4358	4207
Masa agua absorbida (gr)	17	61	228
% Agua absorbida	0.38%	1.42%	5.73%
Esponjamiento inicial	5.53	2.28	2.84
Esponjamiento final	5.62	2.47	3.11
Esponjamiento total	0.09	0.19	0.27

CONTENIDO DE HUMEDAD

	Superior		Inferior		Superior		Inferior	
N° recipiente	5	11	3	4	1	12		
Masa suelo húmedo + recipiente (gr)	78	93.8	78.2	83.9	79	101.2		
Masa suelo seco + recipiente (gr)	69.5	82.2	69.5	74.7	70.1	88.1		
Masa del agua (gr)	8.5	11.6	8.7	9.2	8.9	13.1		
Masa del recipiente (gr)	35.8	35.7	36.5	36.5	35.4	35.7		
Masa suelo seco (gr)	33.7	46.5	33	38.2	34.7	52.4		
Contenido de humedad ω%	25.22%	24.95%	26.36%	24.08%	25.65%	25.00%		
ω% Promedio	25.08%		25.22%		25.32%			

ENSAYO

N° MOLDE	1		2		3	
	dial (lb)	Presión (lb/plg ²)	dial (lb)	Presión (lb/plg ²)	dial (lb)	Presión (lb/plg ²)
Penetración (plg)						
0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.025	435.96	145.32	213.90	71.30	150.66	50.22
0.050	826.50	275.50	437.10	145.70	243.96	81.32
0.075	1299.90	433.30	664.50	221.50	331.35	110.45
0.100	1740.00	580.00	906.00	302.00	417.00	139.00
0.200	3363.00	1121.00	1867.62	622.54	723.60	241.20
0.300	4383.99	1461.33	2685.90	895.30	1055.94	351.98
0.400	4799.31	1599.77	3330.63	1110.21	1309.80	436.60
0.500	5090.40	1696.80	3664.80	1221.60	1593.90	531.30

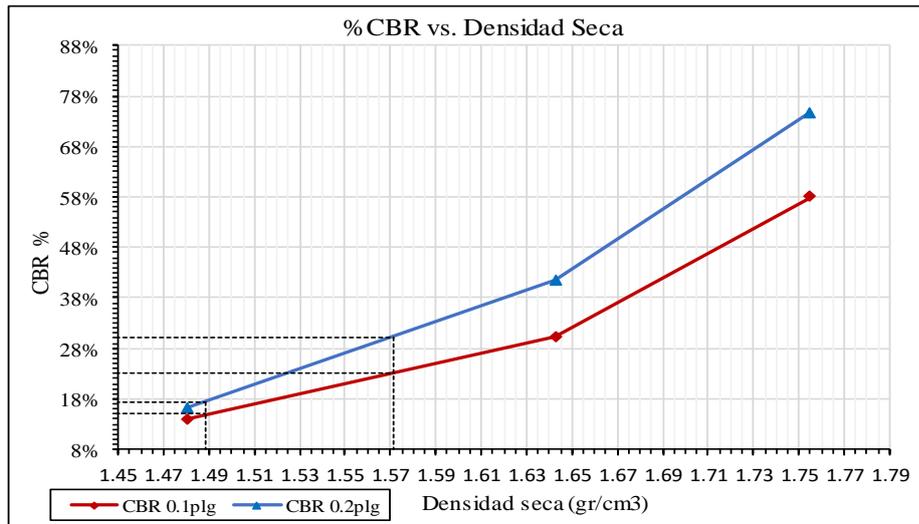
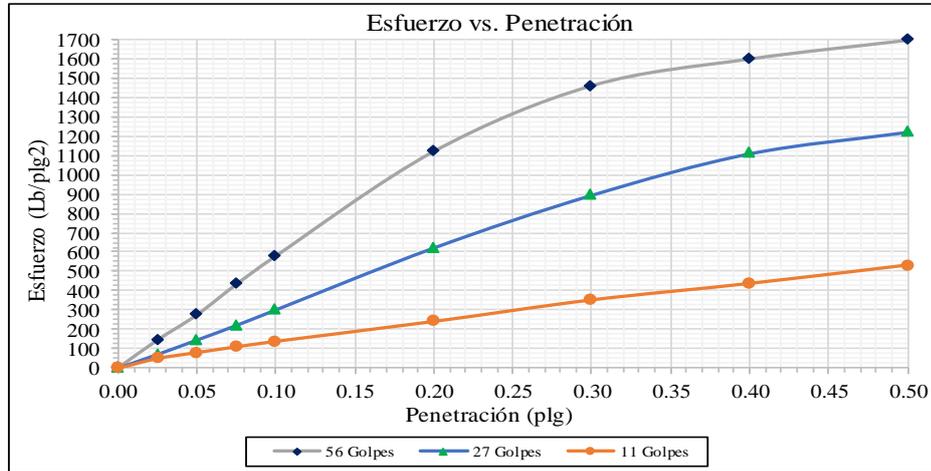
PORCENTAJES CBR (Corregidos)

