

CORRELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE COMPRESIÓN c_c CON ALGUNAS
PROPIEDADES ÍNDICES DE UN SUELO ARCILLOSO DE LA CIUDAD DE
SANTIAGO DE CALI

SEBASTIÁN RENGIFO PÉREZ

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
SANTIAGO DE CALI

2017

CORRELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE COMPRESIÓN c_c CON ALGUNAS
PROPIEDADES ÍNDICES DE UN SUELO ARCILLOSO DE LA CIUDAD DE
SANTIAGO DE CALI

SEBASTIÁN RENGIFO PÉREZ

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DIRECTOR:

MANOLO GALVÁN CEBALLOS Ph.D.

CODIRECTOR:

FERNANDO ASDRÚBAL LOZANO GUEVARA M.Sc.

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA

SANTIAGO DE CALI

2017

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Santiago de Cali, 15 de Septiembre del 2017

DEDICATORIA

Principalmente a Dios por permitirnos lograr cada paso en nuestras vidas y a aquellos que ya no se encuentran físicamente con nosotros por guiarme.

A las todas las personas que de alguna manera estuvieron apoyándome durante esta etapa de mi vida, a mis familiares, profesores, amigos y especialmente a mis padres que siempre estuvieron regalándome conocimiento y brindándome apoyo.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis más sinceros agradecimientos a todas las personas que con su apoyo hicieron posible la culminación de este trabajo de investigación. Especialmente a:

A Manolo Galván Ceballos, Ph.D. Ingeniero civil. Profesor de la Universidad del Valle. Por su colaboración y tiempo dedicado al proyecto.

A Fernando Asdrúbal Lozano Guevara, M.sC. Ingeniero civil. Profesor de la Universidad del Valle. Por su tiempo y dedicación.

A Carlos Alberto Manrique Londoño. Ingeniero mecánico. Profesor del laboratorio de suelos y pavimentos de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática. Por su apoyo, tiempo, colaboración y amistad.

A Noé Durán Londoño. Auxiliar técnico del laboratorio de suelos y pavimentos de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática. Por su colaboración constante, apoyo y amistad.

A mis padres. Por la colaboración y el tiempo dedicado a la asesoría en la redacción y forma del proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. PROBLEMA	3
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	3
1.2 FORMULACIÓN	4
1.3 OBJETIVOS	5
1.3.1 Objetivo general	5
1.3.2 Objetivos específicos	5
1.4 JUSTIFICACIÓN	6
2. MARCO TEÓRICO	8
2.1 LAS ARCILLAS: PROPIEDADES Y USOS	8
2.1.1 Composición química de las arcillas	9
2.1.2 Comportamiento físico-químico de las arcillas	11
2.1.3 Comportamiento de las arcillas en presencia de agua	12
2.1.4 Uso y dificultades de las arcillas en la construcción	12
2.2 CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL	14
2.2.1 Teoría de la consolidación	14
2.2.2 Compresibilidad	15
2.2.3 Ensayo de consolidación unidimensional	16
2.2.4 Curva de consolidación	17
2.2.5 Curva de compresibilidad	19
2.2.6 Presión de preconsolidación (σ'_p)	21
2.2.7 Índice de compresión	21
2.2.8 Índice de hinchamiento	21
2.2.9 Corrección de la curva de compresibilidad	22
2.3 PROPIEDADES ÍNDICES DEL SUELO	22
2.3.1 Relación de vacíos	23
2.3.2 Grado de saturación	23

2.3.3	Humedad Natural	23
2.3.4	Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad	24
2.4	MÉTODO DE REGRESIÓN LINEAL.....	27
2.4.1	Método de regresión lineal simple	27
2.4.2	Método de regresión lineal de múltiples variables	28
2.5	MÉTODO DE REGRESIÓN NO LINEAL	29
2.5.1	Método de la regresión no lineal simple	29
2.6	ANTECEDENTES.....	32
2.6.1	Correlaciones lineales simples para el índice de compresión	32
2.6.1.1	Correlaciones lineales simples para el Índice de Compresión en función de Relación de Vacíos Inicial (e_o)	36
2.6.1.2	Correlaciones lineales simples para el Índice de Compresión (C_c) en función de la Humedad Natural (w_o)	37
2.6.1.3	Correlaciones lineales simples para el Índice de Compresión en función del Límite Líquido	37
2.6.2	Correlaciones lineales de múltiples variables para el índice de compresión	38
2.6.3	Correlaciones para el Índice de Compresión formuladas en Colombia 40	
3.	METODOLOGÍA	43
3.1	EXPLORACIÓN Y TOMA DE MUESTRAS.....	43
3.2	METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS	45
3.2.1	Determinación de la humedad.....	45
3.2.2	Determinación de la gravedad específica – Método del Picnómetro ..	45
3.2.3	Curva granulométrica mediante USCS	46
3.2.5	Presión de expansión en consolidómetro	49
3.2.6	Consolidación unidimensional del suelo	50
4.	EXPLORACIÓN Y ENSAYOS DE LABORATORIO	52
4.1	RECOLECCIÓN E IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS.....	52
4.2	PROPIEDADES ÍNDICES Y CLASIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS	53
4.2.1	Humedad Natural (w_o)	53
4.2.2	Gravedad específica	54

4.2.3	Relación de Vacíos Inicial (eo), peso unitario total y grado de saturación	55
4.2.4	Granulometría por hidrómetro	56
4.2.5	Límite Líquido, Límite Plástico y Carta de Plasticidad	57
4.3	ENSAYOS DE CONSOLIDACIÓN Y EXPANSIÓN	60
4.3.1	Ensayo de expansión en consolidómetro	60
4.3.2	Ensayo de consolidación unidimensional	61
4.3.2.1	Índice de hinchamiento (C_s) y esfuerzo de preconsolidación (σ'_p) 63	
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	65
5.1	IDENTIFICACIÓN DE DATOS ATÍPICOS	65
5.2	ECUACIONES DE CORRELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE COMPRESIÓN (CC) Y LA HUMEDAD NATURAL (w_0)	66
5.2.1	Regresión lineal entre el Índice de Compresión y la Humedad Natural 66	
5.2.2	Regresión de mejor ajuste entre el Índice de Compresión y la Humedad Natural	67
5.3	ECUACIONES DE CORRELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE COMPRESIÓN (CC) Y LA RELACIÓN DE VACÍOS INICIAL (eo)	68
5.3.1	Regresión lineal entre el Índice de Compresión y la Relación de Vacíos Inicial	68
5.3.2	Regresión de mejor ajuste entre el Índice de Compresión y la Relación de Vacíos Inicial.	69
5.4	ECUACIONES DE CORRELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE COMPRESIÓN (CC) Y EL LÍMITE LÍQUIDO (LL)	70
5.4.1	Regresión lineal entre el Índice de Compresión y el Límite Líquido ...	70
5.5	ECUACIONES DE CORRELACIÓN PARA EL ÍNDICE DE COMPRESIÓN (C_c) EN FUNCIÓN DE DOS VARIABLES INDEPENDIENTES	72
5.5.1	Correlación entre el Índice de Compresión (C_c) en función de la Relación de Vacíos Inicial (eo) y la Humedad Natural (w_0)	72
5.5.2	Correlación entre el Índice de Compresión (C_c) en función de la Relación de Vacíos Inicial (eo) y el Límite Líquido (LL)	72
5.6	RESUMEN DE LAS ECUACIONES DE CORRELACIÓN PARA REPRESENTAR EL ÍNDICE DE COMPRESIÓN (C_c) EN CAMPO	73

5.7	COMPARACIÓN DE ECUACIONES LAS FORMULADAS EN LA INVESTIGACIÓN, FRENTE A ALGUNAS DE LAS COMÚNMENTE UTILIZADAS PARA DETERMINAR EL ÍNDICE DE COMPRESIÓN.....	74
5.7.1	Comparación de las ecuaciones formuladas a partir de la Humedad Natural (w_o)	75
5.7.2	Comparación de las ecuaciones formuladas a partir de la Relación de Vacíos Inicial (e_o).....	78
5.7.3	Comparación de las ecuaciones formuladas a partir del Límite Líquido (LL) 81	
5.7.4	Comparación de resultados con datos de arcillas de la Ciudad de Cali 83	
5.8	Resumen de resultados	88
	CONCLUSIONES	89
	RECOMENDACIONES	91

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Configuración estructural de: (a) Tetraedro de sílice; (b) lámina de sílice; (c) octaedro de aluminio; (d) lamina octaédrica (gibbsita).	10
Ilustración 2. Estructura (e) lamina elemental de sílice-gibbsita.	11
Ilustración 3. Daño producido por efecto de expansión de las arcillas, se nota levantamiento de losa. Morelos, México.	14
Ilustración 4. Curva de consolidación típica.	18
Ilustración 5. Curva edométrica de laboratorio y de campo de una muestra de suelo sobreconsolidada.	20
Ilustración 6. Esquema de 3 fases del suelo.	23
Ilustración 7. Cazuela de bronce con muestra de suelo antes de la prueba.	25
Ilustración 8. Cazuela de bronce con muestra de suelo después de la prueba.	25
Ilustración 9. Dispositivo de Casa grande.	26
Ilustración 10. Ilustración del gráfico de dispersión vs función de regresión muestral.	30
Ilustración 11. Gráfico de dispersión y regresión lineal del índice de compresibilidad C_c y la Relación de Vacíos Inicial e_0	35
Ilustración 12. Gráfico de dispersión y regresión lineal del índice de compresibilidad C_c y la Humedad Natural w_0	35
Ilustración 13. Gráfico de dispersión y regresión lineal del índice de compresibilidad C_c y el Límite Líquido LL	36
Ilustración 14. Gráfico de dispersión entre la Relación de Vacíos Inicial e_0 y el Límite Líquido LL de la muestra.	39
Ilustración 15. Gráfico de dispersión entre C_c (Lab) y $C_c f(e_0, LL)$	39
Ilustración 16. Ubicación geográfica de la zona de extracción de las muestras. ...	44
Ilustración 17. Muestras inalteradas con prevención de pérdida de humedad.	44
Ilustración 18. Picnómetro durante ensayo para determinar la gravedad específica en la fase de extracción de aire de la muestra en la bomba de vacío.	46
Ilustración 19. Muestra de suelo pasada por el tamiz No.40 (Izq). Muestra de suelo después del ensayo para Límite Líquido (Der).	48
Ilustración 20. Muestra del suelo después del ensayo de Límite Plástico.	48
Ilustración 21. Carta de Plasticidad de Casa Grande.	49
Ilustración 22. Consolidómetros durante pruebas de expansión (Izq) y consolidación (Der).	51
Ilustración 23. Anillo con muestra después de prueba de consolidación unidimensional.	51
Ilustración 24. Gráfico de granulometría por hidrómetro SHELBY #1 MUESTRA 1.	57

Ilustración 25. Carta de Plasticidad de Casa Grande y ubicación de las muestras.	59
Ilustración 26. Curvas de compresibilidad corregida para las muestras de laboratorio	62
Ilustración 27. Gráfico de caja y bigotes para el Índice de Compresión (CC).....	65
Ilustración 28. Gráfico de regresión lineal entre C_c y w_o	66
Ilustración 29. Gráfico de regresión de mejor ajuste entre C_c y w_o	67
Ilustración 30. Gráfico de regresión lineal entre C_c y e_o	68
Ilustración 31. Gráfico de regresión de mejor ajuste entre C_c y e_o	69
Ilustración 32. Gráfico de regresión lineal entre C_c y LL	70
Ilustración 33. Gráfico de regresión lineal para las muestras propias entre C_c y LL	71
Ilustración 34. Gráfico de comparación de ecuaciones de correlación vs datos de laboratorio para el Índice de Compresión obtenido a partir de ecuaciones en función de la Humedad Natural de la muestra.	75
Ilustración 35. Gráfico de comparación de ecuaciones de correlación vs datos de laboratorio para el índice de compresión, obtenido a partir de ecuaciones en función de la relación de vacíos de la muestra.	78
Ilustración 36. Gráfico de comparación de ecuaciones de correlación vs datos de laboratorio para el índice de compresión, obtenido a partir de ecuaciones en función del Límite Líquido de la muestra.....	81

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Selección del tipo de cimentación a partir de la compresibilidad del suelo.	6
Tabla 2. Compresibilidad del suelo arcilloso según valores del índice de compresión.	15
Tabla 3. Ecuaciones lineales de correlación para el Índice de Compresión comúnmente encontradas en la mecánica de suelos.	33
Tabla 4. Principales ecuaciones de correlación lineal simple desarrolladas entre el Índice de Compresión (C_c) y la Relación de Vacíos Inicial (e_0).	36
Tabla 5. Principales ecuaciones de correlación lineal simple desarrolladas entre el Índice de Compresión (C_c) y la Humedad Natural (w_0).	37
Tabla 6. Principales ecuaciones de correlación lineal simple desarrolladas entre el Índice de Compresión (C_c) y el Límite Líquido (LL).	38
Tabla 7. Principales ecuaciones de correlación simple formuladas en el territorio nacional.	40
Tabla 8. Identificación de las muestras recolectadas.	52
Tabla 9. Resumen de ensayos de laboratorio realizados a las muestras.	53
Tabla 10. Contenido de Humedad Natural de las muestras de laboratorio (w_0). ..	54
Tabla 11. Valores de gravedad específica de las muestras de laboratorio.	54
Tabla 12. Valores de Relación de Vacíos Inicial (e_0), peso unitario total y grado de saturación de las muestras de suelo.	56
Tabla 13. Valores del Límite Líquido (LL), Límite Plástico (LP) e Índice de Plasticidad (IP) de las muestras de laboratorio.	57
Tabla 14. Clasificación de las muestras según el sistema SUCS.	59
Tabla 15. Presión sin cambio de expansión para ensayo de expansión en laboratorio de las muestras.	61
Tabla 16. Valores de índice de índice de expansión (C_s), esfuerzo de preconsolidación e índice de sobreconsolidación de las muestras de laboratorio.	63
Tabla 17. Valores del Índice de Compresión (C_c) para las muestras de laboratorio.	64
Tabla 18. Resumen de ecuaciones de correlación formuladas producto de la investigación.	73
Tabla 19. Valores del Índice de Compresión para las ecuaciones más representativas en función de la Humedad Natural (w_0).	76
Tabla 20. Porcentaje de variación del Índice de Compresión obtenido con las ecuaciones de correlación en función de la Humedad Natural (w_0) con respecto al valor obtenido en el laboratorio.	77

Tabla 21. Valores del Índice de Compresión para las ecuaciones más representativas en función de la Humedad Natural (e_0).	79
Tabla 22. Porcentaje de variación del Índice de Compresión obtenido con las ecuaciones de correlación en función de la Relación de Vacíos Inicial (e_0) con respecto al valor obtenido en el laboratorio.....	80
Tabla 23. Valores del Índice de Compresión para las ecuaciones más representativas en función del Límite Líquido.	82
Tabla 24. Porcentaje de variación del Índice de Compresión obtenido con las ecuaciones de correlación en función del Límite Líquido (LL) con respecto al valor obtenido en el laboratorio.	83
Tabla 25. Materiales típicos arcillosos de la ciudad de Cali.	84
Tabla 26. Propiedades promedio de los materiales arcillosos típicos de la ciudad de Cali.	84
Tabla 27. Porcentaje de variación entre el Índice de Compresión (C_c) con las ecuaciones más representativas en función de la Humedad Natural (w_0) y el valor hallado en laboratorio de las arcillas típicas de la ciudad de Cali.	85
Tabla 28. Porcentaje de variación entre el Índice de Compresión (C_c) con las ecuaciones más representativas en función de Relación de Vacíos Inicial (e_0) y el valor hallado en laboratorio de las arcillas típicas de la ciudad de Cali.	86
Tabla 29. Porcentaje de variación entre el Índice de Compresión (C_c) con las ecuaciones más representativas en función del Límite Líquido (LL) y el valor hallado en laboratorio de las arcillas típicas de la ciudad de Cali.	87

LISTA DE ANEXOS

Los anexos se encuentran en formato digital (CD-ROM) y contiene los siguientes archivos.

ANEXO A. REGISTRO FOTOGRÁFICO

ANEXO B. PRUEBAS DE CONSOLIDACIÓN

ANEXO C. ENSAYOS PROPIEDADES ÍNDICES DEL SUELO

ANEXO D. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

RESUMEN

En el presente trabajo se presentan algunos acercamientos en términos generales a métodos estandarizados y alternativos a las pruebas de laboratorio para la predicción del Índice de Compresión de suelos arcillosos, particularmente a los estudios realizados por: Alec Skempton, Terzaghi, Slamed Widodo y Abdelazim Ibrahim, así como de las investigaciones sobre consolidación primaria realizadas en Colombia por: Julio Moya, Tarazona Castro y Augusto Espinosa. Se plantea la importancia de generar a partir de estos antecedentes teóricos, fórmulas de correlación que se conviertan en una herramienta alternativa a la hora de hacer dichos análisis en terrenos arcillosos del país, propuesta que debe ser garante de precisión a la hora de inferir sobre los valores del Índice de Compresión para el contexto mencionado.

El proyecto formulado, consiste en términos generales en la determinación del Índice de Consolidación Primaria llamado Índice de Compresión de un suelo arcilloso de la ciudad de Cali y su correlación estadística con la Humedad, Relación de Vacíos y Límite Líquido, propiedades índices del suelo. La investigación trata de generar una formulación alternativa para la predicción del Índice de Compresión en suelos de la zona. Se propone la realización de las correlaciones por métodos de regresión lineal simple y regresión de múltiples variables aplicando métodos estadísticos para inferir sobre su confiabilidad (coeficiente de regresión y análisis ANOVA) y finalmente ser comparados con los investigadores que han propuesto sus propias correlaciones, algunas muy usadas en la literatura, pero que han sido formuladas para otros tipos de suelos con un comportamiento y una geología diferente. Por su objetivo de estudio, el presente proyecto se enmarca dentro de la Mecánica de Suelos.

El presente documento es una herramienta que puede servir a futuro para el desarrollo de proyectos de investigación que ayuden a ampliar el estado del arte de la Mecánica de Suelos en la región, cuenta con la identificación del problema al que se le pretende dar solución, la determinación del marco de referencia, una guía metodológica para el desarrollo del proyecto, análisis de resultados y conclusiones.

Palabras Claves: Índice de Compresión, Mecánica de Suelos, asentamientos, regresión, consolidación primaria, correlación.