N° MOLDE	Presión	CBR 0.1	Densidad	Presión	CBR 0.2 plg	Densidad
6A	580.00	58.00%	1.755	1121.00	74.73%	1.755
A2	302.00	30.20%	1.643	622.54	41.50%	1.643
M1	139.00	13.90%	1.480	241.20	16.08%	1.480



TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO
ENSAYO CBR DE LABORATORIO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	12-ago-19
Zona N°:	E9	Normativa:	ASTM: D1883-73-AASHTO:T-193-63



DENSIDAD SECA MÁXIMA	1.654 gr/cm³
----------------------	--------------

DSM	% CBR 0.1plg	% CBR 0.2plg	% CBR MAYOR
90%	1.489	15.00%	17.50%
95%	1.571	23.00%	30.20%

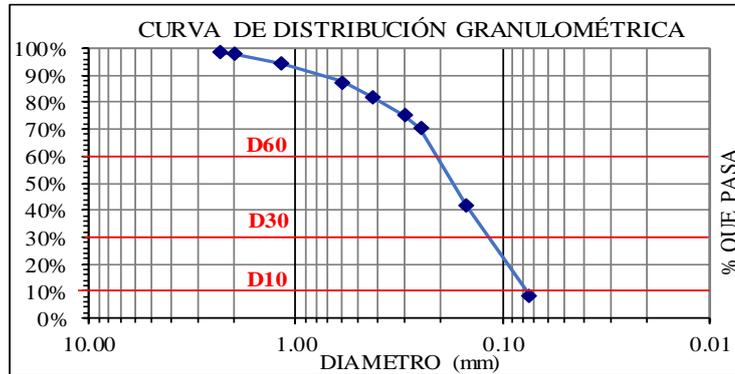
 UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 				
TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO				
ENSAYO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA				
Elaborado por:	Jimmy Macas		Fecha:	19-jun-19
Zona N°:	E10		Normativa:	IEEE STD 81-1983
COORDENADAS (UTM)		Zona	Norte (m)	Este (m)
		17M	9858007	763227
Elevación (m)		2757		
N° ensayo	1	2	3	
Resistividad ρ (Ω/m)	383.20	434.70	412.10	
Resistividad Prom. ρ (Ω/m)	410.00			
Resistencia R (Ω)	65.3			
 UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 				
TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO				
DENSIDAD DE CAMPO				
Elaborado por:	Jimmy Macas		Fecha:	19-jul-19
Zona N°:	E10		Normativa:	AASHTO T 191 2014
1. Contenido de Humedad				
N° Recipiente	87		58	
Masa suelo humedo + recipiente (gr)	91.3		97.8	
Masa suelo seco + recipiente (gr)	87.1		93.1	
Masa Recipiente (gr)	30.8		30.9	
Masa de agua W_w (gr)	4.2		4.7	
Masa suelo seco W_s (gr)	56.3		62.2	
Contenido de humedad (W%)	7.46%		7.56%	
W Promedio (%)	7.51%			
2. Determinación de la masa del Suelo Extraído				
Masa del suelo + recipiente (gr)	1993.80			
Masa del recipiente (gr)	9.00			
Masa del suelo W_m (gr)	1984.80			
3. Calibración del Cono de arena de Ottawa				
Masa inicial frasco + cono + arena (gr)	6217.40			
Masa final frasco + cono + arena (gr)	4725.40			
Masa Arena del Cono W_{sand} (gr)	1492.00			
Volumen V_{sand} (cm^3)	926.58			