INTRODUCCIÓN

El Índice de Compresión es una importante propiedad del suelo, esencial para el diseño de cimentaciones y estudios geotécnicos. Durante las últimas décadas, se han propuesto una serie de ecuaciones de correlación para relacionar la compresibilidad del suelo con otras propiedades. Índices de éste, tales como el Límite Líquido, Índice de Plasticidad, Humedad Natural, Relación de Vacíos Natural, Gravedad Específica, entre otros. Los suelos de nuestra región han sido tratados con parámetros deducidos para otros tipos de suelos con un comportamiento y una geología diferente (Moya, 1987), la exactitud y por lo tanto la fiabilidad de estas correlaciones son siempre un interrogante en nuestros suelos debido a la falta de información, y el uso de regresiones más o menos complejas pueden intervenir en la exactitud de la correlación para predecir el índice de compresión. Por otra parte, la selección entre los modelos de regresión simples o complejos es una tarea difícil y, se debe justificar la decisión con criterios que dependen del contexto del terreno. Un modelo más complejo de regresión, ofrece "mejor ajuste" a los datos, pero no necesariamente ofrece un grado aceptable de robustez al ruido de medición y el error de modelado.

Desarrollar proyectos de infraestructura requiere controlar muchos aspectos que de una u otra forma garanticen el éxito de la obra y uno de estos es el suelo, pues es en este donde se habrá de levantar el proyecto; por tanto el trabajo del ingeniero debe concentrarse inicialmente en determinar cuáles son las condiciones y características del suelo donde cimentará la obra civil, para que de esta manera tomar decisiones adecuadas al momento de realizar el diseño de la cimentación, para esto; cuando se trate de suelos cohesivos se debe hacer un proceso de análisis de la consolidación primaria del suelo, acudiendo a los métodos existentes para tal fin. De aquí, se desprende entonces la importancia que tiene el presente trabajo, en el cual se hace un análisis de algunos estudios sobre la teoría de la consolidación, hechos por investigadores foráneos en contextos diferentes al de la región, para luego hacer una propuesta que responda a la necesidad de obtener las propiedades de consolidación primaria sobre el suelo consolidable del proyecto, pero ajustada al contexto de los suelos Colombianos, particularmente de la ciudad de Cali en el Valle del Cauca, aportando al estado del arte de la mecánica de suelos en la ciudad donde se estime la exactitud de su aplicación, analizando diferentes variables estadísticas y comparativas, que den seguridad y rentabilidad al momento de ser aplicados los resultados de la investigación.

Dicho todo esto, la propuesta se trata entonces de una formulación alternativa que se convierta en una herramienta rápida a la hora de tomar decisiones para inferir que cimentación usar en una determinada construcción dependiendo de la compresibilidad del suelo.

Cabe destacar que estas correlaciones descritas en las conclusiones de este trabajo de grado, son aplicables solamente a suelos con similares comportamiento y siempre es conveniente realizar comprobaciones.

1. PROBLEMA

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La compresibilidad de los suelos cohesivos es uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta en la geotecnia y en especial en el diseño de cimentaciones, siendo a veces un factor de diseño más limitante que la capacidad portante. Los procedimientos y métodos aplicados actualmente en la región se basan en los ensayos de consolidación pero desafortunadamente este tipo de ensayos se realizan cada vez menos, debido a que generan gran inversión de tiempo, ya que un ensayo de consolidación con expansión en el consolidómetro puede durar hasta un mes dependiendo del número de escalones de carga y descarga. También de dinero por el despliegue de logística, equipos, procesos de laboratorio y dificultad de muestreo. De allí la importancia de buscar métodos que sean efectivos y fiables para estimar propiedades del suelo que además permita reducir tiempos en el estudio de los asentamientos por consolidación primaria de los terrenos donde se proyectan las obras civiles.

Los suelos de nuestra región comúnmente han sido tratados con parámetros deducidos para otros tipos de suelos con un comportamiento y geología diferente, debido a que la mayoría de investigadores en los cuales se basan los fundamentos de la mecánica de suelos han sido foráneos (Moya, 1987). En este orden de ideas, cabe precisar que la poca existencia de correlaciones validadas con suelos de la región pone en tela de juicio la aplicabilidad de los resultados obtenidos por investigadores como: Skempton (1944), Nishida (1956), Terzaghi & Peck (1967) y Azzous (1976), dentro de la Mecánica de Suelos clásica, particularmente cuando se trata de su aplicación en nuestro contexto. Atendiendo a esto y que no es completa la información sobre investigaciones en suelos arcillosos de la ciudad de Cali en estudios para inferir los valores del Índice de Compresión con base en propiedades índices del suelo, se genera la necesidad de la investigación ya que permite conocer la relación que tiene el Índice de Compresión con las propiedades índices anteriormente mencionadas tratándose particularmente de terrenos de la ciudad sobre los que se levantarán obras civiles, también con el fin de ampliar la información sobre las características de compresibilidad en suelos arcillosos de las zonas norte de la ciudad.

Finalmente el poder contar con un método rápido y más preciso que los existentes actualmente para estimar el Índice de Compresión, será una gran opción que permitirá a los ingenieros inferir en las decisiones en cuanto al tipo de cimentación más adecuada a utilizar basándose en el Índice de Compresibilidad de suelos donde el diseño sea controlado por la magnitud de los asentamientos, sin necesidad de transportar grandes muestras del terreno para ser sometidas a ensayos de consolidación en el laboratorio lo que permitirá una reducción tiempo y logística en las fases preliminares del proyecto.

1.2 FORMULACIÓN

¿Cuál es la relación que hay entre el Índice de Compresión de un suelo arcilloso de la ciudad de Cali y sus propiedades físicas de Relación de Vacíos Inicial, Humedad Natural y Límite Líquido?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Identificar el valor del Índice de Compresión en un suelo arcilloso de la Ciudad de Cali, en el Valle del Cauca (Colombia) y su correlación con la Relación de Vacíos Inicial, Humedad Natural y Límite Líquido de la muestra.

1.3.2 Objetivos específicos

- Revisar la literatura y realizar un estado del arte sobre correlaciones entre el Índice de Compresión y propiedades Índice.
- Identificar con cuál de las tres propiedades físicas del suelo, Relación de Vacíos Inicial, de Humedad Natural y Límite Líquido, hay una más estrecha correlación con el Índice de Compresión.
- Definir una serie de ecuaciones de correlación entre el Índice de Compresión y las propiedades ya mencionadas y, además, identificar cuál de ellas tiene mayor precisión con respecto a las pruebas de laboratorio.
- Comparar las ecuaciones de correlación encontradas para el suelo de la ciudad de Cali con las ecuaciones de correlación de autores anteriores de gran uso en la literatura de la Mecánica de Suelos.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Una investigación de esta naturaleza, reviste importancia teniendo en cuenta que permitirá la estructuración y puesta en escena de algunas propuestas en torno al análisis de la consolidación primaria de los suelos arcillosos, en los cuales se han de cimentar obras civiles, con lo que se haría un aporte a las teorías existentes en este campo de investigación y particularmente en lo que tiene que ver con el estado del arte de la Mecánica de Suelos de la región, donde la investigación de métodos alternativos se encuentra en desarrollo. De igual manera el presente trabajo servirá de insumo para que otros investigadores en este campo, hagan sus aportes y se pueda ir sistematizando y consolidando una información que a corto o mediano plazo se convierta en una herramienta de valiosa aplicación en el desarrollo de proyectos de obras civiles en nuestra región y en el país, pues se está partiendo del análisis de la realidad actual, enfocando el trabajo hacia el hallazgo de fórmulas que permitan la mejora u optimización de recursos en las fases preliminares en obras de infraestructura. Es de anotar que la necesidad de hacer más eficientes todas las fases en la construcción y particularmente la que tiene que ver con la administración de recursos económicos, justifica la búsqueda e investigación de métodos que satisfagan dicha necesidad, sin que ello implique incertidumbre a la hora de tomar las decisiones con respecto a la magnitud de los asentamientos que se tendrán en el terreno.

Uno de los estudios básicos en un proyecto de construcción es el Índice de Compresión C_c , este es uno de los parámetros de la consolidación primaria más importante ya que permite conocer la magnitud de los asentamientos sobre el terreno de estudio y además aporta información valiosa para inferir sobre la selección del tipo de cimentación para la futura estructura, según la compresibilidad del suelo, como se puede observar a continuación:

Tabla 1. Selección del tipo de cimentación a partir de la compresibilidad del suelo.

[Carlos Crespo Villalas. Mecánica de suelos y cimentaciones. 2004. p.270]

Valor del Índice de Compresión C_c	Tipo de cimentación
$C_c < 0.2$	Zapatas asiladas
$0.2 < C_c < 0.4$	Zapatas continuas con vigas de cimentación
$C_c > 0.4$	Cimentaciones compensadas

Además cabe resaltar la importancia del aporte realizado al estado del arte en la mecánica de suelos de la ciudad, debido a que la investigación aportará valores a las propiedades índices mencionadas anteriormente para suelos de carácter arcilloso de la ciudad y la variabilidad del índice de compresibilidad en función de algunas de estas propiedades índices, justificando así parte de la investigación en el aporte teórico a las propiedades de consolidación primaria en suelos de la ciudad con características similares, para los cuales su comportamiento al ser sometido a pruebas de expansión y consolidación no ha sido plenamente estudiado. Son pocas las correlaciones existentes para el Índice de Compresión formuladas con los suelos de nuestro país y en mucho menor número las investigaciones realizadas para suelos de la ciudad, el hallazgo de una serie de ecuaciones las cuales relacionen el Índice de Compresión con algunas propiedades índices del suelo, significaría una disminución considerable de tiempo en la fases previas a la construcción de un proyecto en la ciudad.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 LAS ARCILLAS: PROPIEDADES Y USOS

Las arcillas son minerales de rocas sedimentarias de origen detrítico pertenecientes en su mayoría a los filosilicatos resultantes de la meteorización de los silicatos, comúnmente se tiende a definir las arcillas por varios factores entre ellos el tamaño de sus partículas las cuales se definen entre 0.2 y 2 μ (micrómetros) (ISO 14688, 2003), y la clasificación que se le asigne en la Carta de Plasticidad de Casagrande según las propiedades de consistencia (Límite Líquido y plástico).

Debido a su tamaño de partículas $< 2\mu$, sus propiedades de morfología laminar y propiedades físico-químicas tienen características como:

Capacidad sorcitiva (Capacidad de adsorción y absorción)

Puede producirse fenómeno de adsorción o absorción, la absorción resulta cuando las moléculas polares se introducen y acomodan en el espacio interlaminar y la adsorción cuando los iones se unen a la superficie del filosilicato (G, Huertos, 1990).

Gran capacidad de absorción

Debido al espacio laminar que posee su estructura las arcillas son capaces de absorber más del 100% respecto a su peso seco (D, Montoya, 1990), también son capaces de realizar la absorción en los canales estructurales dependiendo de la composición del material, aunque no se presenta gran variación entre las dos.

Alta capacidad de hidratación e hinchamiento

La entrada del agua en el espacio laminar produce separación en las láminas generando así el hinchamiento de las arcillas y la hidratación de estas, esto depende del balance entre la atracción electrostática (catión/lamina) y la energía de hidratación del catión. (D, Montoya, 1990). La permisibilidad de entrada de agua a los espacios laminares y la capacidad de separación de las láminas convierte a las arcillas, en suelos muy susceptibles a cambios volumétricos en presencia de agua.

Valores altos de gravedad específica (G_s)

Las arcillas tienen como característica, un peso específico de las partículas sólidas alto en relación a otros suelos por su pequeño tamaño de partículas. Mientras que para suelos granulares el peso específico de las partículas sólidas se encuentra

alrededor de 2.65 para suelos arcillosos mientras que para los suelos limosos varia alrededor de 2.6 y 2.9. (Das, Braja. 2001).

Alta plasticidad

La alta plasticidad es debida a que el agua forma una película sobre las partículas laminares y a modo de lubricante, permite el desplazamiento de las partículas unas sobre otras cuando se ven sometidas a un esfuerzo, (se ejerce presión mecánica sobre ellas) (Dewis, J., y Freitas, F. 1970).

2.1.1 Composición química de las arcillas

Químicamente los minerales arcillosos, están constituidos por láminas de tetraedros de silicio SiO_4 y de octaedros de aluminio AlO_6 . La combinación de estas láminas forma los diferentes tipos de estructuras arcillosas que a su vez, dan origen a paquetes de capas y que al combinarse conforman una placa de mineral arcilloso visible. (García Romero, E y Suárez Barrios, M. 2002).

Las arcillas en su estructura pueden tener una conformación bilaminar (-T: O-) donde su estructura básica está conformada por una capa tetraédrica y una capa octaédrica, presentan esta estructura las caolinitas y trilaminar (-T: O: T-) donde la estructura básica se encuentra formada por dos capas tetraédricas y una octaédrica, en esta composición se encuentran las ilitas y esmecitas. La combinación de tetraedros de sílice genera una lámina de sílice y la combinación de tetraedros de las unidades octaédricas de hidróxidos de aluminio, forma una lámina octaédrica también llamada lámina de gibbsita (Das, Braja. 2001).

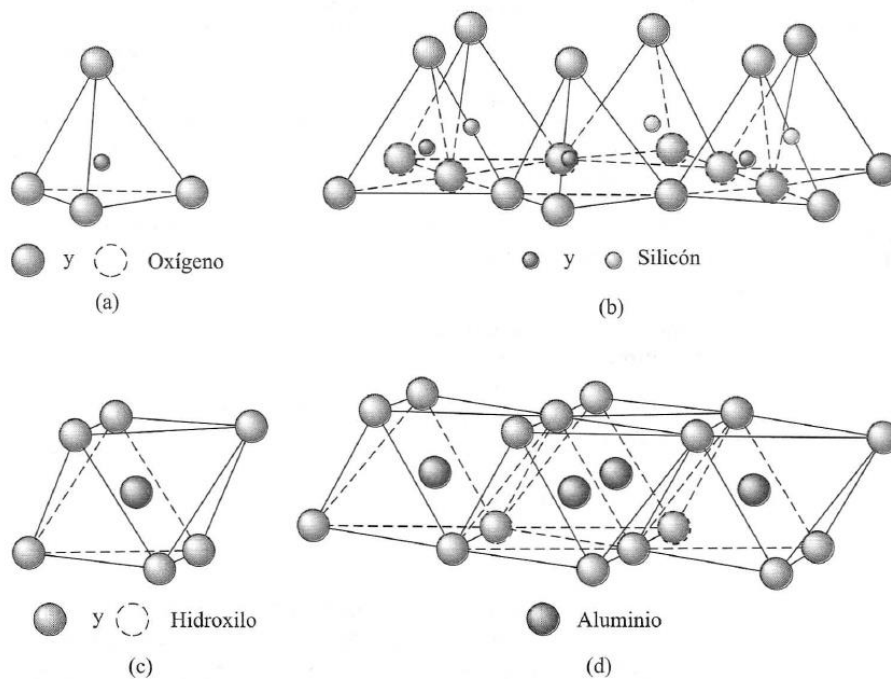


Ilustración 1. Configuración estructural de: (a) Tetraedro de sílice; (b) lámina de sílice; (c) octaedro de aluminio; (d) lamina octaédrica (gibbsita).

Fuente: (Das, Braja. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. México, D.F.: Thomson Learning, 2001. p. 4.)

En una lámina de sílice cada átomo de silicio con valencia positiva de cuatro, está unido a cuatro átomos de oxígeno con una valencia negativa total de ocho. Pero cada átomo de oxígeno localizado en la base de los tetraedros es compartido con el tetraedro adyacente, por lo cual cada oxígeno basal está unido a dos iones de silicio, quedando el átomo superior de oxígeno de cada tetraedro con una carga de valencia negativa. Cuando la lámina de sílice se superpone a la lámina aluminica, estos átomos de oxígeno reemplazan a los hidroxilos para balancear su carga negativa. (Das, Braja. 2001. p5).

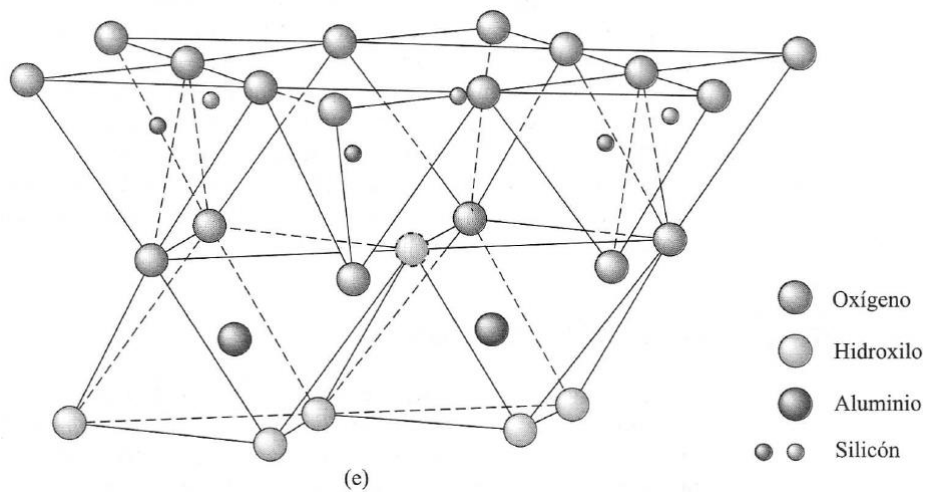


Ilustración 2. Estructura (e) lamina elemental de sílice-gibbsita.

Fuente: (Das, Braja. Fundamentos de ingeniería geotécnica. México, D.F.: Thomson Learning, 2001. p. 4.)

2.1.2 Comportamiento físico-químico de las arcillas

La mayor parte de las propiedades físico-químicas de las arcillas son derivados de su morfología laminar y su tamaño reducido de partículas, estos factores producen una elevada superficie específica en estos suelos y a su vez esto deriva en una gran superficie activa (D, Montoya, 1990), por lo cual reaccionan con diversas sustancias, especialmente con compuestos polares como el agua y las consecuencias inmediatas son el comportamiento plástico de las arcillas en combinación con el agua y el hinchamiento con el desarrollo de propiedades reológicas en suspensiones acuosas.

Debido al tamaño de las partículas de las arcillas, $<2\mu\text{m}$, son suelos en los cuales comienza a tener influencia el comportamiento físico-químico de estos. El desarrollo de las propiedades físico-químicas depende fundamentalmente de tres factores: Superficie específica de las partículas, desarrollo de cargas eléctricas y capacidad de intercambio catiónico (D, Montoya, 1990).

La superficie específica es una propiedad de los sólidos la cual relaciona el área superficial total y la masa del sólido; se expresa en unidades de área sobre peso, comúnmente en $[\text{m}^2/\text{g}]$. En los minerales depende de la morfología y el tamaño de

las partículas que interactúan con procesos como la meteorización física en el cual los sedimentos se disgregan en fragmentos progresivamente más pequeños debido a la acción de agentes externos como: La temperatura, el agua, el viento, el hielo y la vegetación. Así pues al reducir el tamaño de las partículas durante este proceso la superficie específica aumenta la adsorción y el intercambio iónico.

El intercambio catiónico es un proceso reversible en el cual las partículas sólidas del suelo adsorben iones de la fase acuosa liberando al mismo tiempo otros iones en cantidades equivalentes, estableciendo así el equilibrio entre ambas fases. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se define como la capacidad que tienen las arcillas para retener y liberar iones positivos (cationes), afectando así la capacidad de retener agua. Uno de los principales neutralizadores de la CIC es el calcio, por eso el uso de óxido de calcio (cal) para la estabilización de los suelos arcillosos. (J. Porta, M. Lopez. 2014. p.258).

2.1.3 Comportamiento de las arcillas en presencia de agua

Las arcillas al entrar en contacto con el agua demuestran propiedades de gran relevancia en el comportamiento mecánico como compresibilidad, expansibilidad, reducción de la resistencia al corte, etc. La estructura laminar de sílice y aluminio de las arcillas está constituida por iones de hidrógeno y oxhidrilo respectivamente, que de acuerdo con su estructura iónica corresponden a cargas eléctricas negativas. Como resultado de estas cargas negativas netas una parte del agua en los vacíos del suelo es atraída y se adhiere fuertemente a la superficie de las partículas y a esta se le llama agua adsorbida por que se presenta fenómeno de adsorción. Cada partícula de arcilla queda rodeada de agua adsorbida cuyas moléculas se orientan de tal manera que puedan seguir atrayendo a otras moléculas de agua o cationes de diferente especie, lo cual estará en función de la composición de las arcillas. (J, Eulalio. 2005).

2.1.4 Uso y dificultades de las arcillas en la construcción

Los suelos arcillosos son potencialmente peligrosos para desarrollar una cimentación, debido que tienen potencial para expansión y contracción en contacto con el agua y también pueden producir asentamientos durante un largo periodo de tiempo, además que el comportamiento bajo cargas de estos suelos ha aumentado

su estado del arte en las últimas décadas (Villafañe, Coronado & Ríos, 2000). Experimentalmente se determinó que el tiempo de asentamiento de los estratos arcillosos es proporcional al cuadrado de su espesor es decir, por ejemplo si la cimentación de un edificio descansa sobre un estrato de 2 metros de espesor y el asiento se produce en cuatro años, esta duración sería de 16 años si el espesor fuera de cuatro metros y de 100 años si el espesor fuera de diez metros. (Crespo, 2004).

El principal inconveniente que tienen los estratos de suelo arcilloso para la construcción sobre estos es el cambio volumétrico: ya sea por hinchamiento o asentamiento. Para tomar las precauciones necesarias se deben tener en cuenta tanto la magnitud del cambio volumétrico como el tiempo en el que se producen. (Aranciba, 2003). Los fenómenos de expansión y contracción suceden cuando las arcillas experimentan cambios en el contenido de agua, la relación que tenga el terreno con el agua juega un papel muy importante a la hora de los cambios volumétricos ya que se puede dar expansión por aumentos del nivel freático hasta el estrato de suelo arcilloso, o contracción al encontrarse frente a una disminución de la humedad del suelo por factores externos como por ejemplo la existencia cercana de raíces en la vegetación.

La expansión de los suelos arcillosos se produce cuando hay un aumento en el contenido de agua del suelo. La estructura laminar de las arcillas permite que el agua penetre y se organice dentro de las láminas estructurales ocasionando así un hinchamiento de éste, generando un aumento en la relación de vacíos y un aumento de volumen en el estrato de suelo activo, llegando a alcanzar presiones de expansión de hasta 50 Ton/m², suficientes para hacer daño a cualquier construcción de tamaño regular. (Aranciba, 2003).

La compresión en los suelos arcillosos corresponde a la deformación vertical que tiene el suelo producto de cargas verticales a las cuales se encuentra sometido. Los asentamientos se pueden clasificar básicamente en 3 tipos: 1. Asentamiento inmediato, causado por las deformaciones elásticas de las partículas de la arcilla, 2. Asentamiento por consolidación primaria, a raíz de un cambio de volumen en suelos saturados cohesivos, debido a la expulsión de agua que se encuentra en los vacíos del suelo y 3. Asentamiento por consolidación secundaria como resultado al ajuste en estado plástico de la estructura del suelo. (Das. Braja, 2001).



Ilustración 3. Daño producido por efecto de expansión de las arcillas, se nota levantamiento de losa. Morelos, México.

Fuente: (M. Salas, P. Núñez. Comportamiento de cimentaciones en suelos expansivos. 2013)

Son tres las principales causas de los asentamientos en suelos arcillosos: a) la reacomodación de las partículas lo cual produce una reducción en la relación de vacíos, b) la deformación propia de las partículas bajo la acción que ejercen las fuerzas en los puntos de contacto y c) la expulsión de aire o agua de los vacíos (Das. Braja, 2001. p-151).

2.2 CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL

2.2.1 Teoría de la consolidación

Los antecedentes de la mecánica de suelos en torno a la consolidación primaria, datan desde 1925 cuando Karl von Terzaghi, fundamentó la teoría de la consolidación, en la cual relaciona el asentamiento por consolidación en función del Índice de Compresión de un suelo.

$$S = \frac{C_c}{1 + e_0} H \log\left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{vo}}\right) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde S es el asentamiento por consolidación, C_c es el índice de compresión, e_0 y H , son la Relación de Vacíos Inicial y altura del estrato consolidable respectivamente y $\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{vo}}$, es la relación entre el esfuerzo efectivo en sentido vertical inicial y esfuerzo efectivo en sentido vertical final.

2.2.2 Compresibilidad

La compresibilidad en los suelos se define como el grado en el cual un estrato disminuye su volumen cuando se aplican cargas sobre este; esta es mínima en terrenos granulares pero se vuelve importante mientras el tamaño de las partículas va disminuyendo (J, Eulalio. 2005). Para suelos cohesivos es una de las características más importantes de un estudio de suelos y se vuelve la propiedad más importante a la hora de analizar asentamientos en el terreno. La variación de la compresibilidad en las arcillas es influenciada principalmente por la granulometría, gravedad específica, grado de saturación y permeabilidad. La compresibilidad de los suelos puede expresarse de la siguiente manera:

Tabla 2. Compresibilidad del suelo arcilloso según valores del índice de compresión.

[Carlos Crespo Villalas. Mecánica de suelos y cimentaciones. 2004]

Índice de Compresión C_c	Compresibilidad
0.0 – 0.19	Baja compresibilidad
0.2 – 0.39	Media compresibilidad
> 0.4	Alta compresibilidad

El Índice de Compresión es una de las propiedades con la que comúnmente se cuantifica la compresibilidad del suelo y este es encontrado a partir de la gráfica relación de vacíos vs esfuerzo efectivo producto del ensayo de consolidación: Se define como la pendiente de la rama virgen del proceso de carga del ensayo y está sujeto a un ajuste llamado corrección de Schmertmann para minimizar el error causado por el remoldeo a la hora de manejo de la muestra y montaje de la prueba en laboratorio.

2.2.3 Ensayo de consolidación unidimensional

Este procedimiento tiene como objetivos finales, determinar el índice de expansión, el Índice de Compresión y el respectivo esfuerzo de pre-consolidación del suelo, en una muestra de suelo inalterada cuando éste está confinado lateralmente y además está cargado y drenado axialmente. (D2435-11, ASTM, 2011).

La compresibilidad de los suelos, tal como se determina en este ensayo, es una de las propiedades más útiles que pueden ser obtenidas de los ensayos de laboratorio. Los datos del ensayo de consolidación pueden ser utilizados para desarrollar un estimado de la velocidad y la magnitud de los asentamientos totales y diferenciales de una estructura o un terraplén. De esta manera los valores calculados son frecuentemente de importancia clave, en primer lugar en la selección del tipo de cimentación y en segundo lugar en la evaluación de su competencia. (D2435-11, ASTM, 2011). Diversas normas han estandarizado el método de ensayo, siendo las consultadas en esta investigación las siguientes:

- ASTM D2435-11 Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading.

Equivalente en Norma Técnica Colombiana:

- NTC 1987 Método De Ensayo para Determinar las Propiedades de Consolidación Unidimensional de los Suelos.
- INV E – 151 – 13 Consolidación unidimensional del suelos.

El método requiere que un elemento de suelo sea confinado lateralmente y cargado axialmente mediante incrementos, bajo la aplicación de un esfuerzo constante, hasta que todo el exceso de presiones de poro se haya disipado en cada incremento. Durante el proceso de compresión se toman medidas del decremento en la altura de la muestra, y estos datos son utilizados para calcular los parámetros que determinan la relación entre el esfuerzo efectivo y la relación de vacíos o la deformación, para calcular la velocidad a la cual la compresión puede ocurrir.

El consolidómetro es un dispositivo diseñado para mantener la muestra dentro del anillo, con piedra porosa en cada cara de la muestra. Debe disponer de medios para sumergir la muestra, aplicar una carga vertical y medir el cambio en la altura de la muestra. El anillo del consolidómetro deberá cumplir con los siguientes requisitos. (D2435-11, ASTM, 2011).

- El diámetro mínimo de la muestra deberá ser de 50 mm y deberá ser al menos 5 mm menor que el diámetro interior del tubo sacar muestras si las muestras son extraídas y preparadas.
- La altura mínima de la muestra deberá ser de 13 mm, pero no deberá ser menor que 10 veces el diámetro máximo de la partícula.
- La relación mínima diámetro-altura deberá ser de 2.5.
- La rigidez del anillo deberá ser tal que bajo condiciones de esfuerzo hidrostático en la muestra, el cambio en el diámetro del anillo no excederá de 0.03% del diámetro bajo la más grande carga aplicada.
- El anillo deberá ser hecho de un material que no sea corroído por el suelo ensayado.

2.2.4 Curva de consolidación

Durante el ensayo de consolidación unidimensional se tiene un registro de la deformación durante el tiempo para cada escalón de carga aplicado en la prueba. La grafica de consolidación al realizarse para cada escalón de carga, permite observar la variación de la deformación durante el tiempo. Así se podrán identificar las variaciones atípicas que permitan tener especial cuidado en el registro de los datos y además el tiempo para el cual se encuentra totalmente consolidado el suelo, para la carga a la cual se encuentra sometida.

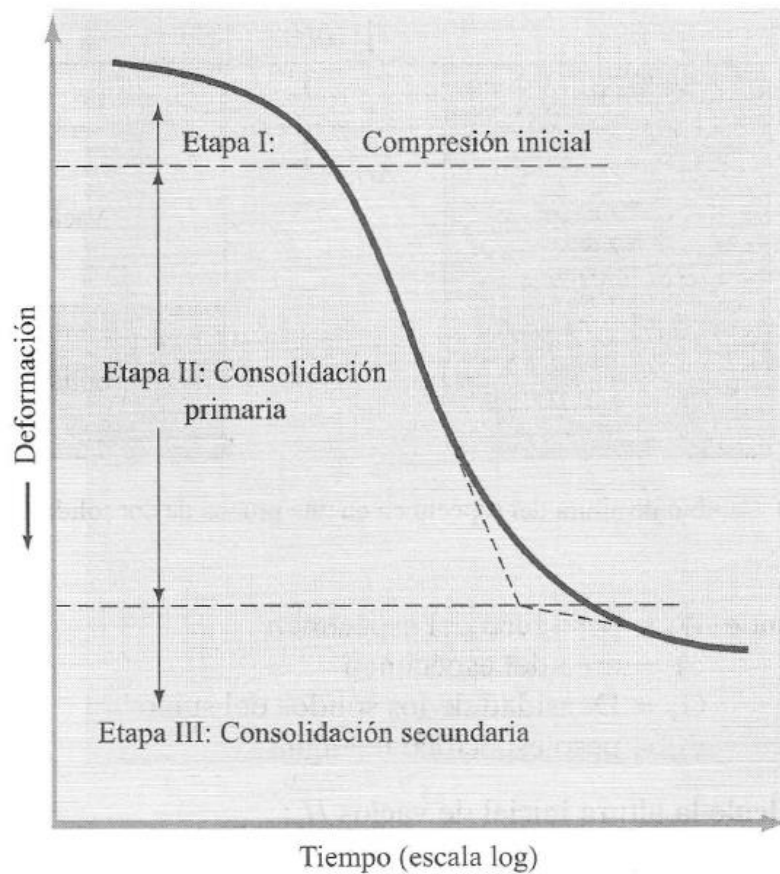


Ilustración 4. Curva de consolidación típica.

Fuente: (Das, Braja. Fundamentos de ingeniería geotécnica. México, D.F.: Thomson Learning, 2001. p. 155.)

La grafica de consolidación para un escalón de carga se muestra en la ilustración 4 y como se puede observar consta de 3 etapas:

Etapa I: Consolidación inicial, causada principalmente por la precarga.

Etapa II: Consolidación primaria, etapa durante la cual el exceso de presión de poro es gradualmente transferido a esfuerzos efectivos, por la expulsión del agua del poro.

Etapa III: Consolidación secundaria, ocurre después de la disipación total del exceso de presión de poro del agua cuando, las deformaciones del espécimen tienen lugar debido al reajuste plástico de la estructura del suelo. (DAS, Braja. 2001. p.155).

2.2.5 Curva de compresibilidad

Con base en el ensayo de laboratorio de consolidación unidimensional se dibuja un gráfico que muestre la relación de vacíos (e) al final de la consolidación primaria contra el correspondiente esfuerzo efectivo vertical (σ_v) (también se representa en algunas ocasiones con (p)), representados en un gráfico semilogarítmico donde (e) se encuentre en escala aritmética y (σ_v) en escala logarítmica. Durante el ensayo de consolidación se van colocando progresivamente cargas a las cuales el suelo responde asentándose por reducción en la relación de vacíos. Una vez consolidado totalmente el suelo se toma el dato perteneciente a la relación de vacíos (e) del suelo, para cada incremento de carga. La grafica de compresibilidad consta generalmente de una rama de carga y otra de descarga, durante la etapa de carga se presenta una primera etapa de deformación elástica, una etapa transicional en la cual se encuentra el punto de mayor curvatura (M) de la gráfica y una tercera etapa que se conoce como la rama de compresión noval o rama virgen cuya pendiente es el Índice de Compresión del laboratorio (C_c).

En la Ilustración 5, se presenta la gráfica de compresibilidad generada típicamente para una arcilla referenciando las etapas y los puntos de interés para el análisis de la gráfica.

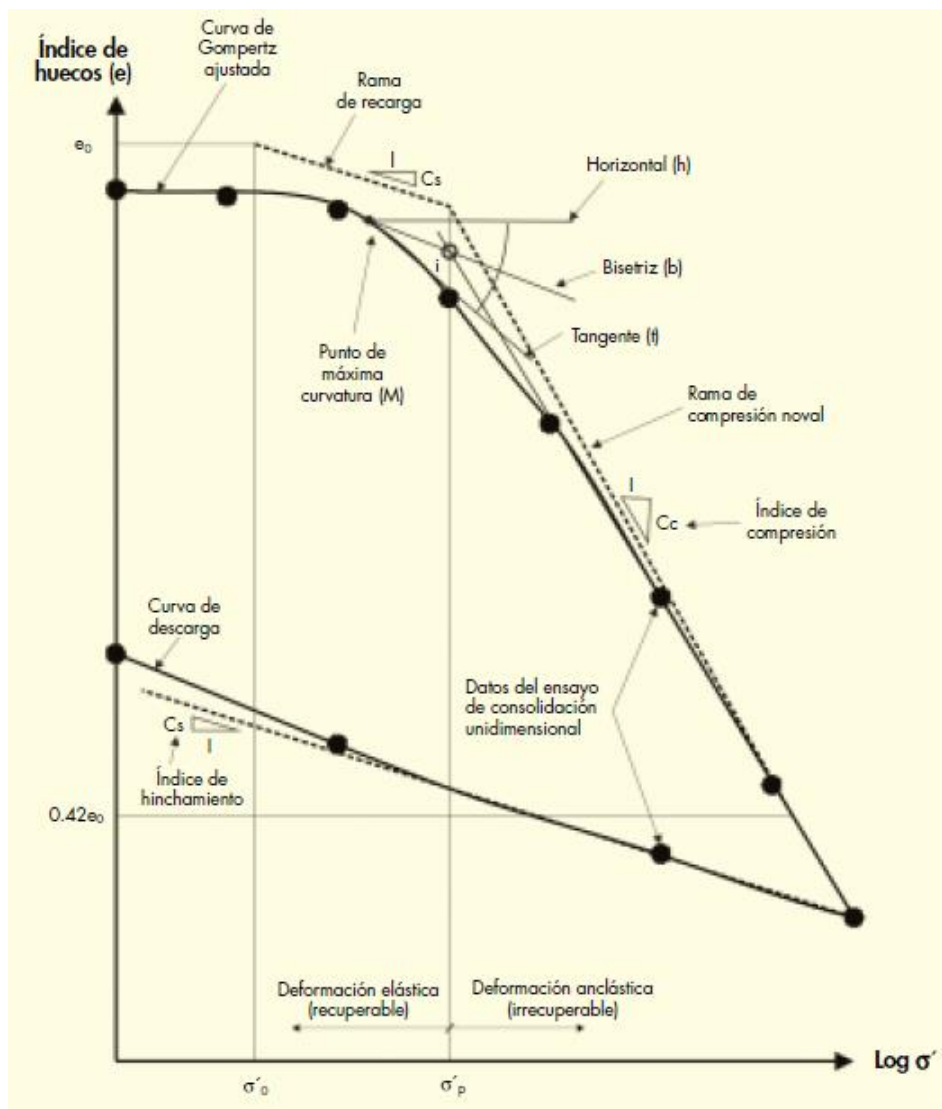


Ilustración 5. Curva edométrica de laboratorio y de campo de una muestra de suelo sobreconsolidada.

Fuente: (R. Thomas, A. Cuenca, J. Delgado, C. Domenech, A. Mirad. Cálculo analítico de la presión de preconsolidación del suelo: aplicación a la Vega Baja del río Segura (Alicante), 2010.)

De la curva $e - \log(\sigma_v)$ mostrada en la Ilustración 5, se pueden determinar los tres parámetros fundamentales del ensayo de consolidación. Ellos son: Presión de preconsolidación (σ_p), Índice de Compresión (C_c) e índice de hinchamiento (C_s), de los cuales se hablará a continuación.

2.2.6 Presión de preconsolidación (σ_p)

La presión de preconsolidación es la máxima presión efectiva que ha sido soportada por el suelo en el pasado (en toda su historia geológica). Este parámetro es de gran interés geotécnico ya que es el punto que separa las deformaciones elásticas (recuperables), de las deformaciones inelásticas o irreversibles por lo cual una correcta determinación de éste, reviste gran importancia para el análisis de la respuesta de un suelo ante cargas. (J. Eulalio, 2005).