$\gamma_{sand} = W_{sand}/V_{sand}$ (gr/cm ³)	1.610			
4. Determinación de volumen del hueco en el suelo				
Lectura inicial frasco + cono + arena (gr)	6217.40			
Lectura final frasco + cono + arena (gr)	2535.90			
Masa de Arena en el hueco W_{sand} (gr)	2189.50			
Volumen del suelo $V_m = W_{sand}/\gamma_{sand}$ (cm^3)	1359.74			
5. Determinación del peso volumetrico de la masa				
$\gamma_m = W_m/V_m$ (gr/cm ³)	1.460			
6. Determinación del peso volumetrico seco				
$\gamma_d = \gamma_m/(1+w)$ (gr/cm ³)	1.358			
7. Determinación de la relación de Vacios (e)				
Peso específico relativo de los sólidos S_s	2.65			
Volumen de sólidos V_s (cm^3)	21.25			
Volumen de agua V_w (cm^3)	4.20			
Volumen de la muestra V_m (cm^3)	41.45			
Volumen de vacios V_v (cm^3)	20.20			
$e = V_v/V_s$	0.95			
8. Determinación de la Porosidad (n%)				
$n\% = V_v/V_m * 100$	48.74%			
9. Determinación del grado de saturación de agua y aire (Gw%) (Ga%)				
$G_w\% = V_w/V_v * 100$	20.79%			
$G_a\% = (V_v - V_w)/V_v * 100$	79.21%			



TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO

ENSAYO DE GRANULOMETRÍA

Elaborado por	Jimmy Macas		Fecha:	22-jul-19	
Zona N°:	E10		Normativa:	ASTM D-421-58 y AASHTO T-87-70	
PESO DE LA MUESTRA:			250	gr	
# Tamiz	Tamaño de partículas (mm)	P. Retenido Parcial	P. Retenido Acumulado	% Retenido	% Que pasa
#8	2.360	2.9	2.9	1.17%	98.83%
#10	2.000	1.6	4.5	1.81%	98.19%
#16	1.180	8.8	13.3	5.36%	94.64%
#30	0.600	17.3	30.6	12.32%	87.68%
#40	0.425	14.5	45.1	18.16%	81.84%
#50	0.300	16.4	61.5	24.77%	75.23%
#60	0.250	11.9	73.4	29.56%	70.44%
#100	0.150	71.4	144.8	58.32%	41.68%
#200	0.075	82.2	227.0	91.42%	8.58%
Pasa #200		21.3	21.3	8.58%	
TOTAL		248.3	248.3		
Resultados					
TNM	1.180	Cc:	2.73	Error permitido:	1.00%
D10	0.077			Error calculado:	0.68%
D30	0.130	Cu:	1.05	BIEN HECHO	
D60	0.210				
Grava (G%)		Arena (S%)		Limo y Arcilla (finos%)	
SUCS	0	91		9	
AASHTO	1	90		9	
SUCS	SP-SM	Arena pobremente graduada con limos de baja plasticidad			
AASHTO	A-2-4(0)	Arena Limosa			



ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA PARA SUELOS FINOS

Elaborado por	Jimmy Macas	Fecha:	8-ago-19
Zona N°:	E10	Normativa:	AASHTO T 100 2015
GRAVEDAD ESPECÍFICA (Gs)			
Peso del picnómetro	165.40	gr	$G_s = \frac{W_s}{W_s + W_{pt} - W_{pws}} \times G_w \quad (2)$ <p>Donde: W_s es el peso en gramos de los sólidos W_{pws} es el peso del picnómetro + agua + suelo a temperatura Tx. G_w es la gravedad específica del agua a la temperatura Tx.</p>
Temperatura del agua	23.00	°C	
Peso Picnómetro + agua (T°C) (W _{pt})	660.46	gr	
Peso Picnómetro+agua+suelo (W _{pws})	690.60	gr	
# Recipiente	S5g		
Peso Recipiente	81.80	gr	
Peso Recipiente + suelo seco	130.30	gr	
Peso Suelo Seco (W _s)	48.50	gr	
Desplazamiento del agua (W _s +W _{pt} -W _{pws})	18.36	ml	
Factor de corrección por temperatura (K)	0.9993		
Gravedad Específica (G _s)	2.639		



TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO

ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADO "B"

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	25-jul-19
Zona N°:	E10	Normativa:	AASHTO T-180 y ASTM D-1557

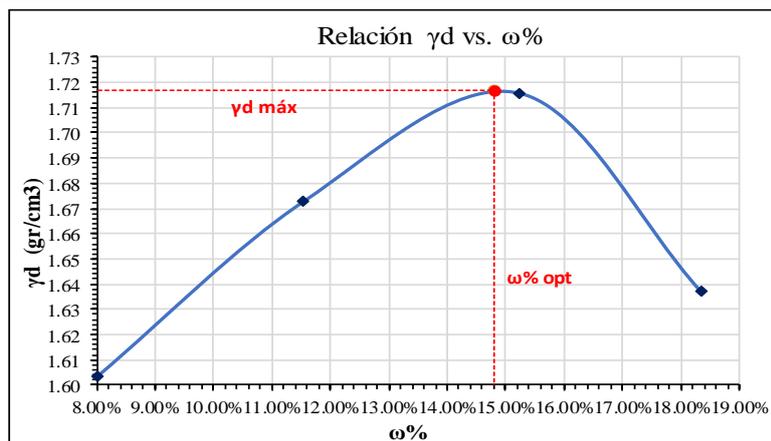
ESPECIFICACIONES DEL ENSAYO

N° de Golpes:	56	N° de capas:	5	Peso martillo:	10 lb
Altura de caída:	18' o 1.5ft	Volumen molde:	2328.79		cm ³
Peso molde:	14805	gr	Diámetro:	15.22	cm
Energía de compactación:	55986	lb/ft/ft ³	Altura:	12.8	cm
Ensayo número	1	2	3	4	
Peso inicial deseado (gr)	6000	6000	6000	6000	
Humedad inicial añadida (%)	6	9	12	15	
P. molde + suelo húmedo (gr)	18839	19150	19409	19317	
Peso suelo húmedo (gr)	4034	4345	4604	4512	
Peso unitario húmedo γ_m (gr/cm ³)	1.732	1.866	1.977	1.937	

CONTENIDO DE HUMEDAD

# Recipiente	13	14	17	18	19	20	21	22
R. + Suelo húmedo (gr)	107.9	128.3	145.1	165.7	203.4	203.4	115.7	115.2
R. + Suelo seco (gr)	103.0	120.9	134.0	154.0	182.8	182.0	104.7	104.3
Peso agua (gr)	4.9	7.4	11.1	11.7	20.6	21.4	11.0	10.9
Peso recipiente (gr)	36.0	36.0	44.5	44.4	45.1	44.0	44.6	45.0
Peso suelo seco (gr)	67.0	84.9	89.5	109.6	137.7	138.0	60.1	59.3
Contenido humedad $\omega\%$	7.3%	8.7%	12.4%	10.7%	15.0%	15.5%	18.3%	18.4%
Cont. Humedad prom. $\omega\%$	8.01%		11.54%		15.23%		18.34%	
Densidad seca γ_d (gr/cm ³)	1.604		1.673		1.716		1.637	
γ_d Máxima (gr/cm ³)	1.717							
$\omega\%$ optimo	14.80%							
Grado de compactación G_c (%)	79%							

Observaciones:





TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO

ENSAYO DE LÍMITE PLÁSTICO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	18-ago-19
Zona N°:	E10	Normativa:	AASHTO T-90-70

LÍMITE PLÁSTICO

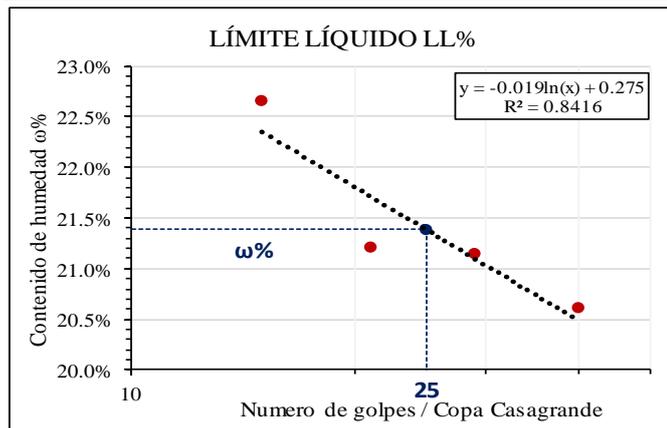
Número de muestra	1	2	3	4	5
# Recipiente	55	7A	65	18A	R2
Masa Recipiente (gr)	6.10	6.00	6.10	6.00	6.10
Masa Muestra Húmeda + Recipiente (gr)	7.20	7.10	7.30	7.20	7.20
Masa Muestra seca + Recipiente (gr)	7.10	7.00	7.20	7.00	7.00
Masa Agua (gr)	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20
Masa Muestra seca (gr)	1.00	1.00	1.10	1.00	0.90
Contenido de humedad (%)	10.0%	10.0%	9.1%	20.0%	22.2%
$\omega\%$ promedio	14.26%				
Límite Plástico %	14.26%				

ENSAYO DE LÍMITE LIQUIDO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	16-ago-19
Zona N°:	E10	Normativa:	AASHTO T-90-70 y ASTM D-424-71

LÍMITE LÍQUIDO

# Recipiente	5	78	12	21	32	59	44	54
Peso Recipiente (gr)	4.3	4.3	7.4	7.3	5.3	6.2	6.2	6.0
Peso Muestra Húmeda + Recipiente (gr)	9.5	9.4	13.7	13.0	10.6	11.2	12.1	11.8
Peso Muestra seca + Recipiente (gr)	8.6	8.4	12.6	12.0	9.6	10.4	11.1	10.8
Peso Agua (gr)	0.9	1.0	1.1	1.0	1.0	0.8	1.0	1.0
Peso de la muestra seca (gr)	4.3	4.1	5.2	4.7	4.3	4.2	4.9	4.8
Contenido de humedad ($\omega\%$)	20.9%	24.4%	21.2%	21.3%	23.3%	19.0%	20.4%	20.8%
$\omega\%$ promedio	22.66%		21.22%		21.15%		20.62%	
Número de golpes	15		21		29		40	



ÍNDICE PLÁSTICO

Límite Plástico Lp% :	14.6
Límite Líquido Ll% :	21.38
ÍNDICE PLÁSTICO Ip:	Ip= Ll - Lp
ÍNDICE PLÁSTICO Ip:	6.78