Gráficamente la presión de preconsolidación se puede determinar por medio de un simple pero subjetivo procedimiento el cual fue propuesto por Casagrande en 1936, este es el método gráfico más extendido en la literatura y consiste en trazar una recta horizontal (h) por el punto de máxima curvatura de la curva edométrica (M), trazar la tangente (t) por ese mismo punto y determinar la bisectriz (b) de esas dos rectas (Ilustración 5). El valor del esfuerzo efectivo correspondiente al punto (i) de intersección de dicha bisectriz (b) con la prolongación del tramo recto de la rama de carga de la curva edométrica es la presión de preconsolidación (σ_p) (Ilustración 5).

2.2.7 Índice de compresión

El Índice de Compresión (C_c), corresponde gráficamente a la pendiente de la rama de compresión noval o rama virgen de la curva de compresibilidad y puede ser determinada matemáticamente como:

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log \sigma_2 - \log \sigma_1} = \frac{e_1 - e_2}{\log \frac{\sigma_2}{\sigma_1}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde e_1 y e_2 son los valores de la relación de vacíos al principio y al final de la consolidación bajo los esfuerzos σ_1 y σ_2 respectivamente, tales esfuerzos deben representar la parte de la curva de compresión correspondiente a la rama de compresión noval o rama virgen.

2.2.8 Índice de hinchamiento

El índice de hinchamiento (C_s) es la pendiente de la rama de descarga de la gráfica de compresión obtenida con el ensayo de consolidación mostrado en la Ilustración 5, matemáticamente se encuentra representado por la expresión:

$$C_s = \frac{e_3 - e_4}{\log \frac{\sigma_4}{\sigma_3}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde e_3 y e_4 son los valores de la relación de vacíos correspondiente al final de la recuperación de la muestra en descarga para las presiones σ_3 y σ_4 respectivamente.

2.2.9 Corrección de la curva de compresibilidad

El Índice de Compresión encontrado en laboratorio, será ligeramente diferente al Índice de Compresión del campo esto debido principalmente al remoldeo sufrido por el suelo durante la extracción de la muestra y el manejo en el laboratorio durante el montaje de la prueba de consolidación. Schmertmann (1955) observó que la rama virgen se encontraba desfasada con respecto a la del laboratorio y también observó que las curvas de compresibilidad de muestras inalteradas y muestras remodeladas, se interceptan para un valor de $0.42e_o$, donde e_o es la relación de vacíos en campo y σ_o el esfuerzo total al que se encuentra la muestra en terreno. Conociendo σ_o , σ_p y e_o se procede a hallar el Índice de Compresión con la Ecuación 2. Gráficamente la corrección se dibuja de la siguiente manera: Para $0 < \sigma < \sigma_o$, $e = e_o$, para $\sigma_o < \sigma < \sigma_p$ se grafica la línea correspondiente a la pendiente de la rama de descarga y se lleva la gráfica hasta donde se interceptan la rama virgen con la relación $0.42e_o$, como se muestra en la Ilustración 5.

2.3 PROPIEDADES ÍNDICES DEL SUELO

Las propiedades índices del suelo, son parámetros fundamentales para el diseño y la construcción en la ingeniería civil. Por ejemplo en los proyectos de construcción es necesario tener el conocimiento sobre la relación de vacíos para poder predecir asentamientos por consolidación, también conocimiento de los Límites de Atterberg para la consistencia del suelo, todo esto con el fin de tener conocimiento del suelo sobre el cual se va a construir. A continuación se destacan las características concernientes con a la investigación que corresponden a la relación de vacíos, humedad y Límite Líquido del suelo.

2.3.1 Relación de vacíos

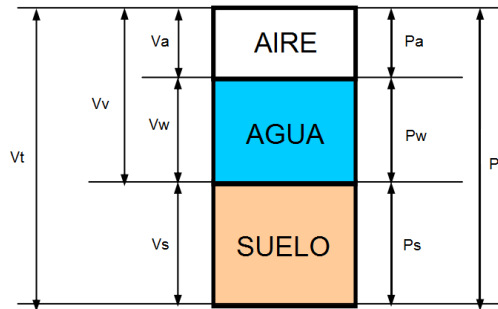


Ilustración 6. Esquema de 3 fases del suelo.

Las relaciones volumétricas son muy importantes para el manejo de las propiedades mecánicas e hidráulicas de los suelos. Tener un completo dominio de su significado y sentido físico es imprescindible para poder expresar en forma simple los datos y conclusiones de los ensayos en la geotecnia. La proporción de vacíos en un elemento de suelo se expresa en función de la Relación de Vacíos denotada con (e) y expresada en relación al volumen con la siguiente expresión:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde e es la relación de vacíos, V_v es el volumen de vacíos de la muestra y V_s es el volumen de las partículas sólidas del suelo.

2.3.2 Grado de saturación

El grado de saturación se define como la razón del volumen de agua al volumen de vacíos, o la proporción en la cual los vacíos del suelo contienen fluido (DAS, Braja. 2001.) y se determina en porcentaje según la expresión de la Ecuación 5.

$$S = \frac{V_w}{V_v} \quad \text{Ecuación 5}$$

2.3.3 Humedad Natural

Para muchos materiales, el contenido de agua es una de las propiedades índice más significativas utilizadas en el establecimiento de una correlación entre el comportamiento del suelo y sus propiedades índice. El contenido de agua de un

material se utiliza en la expresión de las relaciones de fase de aire, agua y sólidos en un volumen dado de material. (D2216-10, ASTM, 2010).

Las normas han estandarizado el método del ensayo para la obtención del contenido de agua, siendo consultadas para esta propiedad las siguientes:

- ASTM D2216 - 10 Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass.

También se consultó su idéntico en normas técnicas colombianas:

- NTC 1945 Método de Ensayo para Determinar en el Laboratorio el Contenido de Agua (Humedad) de Suelos y Rocas, con Base en la Masa.

Debido al objeto y la formulación de la presente investigación, se basarán los ensayos en las normas técnicas colombianas (o su equivalente en ASTM) para cada uno. Para el ensayo se determina el peso de agua eliminada, secando el suelo húmedo hasta un peso constante en un horno controlado a 110 ± 5 °C. El peso del suelo que permanece del secado en horno es usado como el peso de las partículas sólidas. La pérdida de peso debido al secado es considerado como el peso del agua. (D2216-10, ASTM, 2010).

$$\%w = \frac{P_w}{P_s} * 100 \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde: P_w es el peso de las partículas de agua en la muestra, P_s es el peso de las partículas sólidas de la muestra y $\%w$ es el contenido de humedad en porcentaje.

2.3.4 Limite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad

El Límite Líquido, Límite Plástico y el Índice de Plasticidad de los suelos también se utilizan ampliamente, ya sea individualmente o en conjunto con otras propiedades del suelo que se correlacionan para estimar el comportamiento de propiedades tales como compresibilidad, conductividad, permeabilidad, compactibilidad, contracción y resistencia al corte hidráulico. (D4318-10, ASTM, 2010). Los métodos para la realización del ensayo el cual permite encontrar los límites de Atterberg ya se encuentran estandarizados en las siguientes normas:

- ASTM D4318 - 10e1 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.

Y su equivalente en norma técnica colombiana:

- NTC 4630 Método de Ensayo para la Determinación del Límite Líquido, del Límite Plástico y del Índice de Plasticidad de los Suelos Cohesivos.
- INV E – 125 – 13 Determinación del Límite Líquido de los suelo.

Límite Líquido:

El Límite Líquido es el contenido de agua por debajo del cual el suelo se comporta como un material plástico. A este nivel el suelo está al vértice de cambiar su comportamiento a un fluido viscoso (J. Bowles, 1980), corresponde a uno de límites de consistencia del suelo propuestos por el científico sueco Albert Mauritz Atterberg. Está definido como la humedad a la cual una porción de suelo fino previamente humectado y colocado sobre una cazuela de bronce, vuelve a unirse después de ser separada en 2mm en su base después de 25 golpes a una altura de caída de la cazuela de aproximadamente 1cm, la representación del ensayo se muestra en la Ilustración 7 y 8. Normalmente éste y el Límite Plástico son usados para realizar la caracterización del suelo según la Carta de Plasticidad de Casagrande.

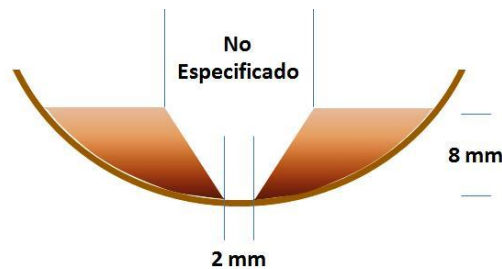


Ilustración 7. Cazuela de bronce con muestra de suelo antes de la prueba.

(Fuente: [Citado el 18 de Noviembre de 2010] Disponible en <<http://geotecnia-sor.blogspot.com.co/2010/11/consistencia-del-suelo-limites-de.html>>)

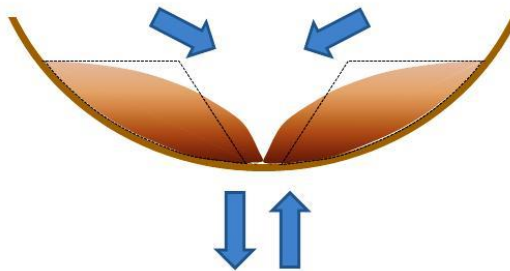


Ilustración 8. Cazuela de bronce con muestra de suelo después de la prueba.

(Fuente: [Citado el 18 de Noviembre de 2010] Disponible en <<http://geotecnia-sor.blogspot.com.co/2010/11/consistencia-del-suelo-limites-de.html>>).

Dispositivo de Límite Líquido: Es un dispositivo mecánico que consiste en una taza de latón suspendida de un pasador diseñado para controlar su caída en una base de caucho endurecido, el dispositivo de Casagrande (1958) puede ser manejado por un motor eléctrico o manivela. La Ilustración 9, muestra las funciones esenciales y las dimensiones críticas del dispositivo.

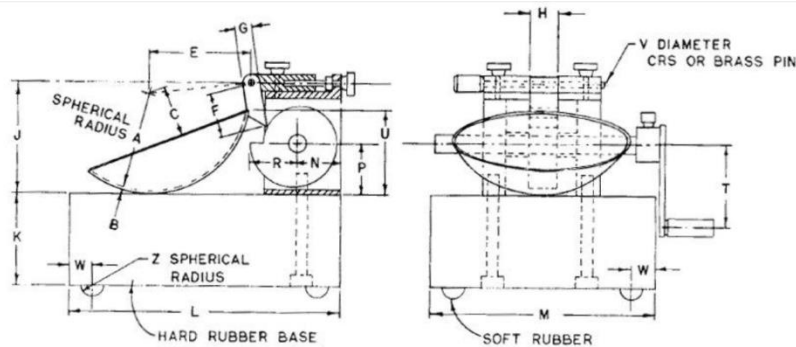


Ilustración 9. Dispositivo de Casa grande.

Fuente: (ASTM D4318 - Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. 2010)

Límite Plástico

El Límite Plástico se define como el contenido de agua por debajo del cual se puede considerar el suelo como material no plástico y está definido como el contenido de agua del suelo, al cual un cilindro se agrieta o desquebraja cuando se enrolla en un diámetro de 3mm o aproximadamente 3mm (J. Bowles, 1980), donde:

$$LP = \frac{\text{Peso del agua}}{\text{Peso del suelo secado al horno}} \times 100 \quad \text{Ecuación 7}$$

Es un ensayo más subjetivo a la interpretación del operador y junto con el Límite Líquido son usados en la caracterización de los suelos finos según la Carta de Plasticidad de Casagrande y sirven para encontrar el índice de plasticidad del suelo.

Índice de Plasticidad

El índice de plasticidad (IP) es la diferencia entre el Límite Líquido y el Límite Plástico de un suelo y se representa matemáticamente como:

$$IP = LL - LP \quad \text{Ecuación 8}$$

2.4 MÉTODO DE REGRESIÓN LINEAL

2.4.1 Método de regresión lineal simple

Con frecuencia nos encontramos con modelos en los que el comportamiento de una variable, Y, se puede explicar a través de una variable X; lo que representamos mediante la ecuación:

$$Y = f(X) \quad \text{Ecuación 9.1}$$

Se considera Y a la variable dependiente o la variable que se quiere predecir en función de las demás, en este caso el Índice de Compresión (C_c) y la variable X como la variable independiente que para el caso puntual de la investigación serán la Relación de Vacíos Inicial (e_o), humedad inicial (W_o) y límite líquido (LL). Aplicando la Ecuación 8 para relacionar la variable dependiente y las independientes se establecen ecuaciones de la siguiente forma:

$$C_c = f(e_o), C_c = f(W_o), C_c = f(LL) \quad \text{Ecuación 9.2}$$

Para las regresiones simples es posible contar con regresiones lineales, cuadráticas, cúbicas o del grado necesario según el comportamiento de la regresión representado en la gráfica de dispersión entre la variable dependiente y las independientes, las ecuaciones de regresión se formulan de la siguiente manera para comportamientos lineales:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde Y, es la variable dependiente, X es la variable independiente, los coeficientes β_i , son los parámetros que definen el comportamiento de la ecuación y ε , es la componente de error aleatoria (Uriel, E. 2013).

2.4.2 Método de regresión lineal de múltiples variables

También constantemente en la práctica de la investigación se encuentran variables que de alguna manera están relacionados entre sí, por lo que es posible que una de las variables puedan relacionarse matemáticamente en función otras variables de esta manera es posible aplicar la *Ecuación 8* para expresar el Índice de Compresión como:

$$C_c = f(e_o, W_o, LL) \quad \text{Ecuación 11}$$

El comportamiento es de la misma forma y es posible ampliar la *Ecuación 8* para un número i de variables:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_i X_i + \varepsilon \quad \text{Ecuación 12}$$

Covarianza

La covarianza es una medida de fuerza de la correlación lineal entre dos variables cuantitativas, adicionalmente covarianza es positiva si existe una relación (lineal) creciente y negativa si existe una relación lineal decreciente. Se expresa según la siguiente expresión:

$$S_{xy} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n X_i Y_i - n \bar{X} \bar{Y} \right)$$

Donde n es el número de datos, S_{xy} la covarianza muestral X_i , Y_i son los i -ésimos valores de las variables X y Y respectivamente, finalmente $\bar{X}\bar{Y}$ es la media aritmética de los valores de las variables X y Y . (A. Novales, 2010).

Coeficiente de correlación (r) y coeficiente de determinación (R^2)

El coeficiente de correlación lineal mide la intensidad de la asociación lineal entre las variables independientes y la variable dependiente expresada de la siguiente manera:

$$r = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde S_{xy} es la covarianza muestral, S_x y S_y son las desviaciones estándar de las funciones respectivamente y $R^2 = r^2$. (A. Novales, 2010).

2.5 MÉTODO DE REGRESIÓN NO LINEAL

Habitualmente el tratamiento de la regresión se limita al comportamiento lineal de las muestras y para algunos casos, se considera que suficiente pero para otros no. Teniendo en cuenta que para problemas de ingeniería, algunas veces se hace difícil tener un comportamiento de la muestra definido de manera lineal, es necesario encontrar métodos no lineales que puedan ofrecer un mejor ajuste a los datos y encontrar unas predicciones más certeras y ecuaciones con una mayor correlación entre los datos.

2.5.1 Método de la regresión no lineal simple

Tal como en el análisis lineal se tendrá una variable independiente X , y una variable dependiente Y y se busca llegar a la manera de expresar Y en términos de X , durante el desarrollo de la investigación se trataron simultáneamente dos o más variables de tal manera que se observaron n valores de X , $(X_1, X_2, \dots, X_n)$, y luego para cada valor de X_i obtenemos un valor observado de Y_i de Y , teniendo así una muestra de n parejas de valores:

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), \dots, (x_n, y_n)$$

Después se pueden graficar las n parejas de datos en un plano de tal manera que se observe el comportamiento de variable dependiente con respecto a la independiente. Finalmente es necesaria una función que describa el diagrama de puntos resultante de manera más apropiada.

Método de mínimos cuadrados

Sea $f(x,a)$ una función cualquiera de la siguiente manera:

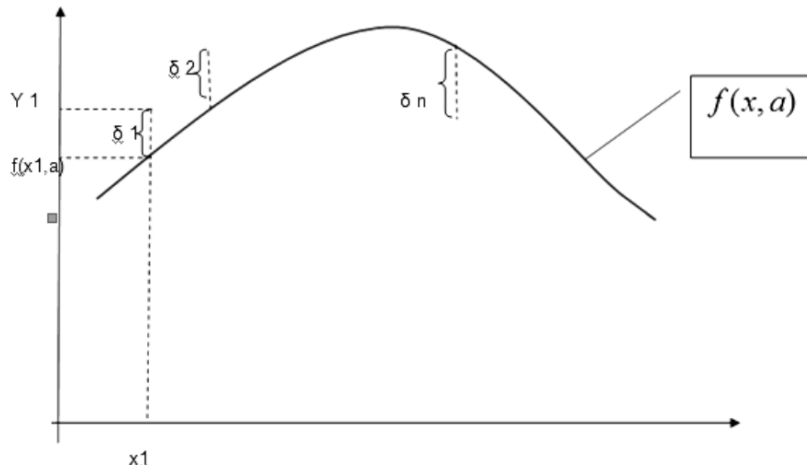


Ilustración 10. Ilustración del gráfico de dispersión vs función de regresión muestral.

Se encuentra que para cada valor de $i = 1, 2, \dots, n$ el error que se define como la diferencia entre el valor observado y el obtenido a través de la función:

$$\delta_i = Y_i - f(x_i, a) \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde (a) es la componente de error o perturbación aleatoria.

Se define la función S que en cada vector tiene un valor expresado de la siguiente manera:

$$Sa = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - f(x_i, a))^2 \quad \text{Ecuación 16}$$

Si los puntos $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), \dots, (x_n, y_n)$ pertenecen a la gráfica de la función entonces $Sa = 0$. Si esto no ocurre se debe intentar que dicha función tome el valor mínimo. En general tal mínimo se alcanza para un único valor de $\hat{a}$ entonces la función a elegir será $\hat{y} = f(x, \hat{a})$ que se denomina función de mínimos cuadrados para el problema. (A. Novales, 2010).

Donde $\hat{y}$ representa la función de regresión muestral (FRM) y $\hat{a}$ el residuo y nos indica que para cada valor de x_i tenemos un valor observado (y_i) y un valor ajustado ($\hat{y}_i$), donde:

$$\hat{a} = y_i - \hat{y}_i \quad \text{Ecuación 17}$$

Para la determinación de $\hat{a}$, se necesita que S tenga un mínimo en el punto a, lo que quiere decir que el residuo sea mínimo, para esto debe ocurrir que:

$$\frac{\partial}{\partial a_i} S_a = 0 \quad \text{Ecuación 18}$$

Reemplazando en la Ecuación 16 se obtiene:

$$-2 \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, a)) \frac{\partial}{\partial a} f(x_i, a) = 0$$

Donde resulta:

$$\sum_{i=1}^n y_i \frac{\partial}{\partial a_j} f(x_i, a) \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde, $j=1, 2, 3, n$.

Desarrollando las sumatorias resulta un sistema de ecuaciones normales cuya solución es el vector $\hat{a}$ buscado.

Coeficiente de determinación no lineal

Es el cuadrado del coeficiente de correlación y mide parte relativa de la variación que viene expresada por el modelo de la siguiente manera:

$$R^2 = 1 - \frac{SCE}{SCT} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde:

SCE= Suma de cuadrados debida al error = $\sum (y_i - \hat{y}_i)^2$

SCT= Suma de cuadrados totales = $\sum (y_i - \bar{y}_i)^2$

SCR= Suma de cuadrados debida a la regresión = $\sum (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2$ (A. Novales, 2010).

2.6 ANTECEDENTES

2.6.1 Correlaciones lineales simples para el índice de compresión

Es común registrar en la bibliografía de la mecánica de suelos clásica que algunos investigadores han obtenido ecuaciones usando regresiones lineales simples (de única variable independiente), en las cuales relacionan el Índice de Compresión con varias propiedades índices del suelo, la mayoría tomando como base el trabajo del investigador e ingeniero civil británico Alec Skempton (1944), el cual propuso la primera correlación para el Índice de Compresión (C_c) debido a que había encontrado que los valores de (C_c) para muestras remoldeadas de arcillas aumentaban a medida que el valor del Límite Líquido crecía, desarrollando entonces una regresión lineal en la cual relacionaba el Índice de Compresión con el Límite Líquido de un suelo arcilloso de la ciudad de Londres, fundamentándose en la teoría de la consolidación, generando la ecuación lineal $C_c = 0.007(LL-7\%)$ con una variación del $\pm 30\%$, también Terzaghi & Peck (1967) encontraron que para arcillas normalmente consolidadas de sensibilidad media a baja presentaban una relación directamente ascendente hallando la ecuación $C_c=0.009(LL-10)$. De igual manera en Brasilia, Cozzolino (1961) encontró entre las correlaciones más significativas una en función del Límite Líquido: $C_c=0.0046(LL-9\%)$ y en función de la Relación de Vacíos Inicial: $C_c=0.43(e_o-0.25)$. Otros investigadores: Azzous (1976), Koppula (1981), Nishida (1980), entre otros listados en la Tabla 3, han formulado ecuaciones para relacionar el Índice de Compresión generalmente obteniendo ecuaciones de manera lineal, logrando buenos resultados al relacionar la Relación de Vacíos Inicial y el contenido de agua natural, con el índice de compresión.

Más recientemente Ayala K, & Flores (2012) y Acevedo, Flores & Gomez (2014), realizaron una investigación para suelos del Valle de México donde encontraron ecuaciones de correlación en función del Límite Líquido, Relación de Vacíos Inicial y la Humedad Natural todas basadas en ecuaciones lineales referenciadas en la Tabla 3. Encontrando para el primero una mayor correlación entre la Relación de Vacíos Inicial (e_o) con un R^2 del 82% pero obteniendo similares resultados con la Humedad Natural (w_o) el cual tuvo un R^2 del 80% y dejando atrás a la variable independiente Límite Líquido (LL) con un R^2 del 50% para 15 muestras inalteradas de suelos de México. Obteniendo para el segundo resultados similares: una mayor correlación entre la Relación de Vacíos Inicial (e_o) con un R^2 del 83% pero obteniendo similares resultados con la Humedad Natural (w_o) el cual tuvo un R^2 del

79% y dejando atrás a la variable independiente Límite Líquido (LL) con un R^2 del 59% para 191 muestras inalteradas de suelos en su mayoría arcillosos de México.

Tabla 3. Ecuaciones lineales de correlación para el Índice de Compresión comúnmente encontradas en la mecánica de suelos.

Fuentes: Braja Das, (2001) y otros.

Ecuación propuesta	Aplicabilidad	Referencia	Año
$C_c=0.85(w_o/100)^3$	Arcillas de Finlandia	Helenclund	1951
$C_c=0.0115w_o$	Limo y arcilla orgánicas	Moran	1958
$C_c=0.01(w_o-5)$	Todas las arcillas	Azzouz	1976
$C_c=0.01w_o$	Arcillas de Chicago	Koppula	1981
$C_c=0.014(w_o-7.549)$	Todas las arcillas	Herrero	1980
$C_c=0.007(LL-7)$	Arcillas remoldeadas	Skempton	1944
$C_c=0.0046(LL-9)$	Arcillas de Brasil	Cozzolino	1961
$C_c=0.009(LL-10)$	Arcillas normalmente consolidadas	Terzaghi & Peck	1967
$C_c=0.006(LL-9)$	Todas las arcillas	Azzouz	1976
$C_c=(LL-13)/109$	Todas las arcillas	Mayne	1980
$C_c=0.54(e_o-0.35)$	Todas las arcillas	Nishida	1956
$C_c=0.29(e_o-0.27)$	Arcillas inorgánicas, arcillas limosas.	Hough	1957
$C_c=0.35(e_o-0.5)$	Suelo orgánico (limo y arcillas)	Hough	1957
$C_c=0.43(e_o-0.25)$	Arcillas de Brasil	Cozzolino	1961
$C_c=0.75(e_o-0.5)$	Arcillas de muy baja plasticidad	Sowers	1970
$C_c=0.4(e_o-0.25)$	Todas las arcillas	Azzouz	1976
$C_c=0.02(LL) - 0.3406$	Limo y arcillas de México	Ayala & Flores	2012
$C_c=0.0217(w_o)-0.8579$	Limo y arcillas de México	Ayala & Flores	2012
$C_c=0.7974(e_o) - 0.8589$	Limo y arcillas de México	Ayala & Flores	2012
$C_c = 0.5217(e_o-0.2)$	Arcillas de la ciudad de Pontianak, India	Slamet Widodo & Abdelazim Ibrahim	2012
$C_c = 0.0102(w_o + 11.57)$	Arcillas de la ciudad de Pontianak, India	Slamet Widodo & Abdelazim Ibrahim	2012

$C_c = 0.01706(LL - 1.29)$	Arcillas de la ciudad de Pontianak, India	Slamet Widodo & Abdelazim Ibrahim	2012
$C_c = 0.0164(LL) - 0.2007$	Arcillas de México	Acevedo, Flores & Gomez	2014
$C_c = 0.0198(w_o) - 0.6640$	Arcillas de México	Acevedo, Flores & Gomez	2014
$C_c = 0.759(e_o) - 0.5943$	Arcillas de México	Acevedo, Flores & Gomez	2014

De igual manera durante la investigación Estimation of Primary Compression Index (C_c) Using Physical Properties of Pontianak Soft Clay (Slamet Widodo, Abdelazim Ibrahim, 2012), se realiza una serie de correlaciones para el índice de compresión, usando la regresión lineal para arcillas de la ciudad de Pontianak, India. Obteniendo como uno de sus resultados una ecuación para predecir el Índice de Compresión en función de la Relación de Vacíos Inicial, humedad inicial y Límite Líquido. Se graficó la regresión lineal de las variables independientes con respecto al Índice de Compresión con su correspondiente **coeficiente de correlación de Pearson** al cuadrado (R^2), el cual cabe resaltar es sólo valido para la regresión lineal simple y representa la proporción del comportamiento lineal de los resultados. Las ecuaciones resultantes de la investigación se muestran a continuación:

$$C_c = 0.5217(e_o - 0.2) \quad \text{Ecuación 21}$$

La Ecuación 21 representa la correlación para el Índice de Compresión en función de la Relación de Vacíos Inicial (e_o).

$$C_c = 0.0102(w_o + 11.57) \quad \text{Ecuación 22}$$

La Ecuación 22 representa la correlación para el Índice de Compresión en función de la relación de la Humedad Natural (w_o).

$$C_c = 0.01706(LL - 1.29) \quad \text{Ecuación 23}$$

La Ecuación 23 representa la correlación para el Índice de Compresión en función de la relación del Límite Líquido (LL).

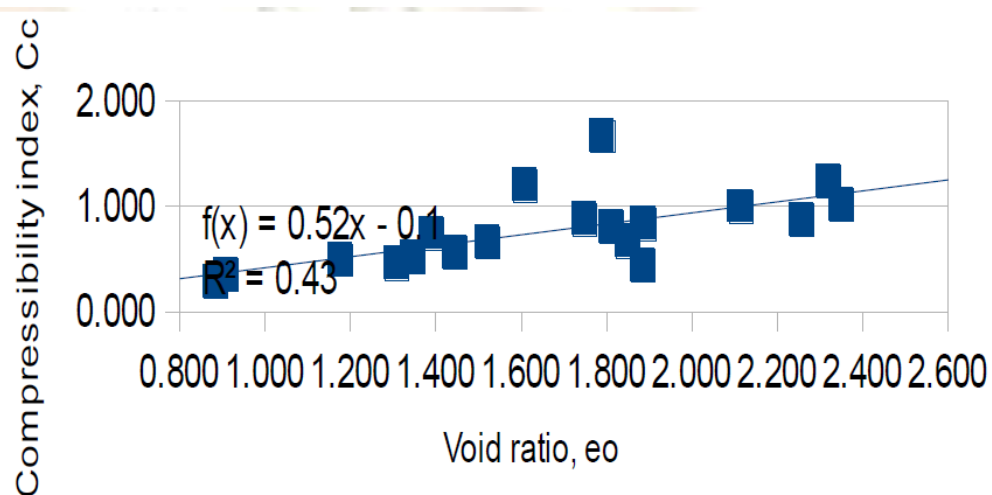


Ilustración 11. Gráfico de dispersión y regresión lineal del índice de compresibilidad C_c y la Relación de Vacíos Inicial e_o .

(Fuente: Estimation of Primary Compression Index (C_c) Using Physical Properties of Pontianak Soft Clay, 2012. p.3).

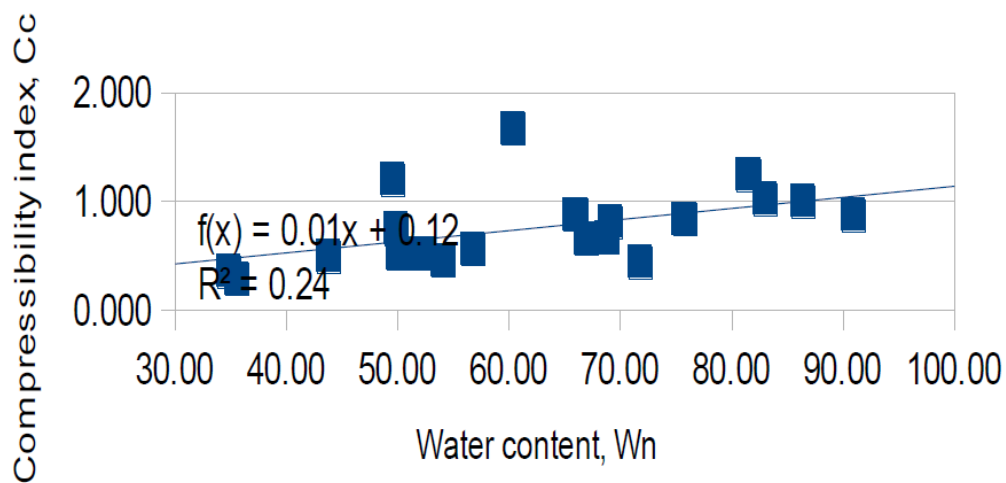


Ilustración 12. Gráfico de dispersión y regresión lineal del índice de compresibilidad C_c y la Humedad Natural w_o .

(Fuente: Estimation of Primary Compression Index (C_c) Using Physical Properties of Pontianak Soft Clay, 2012. p.3).

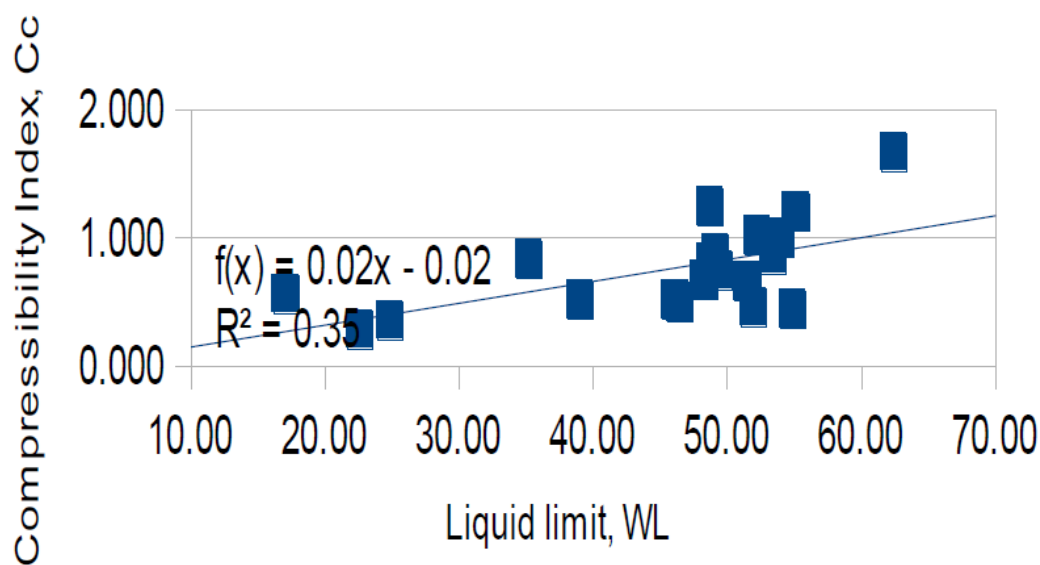


Ilustración 13. Gráfico de dispersión y regresión lineal del índice de compresibilidad Cc y el Límite Líquido LL.

(**Fuente:** Estimation of Primary Compression Index (Cc) Using Physical Properties of Pontianak Soft Clay, 2012. p.4).

Finalmente después de analizar las 20 muestras, se obtuvieron como conclusiones de esta investigación una mayor relación entre el Índice de Compresión y la relación de vacíos que entre el Límite Líquido o el contenido de agua en la muestra.

2.6.1.1 Correlaciones lineales simples para el Índice de Compresión en función de Relación de Vacíos Inicial (e_o)

Distintos investigadores han realizado correlaciones para el Índice de Compresión en función de la Relación de Vacíos Inicial, usando el método de la regresión lineal. Las correlaciones más significativas son mostradas en la siguiente tabla ordenada por fecha de publicación y teniendo presente las limitaciones dadas por los autores:

Tabla 4. Principales ecuaciones de correlación lineal simple desarrolladas entre el Índice de Compresión (Cc) y la Relación de Vacíos Inicial (e_o).

Fuentes: Nishida, (1956) y otros.

Correlación	Autor	Fecha	Observación	Limitación
$C_c = 0.054(e_o - 0.35)$	Nishida	1956	Regresión lineal	Cualquier arcilla
$C_c = 0.35(e_o - 0.5)$	Houg	1957	Regresión lineal	Suelo orgánico (arcillas y limos)
$C_c = 0.43(e_o - 0.25)$	Cozzolino	1961	Regresión lineal	Arcillas de Brasil
$C_c = 0.4(e_o - 0.25)$	Azzous	1976	Regresión lineal	Cualquier arcilla

2.6.1.2 Correlaciones lineales simples para el Índice de Compresión (C_c) en función de la Humedad Natural (w_o)

Las correlaciones en función del contenido de agua inicial de la muestra o in situ, muestran características similares en las ecuaciones considerando que ya en alguna de ellas, se sale del método de la regresión lineal para hallar las ecuaciones de correlación. Unas de las significativas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5. Principales ecuaciones de correlación lineal simple desarrolladas entre el Índice de Compresión (C_c) y la Humedad Natural (w_o).

Fuentes: Koppula (1981) y otros.

Correlación	Autor	Fecha	Observación	Limitación
$C_c = 0.85(W_o\%)^3$	Helenclund	1951	Regresión cubica	Arcillas de Finlandia
$C_c = 0.1(W_o - 5)$	Azzous	1976	Regresión lineal	Cualquier arcilla
$C_c = 0.1W_o$	Koppula	1981	Regresión lineal	Arcillas de Chicago

2.6.1.3 Correlaciones lineales simples para el Índice de Compresión en función del Límite Líquido

Las correlaciones del Índice de Compresión en función del Límite Líquido son las más usadas y citadas por la literatura, las siguientes ecuaciones es común

encontrarlas en los lugares de consulta sobre la consolidación en suelo, pero no necesariamente son las que tengan una correlación más estrecha como se verá más adelante:

Tabla 6. Principales ecuaciones de correlación lineal simple desarrolladas entre el Índice de Compresión (C_c) y el Límite Líquido (LL).

Fuentes: Skempton (1944) y otros.

Correlación	Autor	Fecha	Observación	Limitación
$C_c = 0.007(LL-7)$	A. Skempton	1944	Regresión lineal	Arcillas alteradas
$C_c = 0.0046(LL-9)$	Cozzolino	1961	Regresión lineal	Arcillas de Brasil
$C_c = 0.009(LL-10)$	Terzaghi & Peck	1967	Regresión lineal	Arcillas normalmente consolidadas
$C_c = (LL-13)/109$	Mayne	1980		Cualquier arcilla

2.6.2 Correlaciones lineales de múltiples variables para el índice de compresión

Las correlaciones para hallar el Índice de Compresión en función de múltiples variables, se encuentra en el contexto de una investigación más reciente pero bajo el mismo principio; una regresión de manera lineal relacionando el Índice de Compresión con múltiples propiedades de las arcillas. En el artículo **Bayesian Probabilistic Approach for the Correlations of Compression Index for Marine Clays** (W. M. Yan, Ka-Veng Yuen & Gil Lim Yoon, 2009), los investigadores utilizan un enfoque probabilístico basado en el teorema de Bayes que en esencia nos permite, si conocemos la probabilidad de que ocurra un suceso, modificar su valor cuando disponemos de nueva información. La investigación se realizó para un conjunto de 795 registros, para muestras de arcillas marinas de varias zonas de Corea del sur, las muestras se clasificaron por su lugar de recolección como Este ♦, Sur ■, Oeste ▲. Como resultado de este artículo se concluyó que presentaba una estrecha correlación encontrando el Índice de Compresión en función de la Relación de Vacíos Inicial (e_o) y el Límite Líquido (LL), intuido inicialmente por la gráfica de dispersión presentada entre las dos variables.