N° golpes :	25	LL = A*Ln(25)+B
A=	-0.019	LÍMITE LÍQUIDO LL%
B=	0.275	21.38%



TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO
ENSAYO CBR DE LABORATORIO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	2-sep-19
Zona N°:	E10	Normativa:	ASTM: D1883-73-AASHTO:T-193-63

DATOS DE MOLDEO

N° Molde	56		27		11A	
N° golpes por capa	56		27		11	
Muestra Húmeda + molde (gr)	13665		12608		11375	
Masa del molde (gr)	9632		8399		7389	
Masa muestra húmeda (gr)	4033		4209		3986	
Volumen de muestra (cm ³)	2068.63		2262.38		2250.25	
Peso unitario húmedo (gr/cm ³)	1.950		1.860		1.771	
CONTENIDO DE HUMEDAD	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
N° recipiente	6	8	3	4	2	5
Masa suelo húmedo + recipiente (gr)	134.8	146.2	171.7	156.4	122.8	125.4
Masa suelo seco + recipiente (gr)	122.9	132.7	153.8	141.4	111	114.3
Masa del agua (gr)	11.9	13.5	17.9	15	11.80	11.1
Masa del recipiente (gr)	43.3	40.7	34.2	40.6	32.6	40.7
Masa suelo seco (gr)	79.6	92	119.6	100.8	78.4	73.6
Contenido de humedad ω%	14.95%	14.67%	14.97%	14.88%	15.05%	15.08%
ω% Promedio	14.81%		14.92%		15.07%	
Peso unitario seco (gr/cm ³)	1.698		1.619		1.539	

DATOS DESPUÉS DE LA SATURACIÓN

Muestra húmeda + molde (gr)	13775		12795		11633	
Masa Molde (gr)	9632		8399		7389	
Masa muestra húmeda (gr)	4143		4396		4244	
Masa agua absorbida (gr)	110		187		258	
% Agua absorbida	2.73%		4.44%		6.47%	
Esponjamiento inicial	4.1		6.65		7.11	
Esponjamiento final	4.29		6.9		7.4	
Esponjamiento total	0.19		0.25		0.29	
CONTENIDO DE HUMEDAD	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
N° recipiente	89	57	59	53	74	35
Masa suelo húmedo + recipiente (gr)	93.4	95.8	98.9	118.2	113.4	105.8
Masa suelo seco + recipiente (gr)	83.5	86.4	87.2	103.7	96.4	91.9
Masa del agua (gr)	9.9	9.4	11.7	14.5	17	13.9
Masa del recipiente (gr)	31.2	30.9	30.6	30.8	31.1	24.6
Masa suelo seco (gr)	52.3	55.5	56.6	72.9	65.3	67.3
Contenido de humedad ω%	18.93%	16.94%	20.67%	19.89%	26.03%	20.65%
ω% Promedio	17.93%		20.28%		23.34%	

ENSAYO

N° MOLDE	1		2		3	
	dial (lb)	Presión (lb/plg ²)	dial (lb)	Presión (lb/plg ²)	dial (lb)	Presión (lb/plg ²)
0.000	0	0.00	0	0.00	0	0.00
0.025	500	166.67	430	143.33	264	88.00
0.050	930	310.00	820	273.33	402	134.00
0.075	1486	495.33	1198	399.33	515	171.67
0.100	2020	673.33	1535	511.67	625	208.33
0.200	3883	1294.33	2565	855.00	1030	343.33
0.300	5419	1806.33	3416	1138.67	1340	446.67
0.400	6593	2197.67	4200	1400.00	1660	553.33
0.500	7570	2523.33	4975	1658.33	2010	670.00

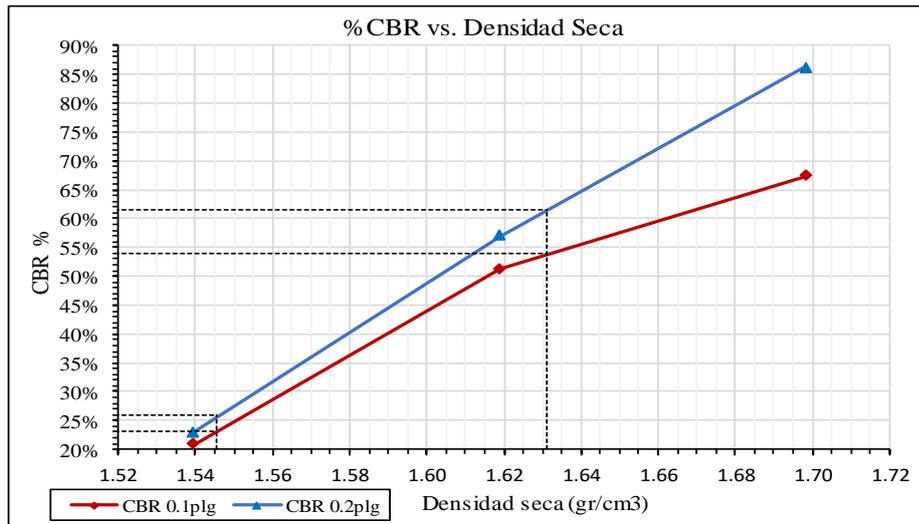
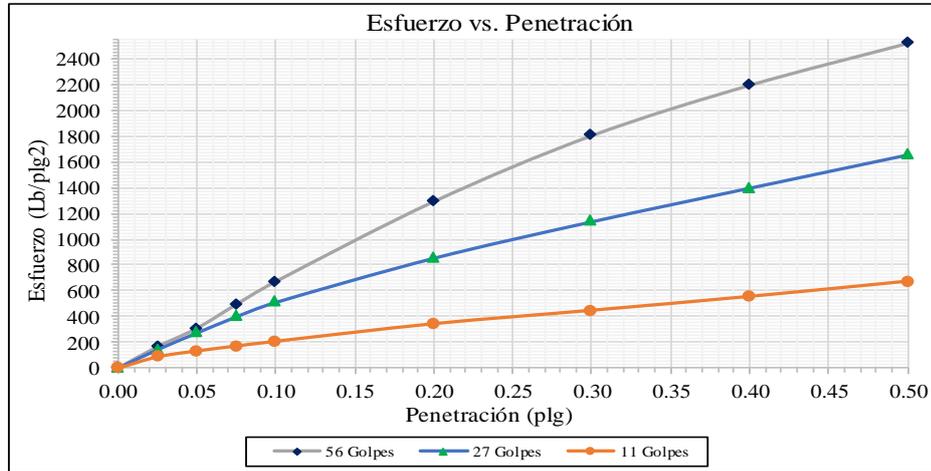
PORCENTAJES CBR (Corregidos)

N° MOLDE	Presión	CBR 0.1	Densidad	Presión	CBR 0.2 plg	Densidad
56	673.33	67.33%	1.698	1294.33	86.29%	1.698
27	511.67	51.17%	1.619	855.00	57.00%	1.619
11A	208.33	20.83%	1.539	343.33	22.89%	1.539



TESIS: ANÁLISIS DE LAS CORRELACIONES ENTRE PROPIEDADES ÍNDICE Y MECÁNICAS CON LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS GRANULARES EN LA ZONA 1 DE LA CIUDAD DE AMBATO
ENSAYO CBR DE LABORATORIO

Elaborado por:	Jimmy Macas	Fecha:	2-sep-19
Zona N°:	E10	Normativa:	ASTM: D1883-73-AASHTO:T-193-63



DENSIDAD SECA MÁXIMA	1.717 gr/cm³
----------------------	--------------

DSM	% CBR 0.1plg	% CBR 0.2plg	% CBR MAYOR
90%	1.545	23.00%	25.80%
95%	1.631	54.00%	61.50%