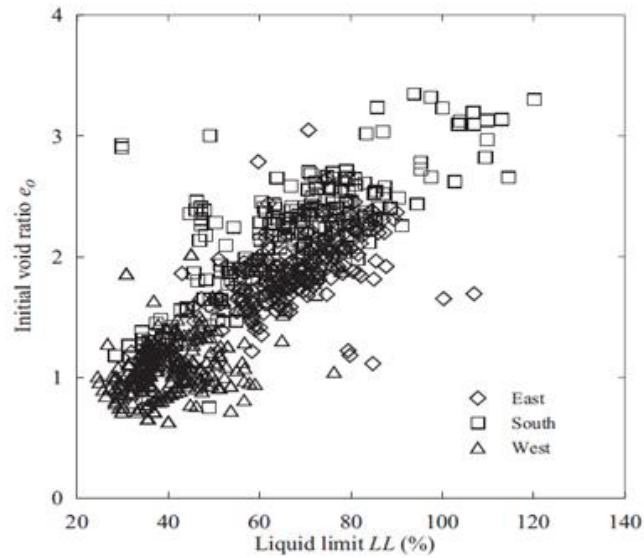


Ilustración 14. Gráfico de dispersión entre la Relación de Vacíos Inicial e_0 y el Límite Líquido LL de la muestra.

(Fuente: Bayesian Probabilistic Approach for the Correlations of Compression Index for Marine Clay, 2009).

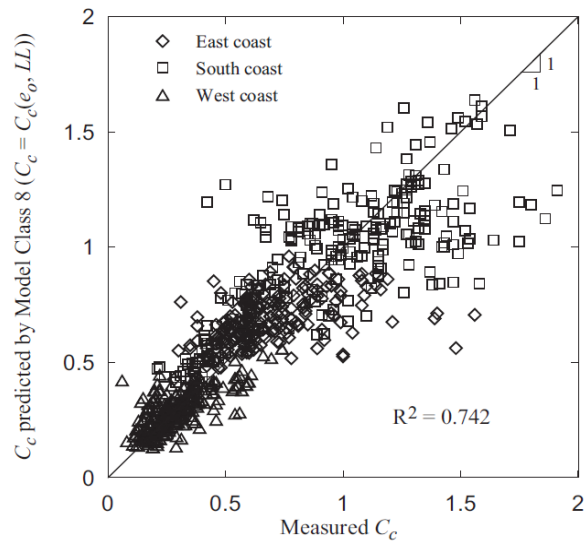


Ilustración 15. Gráfico de dispersión entre C_c (Lab) y $C_c f(e_0, LL)$.

(Fuente: Bayesian Probabilistic Approach for the Correlations of Compression Index for Marine Clay, 2009).

2.6.3 Correlaciones para el Índice de Compresión formuladas en Colombia

Durante las últimas décadas la mecánica de suelos en Colombia, ha tenido diversas investigaciones con el fin de poder caracterizar los suelos sobre los cuales se construye en el país. Esto ha llevado a que se desarrollen investigaciones sobre los parámetros del suelo que se consideren relevantes y aporten al crecimiento del estado del arte para la mecánica de suelos colombiana. Uno de los parámetros sobre los cuales se ha tenido especial interés es la consolidación de los suelos ya que son características con las cuales se puede inferir el comportamiento del suelo respecto a cargas verticales, con el fin de obtener magnitudes de los asentamientos e inferir problemas futuros con los cambios volumétricos. Durante las investigaciones de la última década se destacan las de los investigadores: Julio Moya (1987), Tarazona Castro y Gonzales (1974), Augusto Espinosa Silva y Aquiles Arrieta (1985), los cuales realizaron investigaciones sobre la compresibilidad del suelo y realizaron correlaciones para inferir el Índice de Compresión en arcillas de la capital de Colombia. Por otro lado y más recientemente se presentaron las investigaciones realizadas por: E. Hernández López y C. Castillo Restrepo (2012), para arcillas derivadas de los suelos volcánicos de la ciudad de Pereira, también Martínez Cepeda, C. A (2016), formulando ecuaciones de correlación a partir de arcillas del norte de la ciénaga de la ciudad de Cartagena y finalmente la investigación realizada por C. Bastidas y E. Gonzales (2016), quienes analizaron el comportamiento de las arcillas expansivas del norte de la ciudad de Cali y formularon múltiples ecuaciones de correlación para las propiedades del suelo.

De estas investigaciones se han obtenido las siguientes ecuaciones de correlación.

Tabla 7. Principales ecuaciones de correlación simple formuladas en el territorio nacional.

Fuente: E. Hernández López y C. Castillo Restrepo (2012) y otros.

Ecuación Propuesta	Aplicabilidad	Referencia	Año
$C_c=0.0136(LL-19)$	Arcillas de la Sabana de Bogotá	Julio Moya	1987
$C_c=0.018(W_o-19)$	Arcillas de la Sabana de Bogotá	Julio Moya	1987
$C_c=0.016(LL-29.8)$	Arcillas de Bogotá	Tarazona Castro y Gonzales	1974
$C_c=0.018(W_o-12.3)$	Arcillas de Bogotá	Tarazona Castro y Gonzales	1974

$C_c=0.689(e_o-0.2759)$	Arcillas de Bogotá	Tarazona Castro y Gonzales	1974
$C_c=0.007(LL+32.6)$	Arcillas pre consolidadas de Bogotá	Augusto Espinosa Silva y Aquiles Arrieta	1985
$C_c=0.007(LL+106)$	Arcillas normalmente consolidadas de Bogotá.	Augusto Espinosa Silva y Aquiles Arrieta	1985
$C_c=0.0148(LL-23.61)$	Suelo derivado de cenizas volcánicas de Pereira.	E. Hernández López y C. Castillo Restrepo	2012
$C_c=0.016(W_o-41.73)$	Suelo derivado de cenizas volcánicas de Pereira.	E. Hernández López y C. Castillo Restrepo	2012
$C_c=0.0087(LL-10.3)$	Arcillas del norte de Cartagena – Ciénaga de Tesca	Martínez Cepeda, C. A.	2016

Generalmente se han obtenido correlaciones basadas en ecuaciones fundamentadas en regresiones lineales simples, pero también se encuentran correlaciones fundamentadas en regresiones lineales de múltiples variables, en las cuales relacionan principalmente el contenido de agua con los límites de consistencia y en otros casos se presentan regresiones no lineales para explicar el comportamiento de la dispersión en las muestras.

En la investigación realizada por los ingenieros J. González, E. Castro y P. Tarazona a finales del año 1974, se formularon ecuaciones de correlación relacionando la Humedad Natural con el Límite Líquido e índice de plasticidad para arcillas de depósitos de Bogotá:

$$C_c = 0.006W_n + 0.0115LL - 0.466 \quad \text{Ecuación 24}$$

$$C_c = 0.0132W_n + 0.0073IP - 0.287 \quad \text{Ecuación 25}$$

La investigación con más cercanía es la realizada por C. Bastidas y E. Gonzales (2016), los cuales relacionaron con métodos de regresión no lineal el Índice de Compresión con el límite líquido y la Humedad Natural para arcillas de la zona

denominada 6a. Abanico de Menga y El Bosque, de la ciudad de Cali, Colombia, de características de muy alta plasticidad y alto potencial de expansión:

$$C_c = \frac{1}{8.4815(3.8272 - \ln W_n)} \quad \text{Ecuación 26}$$

$$C_c = \sqrt{260.104/LL - 2.5789} \quad \text{Ecuación 27}$$

La Humedad Natural de la muestra y el Límite Líquido, deben estar expresados en porcentaje. Sin embargo se continuaron obteniendo mejores resultados usando una única variable dependiente para hallar el Índice de Compresión, demostrando en su investigación que el uso de múltiples variables para la predicción de este parámetro ocasionaba una mayor variabilidad con respecto a los ensayos de laboratorio.

3. METODOLOGÍA

3.1 EXPLORACIÓN Y TOMA DE MUESTRAS

Para la localización de la extracción de muestras en la presente investigación, se tuvo en cuenta parámetros del suelo y su posible comportamiento, como también que el sector tuviera un creciente desarrollo constructivo en la ciudad de Cali. Durante el desarrollo investigativo y teórico del proyecto, se pensó en la necesidad de caracterizar y aportar al estado del arte de las arcillas de alta plasticidad de la ciudad, suelos que comúnmente por su característica de media a alta plasticidad tienen una elevada compresibilidad.

Recogiendo las características anteriormente mencionadas, la investigación se apoyó en el informe 4 – Investigaciones y Zonificación Geotécnica de la Ciudad de Santiago De Cali correspondiente al Estudio De Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali. (Ingeominas, 2005). Se definió la extracción de las muestras en la denominada zona 6a. Abanico de Menga y El Bosque, el cual está representado generalmente por materiales provenientes de rocas sedimentarias como son suelos arcillosos y limosos, principalmente por suelos CH y MH superficialmente con una Humedad Natural que se encuentra entre el 15 y 55%, con un valor representativo del 35%. El Límite Líquido presenta valores entre 40 y >100% con un valor representativo del 65%. El Límite Plástico presenta valores entre 20 y 50% con valores repetitivos alrededor del 35% y el índice de plasticidad presenta una distribución de entre 10 y 70% con una media del 35%. (Ingeominas, 2005). La zona 6a. se encuentra localizada entre los barrios: La Flora, La Campiña, Vipasa, Menga, El Bosque y Chipichape.

Una vez definida la zona se busca la disponibilidad para el muestreo, la cual se presenta durante la construcción de los sótanos del edificio residencial llamado Oasis de La Flora, ubicado en la calle 63 Norte entre avenida 3C y avenida 3E Norte. Se extrajo muestra parcialmente inalterada representada en 7 tubos Shelby a una profundidad de extracción de entre 2.5 y 3 metros y muestra alterada a la misma profundidad de extracción, en la zona se detecta presencia del nivel freático después de los 4.6 metros de profundidad.



Ilustración 16. Ubicación geográfica de la zona de extracción de las muestras.

Fuente: Google Maps. 2017.

Una vez extraídas las muestras se procedió a sellar con parafina los accesos del tubo de pared delgada Shelby y forrar en papel celofán para conservar la Humedad Natural, para luego marcar con la profundidad de la extracción y el consecutivo correspondiente a la localización de la extracción dentro de la zona de la construcción. Finalmente las muestras fueron transportadas al laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad del Valle.



Ilustración 17. Muestras inalteradas con prevención de pérdida de humedad.

3.2 METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS

3.2.1 Determinación de la humedad

Se determina la Humedad Natural del suelo o contenido de agua del suelo para la muestra protegida contra la alteración de la humedad en campo con base en la norma NTC 1945. Este ensayo consiste en realizar la medición del peso del suelo una vez retirado de los tubos de pared delgada para obtener el peso del suelo húmedo y dejar secar en el horno a $110^{\circ} \pm 5^{\circ}$ hasta alcanzar su masa constante, lo cual generalmente sucede entre 8 y 12 horas y se calcula con la siguiente formula:

$$w_o = \frac{P_w}{P_s} * 100 \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

w_o = Humedad Natural, %.

P_w = Masa del recipiente con el espécimen húmedo, g.

P_s = Masa del recipiente con el espécimen seco, g.

3.2.2 Determinación de la gravedad específica – Método del Picnómetro

Conocer la gravedad específica de las muestras a trabajar es de vital importancia ya que participa en el cálculo de la relación de vacíos y también en el análisis de hidrometría de la muestra. El método para conocer la gravedad específica por picnómetro se encuentra enmarcado dentro de la norma INV E-128-13. El ensayo se utiliza para muestras que pasen el tamiz No. 4, finalmente para la determinación de la gravedad específica G_s del suelo, se tomó suelo previamente secado al horno, se tamizó a través de la malla No.40 y se tomaron 50 gramos de material para cada ensayo. Después, se introdujo en un matraz de 250ml el cual se llenó con agua hasta la marca de calibración. Seguido a esto, al matraz con agua y suelo se le succionó el aire atrapado en la solución con el uso de una bomba de vacío, luego se pesó y se tomó su temperatura. El suelo húmedo se trasladó a otro recipiente previamente pesado y se llevó al horno a 105°C durante 24 horas, para determinar el peso de los sólidos.



Ilustración 18. Picnómetro durante ensayo para determinar la gravedad específica en la fase de extracción de aire de la muestra en la bomba de vacío.

Finalmente la gravedad específica del suelo se calcula de la siguiente manera:

$$G_s = \frac{K * W_s}{W_s + W_a - W_b}$$

Donde:

K = Factor de corrección por temperatura.

W_s = Peso de los sólidos.

W_a = Peso del matraz más agua a temperatura del ensayo.

W_b = Peso del matraz más agua más sólidos a temperatura del ensayo.

G_s = Gravedad específica de los sólidos del suelo.

3.2.3 Curva granulométrica mediante USCS

Para este ensayo se partió de la base de analizar las fracciones finas de la muestra, para lo cual se usa la definición de curva granulométrica por hidrómetro basado en la norma INV E – 124 – 13, para partículas de suelo que pasen el tamiz No. 200. El

procedimiento se realizó dejando 50 gramos de suelo con partículas menores a $75\mu\text{m}$ en una solución dispersante durante 24 horas, basado en la ley de Stokes (1850), la cual definió la velocidad de sedimentación de las partículas sólidas en un líquido en función de su tamaño, forma y peso. Una vez pasadas las 24 horas se dispersa con un agitador y se transfiere la muestra a un cilindro de sedimentación, se toma la temperatura y las lecturas con un hidrómetro a diferentes tiempos, hasta que la lectura se estabilice.

3.2.4 Límites de Atterberg y Carta de Plasticidad

Los límites de Atterberg o límites de consistencia son los contenidos de agua para los cuales, el suelo cambia de un estado físico a otro. Para determinarlos se siguen las normas INV E - 125 e INV E - 126. El suelo del ensayo debe estar seco al aire y tamizado por la malla No.40.

Para determinarlo se toman una muestra de suelo ya pasada por el tamiz No. 40 con un peso de alrededor de 100 gramos, a los cuales se les agrega 20ml de agua preferiblemente destilada. El suelo se mezcla con el agua hasta formar una pasta, la cual se esparce y se nivela sobre una cazuela de bronce en el dispositivo de Casagrande y se abre una ranura con un ranurador normalizado y finalmente se deja caer hasta el cierre de la ranura entre 15 y 30 golpes. Se repite este proceso al menos tres veces anotando el número de golpes y el peso húmedo de la muestra dentro de un recipiente. Finalmente se toma el peso seco de la muestras secadas al horno y se dibuja una gráfica de No. de golpes vs humedad. El Límite Líquido será la humedad para la cual el número de golpes de cierre corresponda a 25.



Ilustración 19. Muestra de suelo pasada por el tamiz No.40 (Izq). Muestra de suelo después del ensayo para Límite Líquido (Der).

Una vez realizado el ensayo para determinar el Límite Líquido se procede a realizar el ensayo para encontrar el Límite Plástico de la muestra. Se toman alrededor de 20 gramos de muestra y se incorpora agua hasta que sea posible formar una esfera con esta pasta de suelo, a una humedad la cual esta esfera no deje residuos de muestra en la mano. Una vez logrado se toman 8 gramos aproximadamente y se moldea un rollo con la palma de las manos, este rollo debe ir reduciendo su humedad y el contenido de agua en el cual el rollo de suelo alcanza un diámetro de 3mm el cual se empieza a agrietar sin desmoronarse, se le conoce como Límite Plástico.



Ilustración 20. Muestra del suelo después del ensayo de Límite Plástico.

Finalmente se halla el índice de plasticidad, el cual es la diferencia entre el Límite Líquido y el Límite Plástico como se muestra en la Ecuación 7. Una vez obtenidos los valores del Límite Líquido y Límite Plástico se procede según el método de clasificación USCS a llevar los valores a la Carta de Plasticidad de Casagrande, en la cual se trazan una serie de conjuntos separados por líneas. Una línea (Línea A),

la cual separa las arcillas (C) de los limos (M) y una línea trazada en el 50% del Límite Líquido la cual separa los suelos en su característica de alta (H) o baja plasticidad (L).

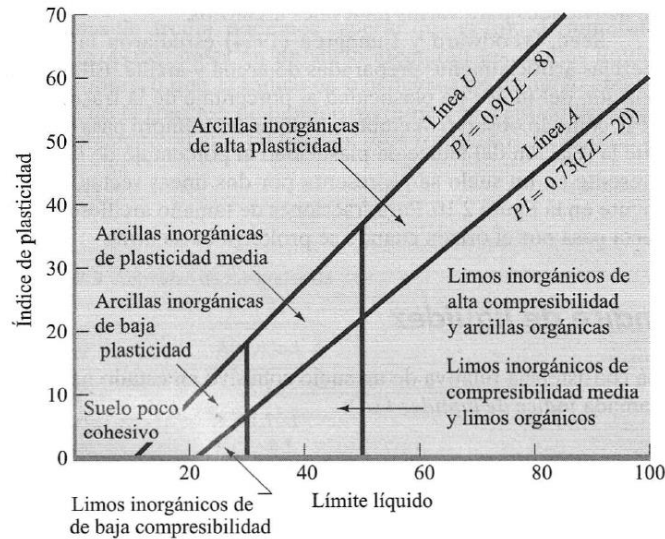


Ilustración 21. Carta de Plasticidad de Casa Grande

Fuente: (Das, Braja. Fundamentos de ingeniería geotécnica. México, D.F.: Thomson Learning, 2001. p. 34.)

3.2.5 Presión de expansión en consolidómetro

Este ensayo se realiza en el consolidómetro según la norma INV E – 132 – 07. Se prepara una muestra inalterada a la cual se realizará prueba de consolidación unidimensional con cuidado de no perder humedad en el tratado de la muestra y de los recortes de la preparación, se tomarán muestras para la gravedad específica, humedad de la muestra y límites de Atterberg según los lineamientos anteriormente mencionados. Una vez colocada la muestra en el consolidómetro, se le aplica una sobrecarga igual a la que se encuentra sometida en terreno con relación a su profundidad y se deja hasta que el cambio volumétrico no presente variación con respecto a la altura, es decir se encuentra totalmente consolidada la muestra. Se debe tener mucho cuidado en esta fase del ensayo procurando que no se altere la humedad en la muestra recubriendo el consolidómetro con algodón húmedo. Una vez consolidado el suelo se procede a tomar la lectura de deformación e inundar el anillo con agua y nuevamente se deja equilibrar.

Una vez se tenga la muestra en equilibrio después de ser inundada se procede a descargar hasta una presión cercana a 0 para procesamiento gráfico y a partir de este último punto, se prosigue con un ensayo normal de consolidación unidimensional como lo veremos a continuación.

3.2.6 Consolidación unidimensional del suelo

El ensayo de consolidación unidimensional de los suelos nos permite observar el comportamiento del cambio volumétrico del suelo sometido a cargas verticales y permite hallar parámetros importantes como el índice de expansión, la carga de preconsolidación y el Índice de Compresión entre otros. Este último de vital importancia en la investigación, porque es el parámetro al cual se le quiere predecir el comportamiento con base en los valores que presenten las propiedades índices del suelo a analizar. La consolidación unidimensional se realiza con los parámetros dados por la norma INV E – 151 – 13 y se comienza con el ensayo en el último punto del ensayo de presión de expansión mencionado anteriormente. A la muestra confinada en el anillo de consolidación, se le empiezan aplicar incrementos de esfuerzos y debido a esto comienza a suceder una reducción en la relación de vacíos, traducida en reducción del tamaño de la muestra. Para las muestras de la presente investigación fueron aplicadas cargas de 1,2,4,6,8 y 16 kilogramos respectivamente, tomando como punto de consolidación total de la muestra las 24 horas. Para cada escalón de carga se tomaron los datos de deformación y tiempo.

Una vez alcanzado el punto de consolidación para la carga de 16 kilogramos, se sometió la muestra a descarga con el fin de hallar la rama de descarga de la curva de compresibilidad y el índice de hinchamiento. Para la investigación se permitió la descarga de la prueba de la misma manera en la que fue cargada, empezando con los 16 kilogramos de la rama de carga y disminuyendo diariamente en razón de 8, 6, 4, 2, 1, 0.5 kilogramos respectivamente, tomando los datos de recuperación de la muestra en deformación. Finalmente se procede a dibujar el ensayo de expansión en consolidómetro y consolidación unidimensional, en la misma gráfica de presión efectiva--- vs relación de vacíos en escala semilogarítmica.



Ilustración 22. Consolidómetros durante pruebas de expansión (Izq) y consolidación (Der).



Ilustración 23. Anillo con muestra después de prueba de consolidación unidimensional.

4. EXPLORACIÓN Y ENSAYOS DE LABORATORIO

4.1 RECOLECCIÓN E IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS

Para el desarrollo de los ensayos de laboratorio se tomaron 8 muestras inalteradas y se usaron 5 más de la investigación “COMPORTAMIENTO DE LAS ARCILLAS DE UN SECTOR DEL NORTE DE CALI EN LA PRUEBA DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL, C. Bastidas y E. Gonzales” en la cual se obtuvieron muestras de clasificación SUCS similares y localizadas en la misma zona geográfica de la ciudad, el resumen de las exploraciones se presenta a continuación:

Tabla 8. Identificación de las muestras recolectadas.

IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS					
Perforación	Muestra	Sitio de muestreo	Profundidad	Tipo de muestra	
				Inalterada	
SHELBY #1	1	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	2.50 - 3.00 m	x	
SHELBY #2	2	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	2.50 - 3.00 m	x	
	3	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	2.50 - 3.00 m	x	
SHELBY #3	4	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	2.50 - 3.00 m	x	
SHELBY #4	5	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	2.50 - 3.00 m	x	
SHELBY #5	6	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	2.50 - 3.00 m	x	
SHELBY #6	7	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	2.50 - 3.00 m	x	
SHELBY #7	8	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	2.00 - 2.50 m	x	
Muestras investigación sobre comportamiento de las arcillas norte de Cali					
P1	P1M1	Parque Av 4N entre calles 58 y 62	1.50-2.00 m	x	
	P1M2	Parque Av 4N entre calles 58 y 62	3.00-3.50 m	x	
	P1M3	Parque Av 4N entre calles 58 y 62	4.50-5.00 m	x	
P3	P3M1	Avenida 3an no. 56n-46	1.10-1.60 m	x	
	P3M2	Avenida 3an no. 56n-46	2.00-2.60 m	x	
		Número total muestras		13	

A las muestras se le realizaron los ensayos de laboratorio necesarios para el desarrollo de la investigación como: Humedad Natural, gravedad específica, límites de Atterberg, presión de expansión, consolidación y granulometría por hidrómetro, el resumen de ensayos se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 9. Resumen de ensayos de laboratorio realizados a las muestras.

ENSAYOS REALIZADOS						
Perforación	Muestra	Humedad	Gravedad específica	Hidrometría	Límites de Atterberg	Consolidación y expansión
SHELBY #1	1	x	x		x	x
SHELBY #2	2	x	x		x	x
	3	x	x	x	x	x
SHELBY #3	4	x	x		x	x
SHELBY #4	5	x	x		x	x
SHELBY #5	6	x	x		x	x
SHELBY #6	7	x	x		x	x
SHELBY #7	8	x	x		x	x
Muestras investigación sobre comportamiento de las arcillas norte de Cali						
P1	P1M1	x	x	x	x	x
	P1M2	x	x	x	x	x
	P1M3	x	x	x	x	x
P3	P3M1	x	x	x	x	x
	P3M2	x	x	x	x	x

4.2 PROPIEDADES ÍNDICES Y CLASIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS

4.2.1 Humedad Natural (w_o)

Por ser uno de los valores a relacionar con el Índice de Compresión y además necesario para la clasificación y caracterización de las muestras fueron obtenidas las humedades naturales (w_o) para todas las muestras. Se realizaron los ensayos para calcular el contenido de agua según la norma NTC 1945, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 10. Contenido de Humedad Natural de las muestras de laboratorio (w_o).

Perforación	Muestra	Sitio de muestreo	Humedad Natural (%)
SHELBY #1	1	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	37.61
SHELBY #2	2	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	35.73
	3	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	36.56
SHELBY #3	4	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	26.39
SHELBY #4	5	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	26.02
SHELBY #5	6	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	35.76
SHELBY #6	7	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	33.06
SHELBY #7	8	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	30.00
Muestras investigación sobre comportamiento de las arcillas norte de Cali			
P1	P1M1	Parque Av 4N entre calles 58 y 62	25.20
	P1M2	Parque Av 4N entre calles 58 y 62	31.74
	P1M3	Parque Av 4N entre calles 58 y 62	34.16
P3	P3M1	Avenida 3an no. 56n-46	31.52
	P3M2	Avenida 3an no. 56n-46	32.73

Se obtuvieron datos de la Humedad Natural de las muestras entre 25% y 38% con una humedad promedio de 32.08%, una desviación estándar de la muestra de 4.142 y un coeficiente de variación del 12.91%. Se obtuvieron datos coherentes con la Humedad Natural para la zona de análisis registrada, en el ESTUDIO DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTIAGO DE CALI, en el cual se estimó un valor representativo del 35%.

4.2.2 Gravedad específica

Para las muestras inalteradas se obtuvieron valores de Gravedad Especifica (G_s) los cuales se listan a continuación:

Tabla 11. Valores de gravedad especifica de las muestras de laboratorio.

Perforación	Muestra	Sitio de muestreo	Gravedad Especifica (G_s)
SHELBY #1	1	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	2.79

SHELBY #2	2	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	2.78
	3	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	2.78
SHELBY #3	4	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	2.70
SHELBY #4	5	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	2.56
SHELBY #5	6	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	2.56
SHELBY #6	7	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	2.67
SHELBY #7	8	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	2.68
Muestras investigación sobre comportamiento de las arcillas norte de Cali			
P1	P1M1	Parque Av 4N entre calles 58 y 62	2.61
	P1M2	Parque Av 4N entre calles 58 y 62	2.65
	P1M3	Parque Av 4N entre calles 58 y 62	2.69
P3	P3M1	Avenida 3an no. 56n-46	2.73
	P3M2	Avenida 3an no. 56n-46	2.72

Se encuentran datos de Gravedad Específica (G_s) con valores entre 2.56 y 2.79 con una desviación estándar de 0.0768, un valor promedio de 2.68 y un coeficiente de variación del 2.86% y concuerda con los valores típicos 2.6 a 2.9 listados por DAS. Braja y otros autores.

4.2.3 Relación de Vacíos Inicial (e_o), peso unitario total y grado de saturación

La Relación de Vacíos Inicial (e_o) es la propiedad física con la cual se espera relacionar primero el índice de compresión, una vez obtenido los parámetros de peso y volumen de los especímenes recuperados se halló las magnitudes para la Relación de Vacíos Inicial para cada una de las muestras extraídas. Los valores de Relación de Vacíos Inicial (e_o), peso unitario total y grado de saturación son relaciones volumétricas y se calculan de acuerdo con la Ecuación 4 y Ecuación 5 respectivamente.

Tabla 12. Valores de Relación de Vacíos Inicial (e_o), peso unitario total y grado de saturación de las muestras de suelo.

Perforación	Muestra	Relación de Vacíos Inicial (e_o)	Peso unitario total (gr/cm ³)	Grado de saturación (%)
SHELBY #1	1	1.2027	1.74	87.18
SHELBY #2	2	1.1201	1.78	88.68
	3	1.2270	1.70	82.83
SHELBY #3	4	0.8200	1.78	82.37
SHELBY #4	5	0.7832	1.87	98.30
SHELBY #5	6	1.0893	1.66	84.05
SHELBY #6	7	1.0739	1.72	83.68
SHELBY #7	8	0.8668	1.87	92.97
Muestras investigación sobre comportamiento de las arcillas norte de Cali				
P1	P1M1	0.7369	1.98	89.90
	P1M2	0.9258	1.88	90.88
	P1M3	0.9653	1.86	95.23
P3	P3M1	1.0227	1.89	83.71
	P3M2	0.9238	1.89	96.38

Se obtuvieron valores de Relación de Vacíos Inicial (e_o) entre 0.73 y 1.22 con un valor promedio de 0.98 y un coeficiente de variación de las muestras de 15.99%, valores característicos para suelos arcillosos los cuales se encuentran entre 0.9 y 1.4 (Das. Braja, 2001).

Los valores del grado de saturación de la muestra se encuentran entre 82.3% y 98.3%, con un valor promedio de 88.93% y un coeficiente de variación entre los datos del 6.2%. Se obtuvieron los valores típicos de saturación para las arcillas, ya que estas se conservan parcialmente saturadas en estado inalterado.

4.2.4 Granulometría por hidrómetro

Debido a que más del 50% del material sólido de las muestras analizadas pasaba por el tamiz No. 200, se consideró realizar análisis granulométrico por hidrometría para una muestra y ser tomada como referencia para la granulometría de las otras muestras. El análisis granulométrico de las muestras que pasan el tamiz No. 200 se presenta a continuación:

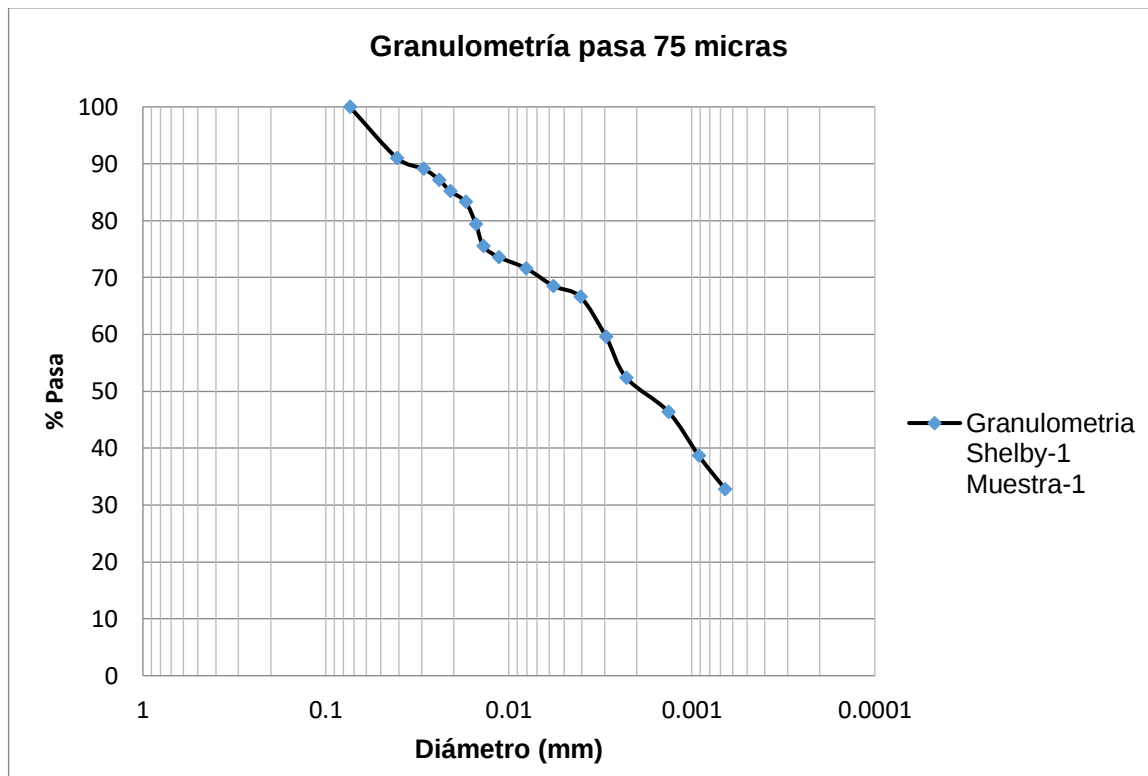


Ilustración 24. Gráfico de granulometría por hidrómetro SHELBY #1 MUESTRA 1.

4.2.5 Límite Líquido, Límite Plástico y Carta de Plasticidad

Los ensayos para límites de consistencia y Carta de Plasticidad relacionan los datos de la consistencia del suelo y permiten la clasificación con la Carta de Plasticidad a partir del sistema SUCS. Es fundamental encontrar el valor del Límite Líquido (LL) ya que es uno de los parámetros con los cuales se ha relacionado más comúnmente el índice de compresión. Los resultados de los ensayos de límites de consistencia y la representación de las muestras en la Carta de Plasticidad se presentan a continuación:

Tabla 13. Valores del Límite Líquido (LL), Límite Plástico (LP) e Índice de Plasticidad (IP) de las muestras de laboratorio.

Perforación	Muestra	Límite Líquido (LL) (%)	Límite Plástico (LP) (%)	Índice de Plasticidad (IP) (%)
SHELBY #1	1	67.80	31.95	35.85

SHELBY #2	2	62.00	27.31	34.69
	3	60.60	26.48	34.12
SHELBY #3	4	60.00	23.96	36.04
SHELBY #4	5	58.70	22.60	36.10
SHELBY #5	6	64.00	23.26	40.74
SHELBY #6	7	68.00	27.17	40.83
SHELBY #7	8	66.50	32.13	34.37
Muestras investigación sobre comportamiento de las arcillas norte de Cali				
P1	P1M1	79.10	25.61	53.49
	P1M2	98.10	31.24	66.86
	P1M3	109.00	36.55	72.54
P3	P3M1	78.00	30.94	47.06
	P3M2	80.80	34.57	46.23

Se obtienen los valores de Límite Líquido entre 58.7% y 109% y un valor probable del 64%, una desviación estándar de 15.46 y un coeficiente de variación del 21.11%, se presenta un valor atípico en términos estadísticos según el grafico de caja y bigotes para el valor de 109% de la muestra P1M3, situación de la cual se describe en el ANEXO D. Para el Límite Líquido se encuentra muy similar al valor propuesto en el estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali. 2005, en el cual se presenta un valor representativo del 65% para la zona. Para el Límite Plástico se presentaron valores entre 22.6% y 32.5% con un valor promedio de 28.75%, una desviación estándar de 4.45 y un coeficiente de variación del 15.45%. Finalmente para el Índice de Plasticidad se obtuvieron valores entre 34.12% y 72.45% con un valor probable de 35%, una desviación estándar de 15.65 y una variación promedio del 28.42%. Ambos valores consecuentes con el estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali. 2005, donde se presentan valores representativos del 35% para el Límite Plástico y el Índice de Plasticidad.

Una vez obtenidos los valores de Índice de plasticidad (IP) y Límite Líquido se pueden representar gráficamente en la Carta de Plasticidad y así ser clasificados según el sistema SUCS. La Carta de Plasticidad con los resultados de las muestras, se presentan a continuación:

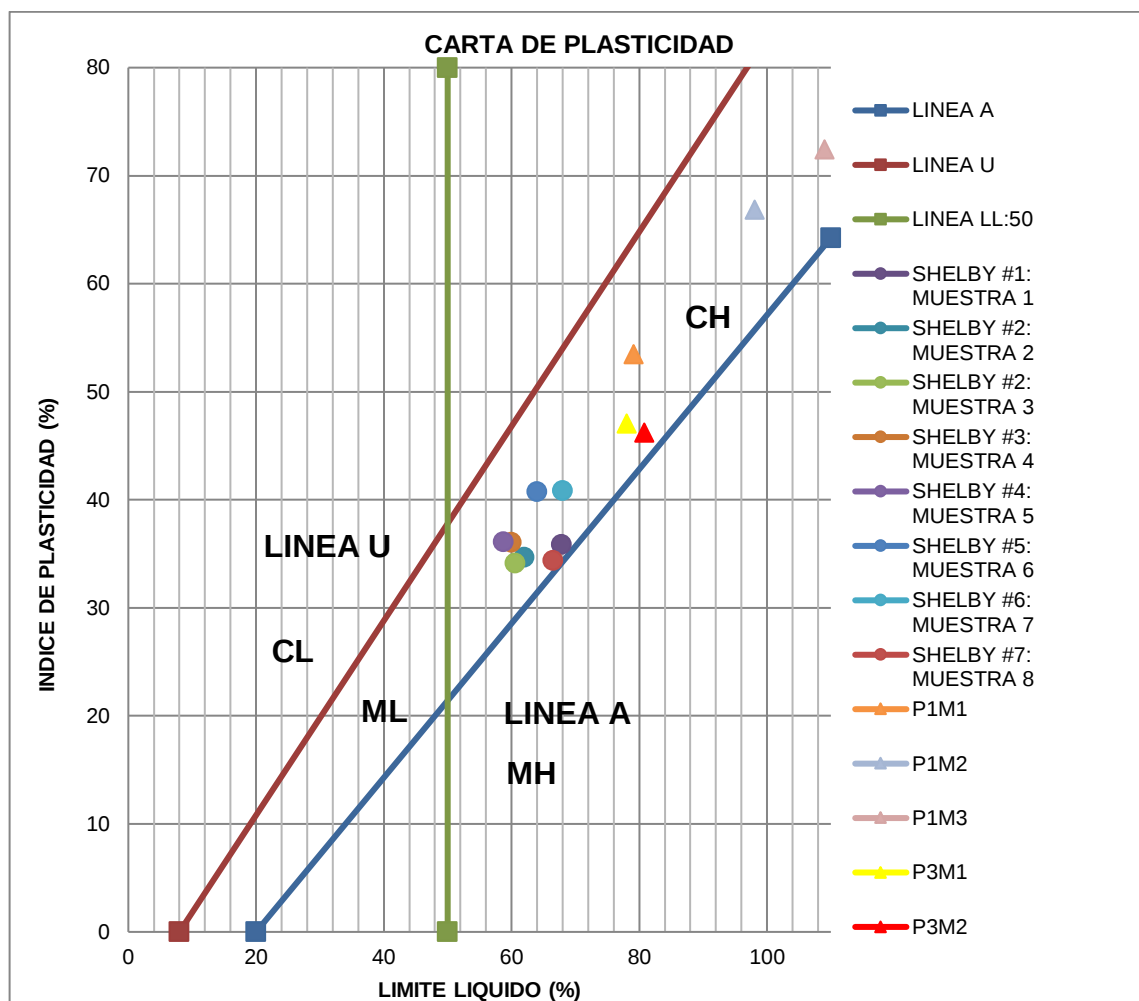


Ilustración 25. Carta de Plasticidad de Casa Grande y ubicación de las muestras.

La clasificación de las muestras según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos se realizó mediante la norma INV E – 181 – 13, las muestras presentan características de material cohesivo de media a alta plasticidad y únicamente materiales de tipo CH, como se puede ver en la ilustración 25 y se presenta en la tabla a continuación:

Tabla 14. Clasificación de las muestras según el sistema SUCS

Perforación	Muestra	Sitio de muestreo	Clasificación (SUCS)
SHELBY #1	1	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	CH
SHELBY #2	2	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	CH

	3	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	CH
SHELBY #3	4	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	CH
SHELBY #4	5	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	CH
SHELBY #5	6	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	CH
SHELBY #6	7	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	CH
SHELBY #7	8	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	CH
Muestras investigación sobre comportamiento de las arcillas norte de Cali			
P1	P1M1	Parque Av 4N entre calles 58 y 62	CH
	P1M2	Parque Av 4N entre calles 58 y 62	CH
	P1M3	Parque Av 4N entre calles 58 y 62	CH
P3	P3M1	Avenida 3an no. 56n-46	CH
	P3M2	Avenida 3an no. 56n-46	CH

Se presenta que todas las muestras son clasificación CH, arcillas de alta plasticidad lo cual es algo representativo de la zona de muestreo, en las cuales se presentan materiales de tipo CH y MH hasta los primeros 16 metros de profundidad (Ingeominas, 2005).

4.3 ENSAYOS DE CONSOLIDACIÓN Y EXPANSIÓN

Por medio de los ensayos de consolidación, es posible obtener los valores del principal parámetro de la investigación como es el Índice de Compresión (C_c), pero antes de someter la muestra a la prueba de consolidación unidimensional, esta es sometida a una prueba de expansión en el consolidómetro con el fin de hallar el valor de la presión de expansión e intentar que la capacidad de expansión que pueda tener la muestra al saturar completamente, pueda incidir de manera negativa los resultados del ensayo de consolidación. Los resultados de las pruebas de expansión en consolidómetro se muestran a continuación:

4.3.1 Ensayo de expansión en consolidómetro

Para realizar el ensayo de presión de expansión en el consolidómetro, se debe llevar la muestra a su carga geostática en el terreno. Después de inundar y permitir el hinchamiento de la muestra, los resultados del ensayo se muestran en la siguiente tabla

Tabla 15. Presión sin cambio de expansión para ensayo de expansión en laboratorio de las muestras.

Perforación	Muestra	Sitio de muestreo	Presión sin cambio de expansión (kg/cm ²)
SHELBY #1	1	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	7.00
SHELBY #2	2	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	6.00
	3	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	15.00
SHELBY #3	4	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	1.00
SHELBY #4	5	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	2.00
SHELBY #5	6	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	1.00
SHELBY #6	7	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	1.00
SHELBY #7	8	Av 3C Norte entre avenidas 70N y 63C	1.00
Muestras investigación sobre comportamiento de las arcillas norte de Cali			
P1	P1M1	Parque Av 4N entre calles 58 y 62	10.00
	P1M2	Parque Av 4N entre calles 58 y 62	12.00
	P1M3	Parque Av 4N entre calles 58 y 62	5.00
P3	P3M1	Avenida 3an no. 56n-46	10.20
	P3M2	Avenida 3an no. 56n-46	11.00

Se obtuvieron valores de presión de expansión entre 1 y 15 kg/cm² con un valor usual de 1 kg/cm² y los valores más bajos para esta propiedad, se obtuvieron como resultado de los ensayos de las muestras propias. Además de usar el ensayo para obtener la presión de expansión, se prepara la muestra permitiéndole una expansión por aumento en la relación de vacíos antes de empezar el ensayo de consolidación.

4.3.2 Ensayo de consolidación unidimensional

Se realizaron los ensayos de consolidación una vez terminado el último punto de la prueba de expansión, se realizó el ensayo con rama de carga y descarga con escalones de carga de 1 Kg, 2 Kg, 4 Kg, 6 Kg, 8 Kg y 16 Kg sucesivamente y escalones de descarga de 16 Kg, 8 Kg, 6 Kg, 4 Kg, 2 Kg, 1 Kg de la misma manera. Una vez obtenidas las gráficas de consolidación, se elaboran las gráficas de compresibilidad para obtener los valores para el índice de expansión C_s , carga de preconsolidación y el Índice de Compresión C_c . Finalmente se realiza la corrección de Schmertmann y se halla el valor del Índice de Compresión corregido o de campo,

las curvas de compresibilidad de laboratorio se encuentran dentro del ANEXO B y curvas de compresibilidad corregidas por el método de Schmertmann se encuentran en las siguientes gráficas.

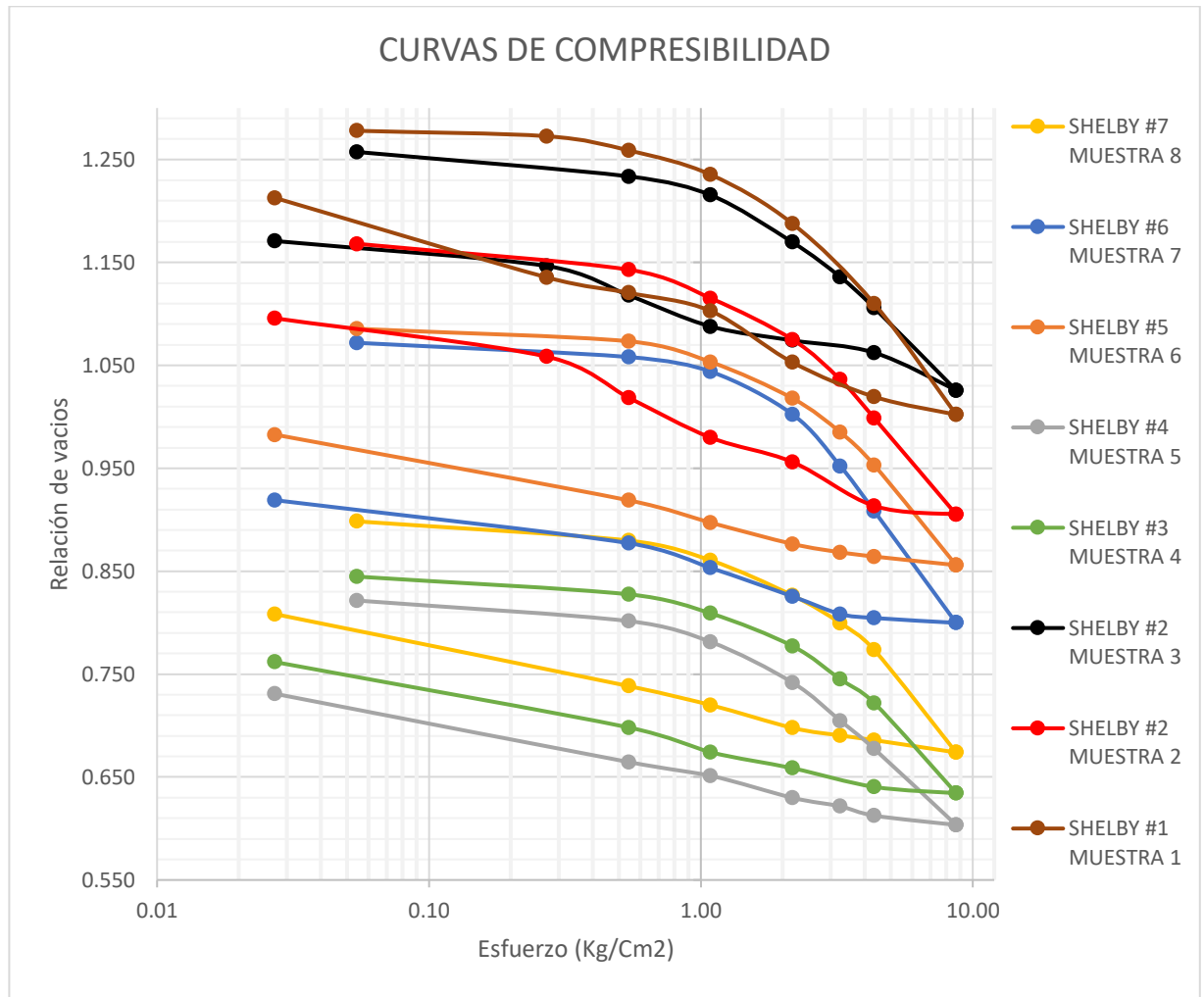


Ilustración 26. Curvas de compresibilidad corregida para las muestras de laboratorio

Una vez realizadas las curvas de compresibilidad se procede a encontrar los valores de índice de expansión, presión de preconsolidación y realizar la corrección de Schmertmann para encontrar el Índice de Compresión de campo. Dichos datos se muestran a continuación:

4.3.2.1 Índice de hinchamiento (C_s) y esfuerzo de preconsolidación (σ'_p)

El índice de hinchamiento (C_s) se obtiene gráficamente como pendiente de la rama de descarga de la curva de compresibilidad, del ensayo de consolidación unidimensional. Por otra parte la presión de preconsolidación la cual en teoría coincide con el esfuerzo crítico, se halla gráficamente como se describe y muestra en la Ilustración 5. Los valores de los índices de expansión y presión de preconsolidación se muestran en la tabla a continuación:

Tabla 16. Valores de índice de índice de expansión (C_s), esfuerzo de preconsolidación e índice de sobreconsolidación de las muestras de laboratorio.

Perforación	Muestra	Índice de expansión (C_s)	Esfuerzo de preconsolidación (Kg/cm^2)	OCR	Clasificación
SHELBY #1	1	0.1121	2.205	4.24	Sobreconsolidado
SHELBY #2	2	0.1164	1.850	3.56	Sobreconsolidado
	3	0.0507	1.828	3.52	Sobreconsolidado
SHELBY #3	4	0.0798	2.700	5.19	Sobreconsolidado
SHELBY #4	5	0.0710	1.750	3.37	Sobreconsolidado
SHELBY #5	6	0.0684	2.589	4.98	Sobreconsolidado
SHELBY #6	7	0.0918	2.122	4.08	Sobreconsolidado
SHELBY #7	8	0.0396	2.619	6.09	Sobreconsolidado
Muestras investigación sobre comportamiento de las arcillas norte de Cali					
P1	P1M1	0.1010	1.487	4.50	Sobreconsolidado
	P1M2	0.1410	1.318	2.10	Sobreconsolidado
	P1M3	0.1936	1.287	1.40	Sobreconsolidado
P3	P3M1	0.1405	1.328	4.40	Sobreconsolidado
	P3M2	0.0978	1.603	4.00	Sobreconsolidado

Se presentan valores para el índice de expansión entre 0.039 y 0.193 con un valor promedio de 0.1 y un coeficiente de variación del 41.5%, los esfuerzos de preconsolidación se presentan valores entre 1.28 Kg/cm^2 y 2.70 Kg/cm^2 con un valor promedio de 1.90 Kg/cm^2 y un coeficiente de variación del 26.7%. Finalmente se obtienen valores de OCR superiores a 1, por lo que se trata de muestras que presentan un alto grado de sobreconsolidación.

4.3.2.2 Índice de Compresión (C_c)

Para el resto de la investigación se llamará Índice de Compresión (C_c) al Índice de Compresión de campo el cual se estima como la magnitud del Índice de Compresión real de la muestra antes de ser alterada por muestreo y ensayos. Por otro lado se llamará Índice de Compresión de laboratorio (C_{clab}) a la magnitud del Índice de Compresión hallada con base en las curvas de compresibilidad antes de ser corregidas por el método de Schmertmann. Los valores de C_c y C_{clab} obtenidos para las muestras se presentan a continuación:

Tabla 17. Valores del Índice de Compresión (C_c) para las muestras de laboratorio.

Perforación	Muestra	Índice de Compresión laboratorio (C_c Lab)	Índice de Compresión campo (C_c)
SHELBY #1	1	0.3581	0.3603
SHELBY #2	2	0.3108	0.3074
	3	0.2660	0.2824
SHELBY #3	4	0.2910	0.2989
SHELBY #4	5	0.2456	0.2573
SHELBY #5	6	0.3228	0.3318
SHELBY #6	7	0.3610	0.3686
SHELBY #7	8	0.3307	0.3260
Muestras investigación sobre comportamiento de las arcillas norte de Cali			
P1	P1M1	0.2143	0.2082
	P1M2	0.3185	0.3177
	P1M3	0.3857	0.4670
P3	P3M1	0.2833	0.2605
	P3M2	0.2706	0.2601

Para el Índice de Compresión de campo C_c se presentan valores entre 0.20 y 0.46 con un valor promedio del 0.311 y una variación muestral del 20%, se presentan datos los cuales muestran un suelo arcilloso de compresibilidad media a alta y susceptible a cambios volumétricos en presencia de cargas.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 IDENTIFICACIÓN DE DATOS ATÍPICOS

Para la investigación se realizó un análisis del Índice de Compresión de campo (C_c) considerándolo como la variable dependiente, por ser el parámetro que se calculará determinado a partir de las propiedades índices. Como un pre análisis se determinarán si hay datos los cuales representen valores atípicos para la población analizada, esto se facilitará con un gráfico de caja y bigotes (Boxplot), como se presenta a continuación:

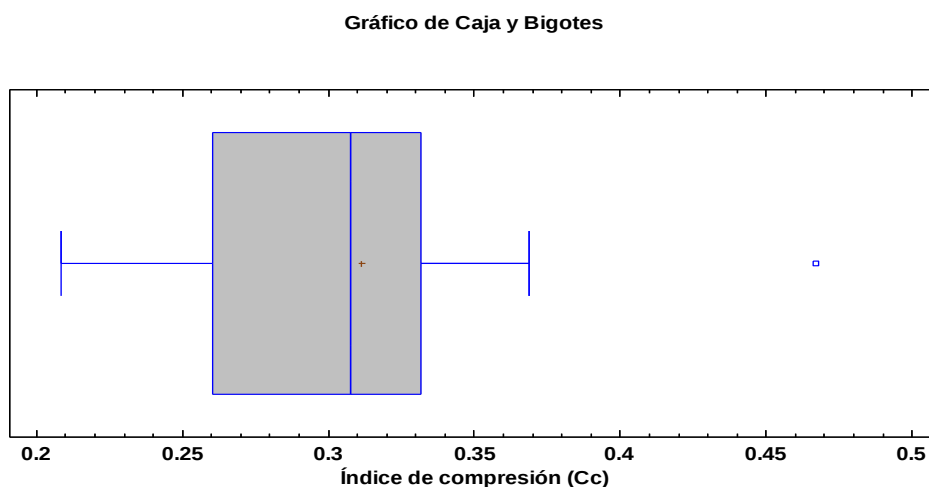


Ilustración 27. Gráfico de caja y bigotes para el Índice de Compresión (C_c).

Después de realizar el análisis estadístico para el grupo de valores de índice de compresión, se observa un dato por encima del bigote superior del gráfico, lo cual indica valores atípicos. La muestra localizada en el rango de valores atípicos es la descrita como P1M3 y no se tomará en cuenta para los futuros análisis, debido a que representa un dato irregular para la muestra de estudio.

Una vez obtenidos los valores del índice de compresión, se procede a realizar los gráficos de dispersión relacionándolo contra los parámetros de interés como son la Humedad Natural (w_o), Relación de Vacíos Inicial (e_o) y el Límite Líquido (LL), los análisis estadísticos se realizaron dentro del marco del Software STATGRAPHICS Centurion (Licencia Trial) y se presentan a continuación.

5.2 ECUACIONES DE CORRELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE COMPRESIÓN (C_c) Y LA HUMEDAD NATURAL (w_o)

5.2.1 Regresión lineal entre el Índice de Compresión y la Humedad Natural

Tomando el Índice de Compresión (C_c) como variable dependiente y la Humedad Natural (w_o) como la variable independiente se procede a realizar un análisis de regresión en el software, los resultados muestran una regresión lineal como base y se presenta también la regresión de mejor ajuste por mínimos cuadrados, como se presenta a continuación:

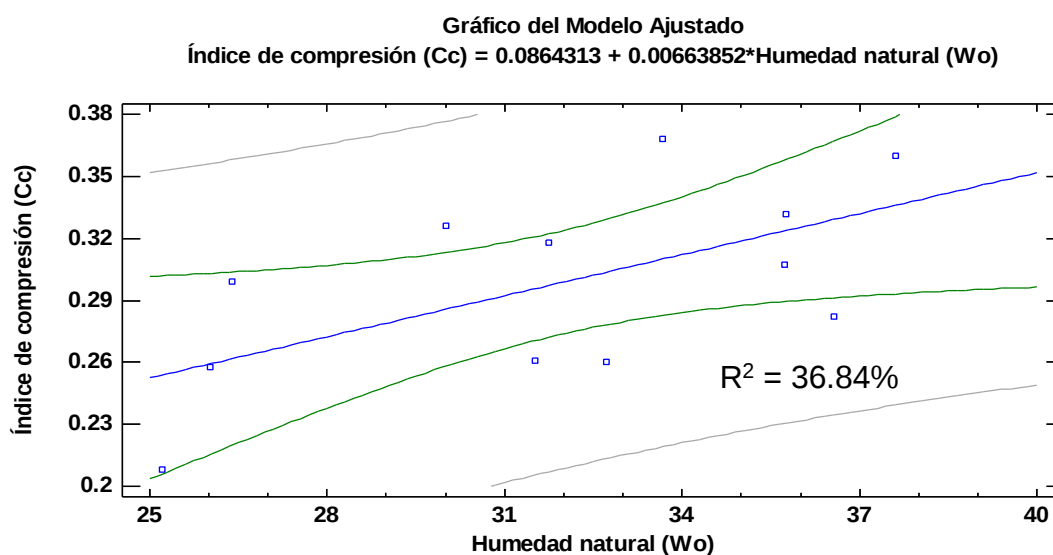


Ilustración 28. Gráfico de regresión lineal entre C_c y w_o

La ecuación que representa el modelo de regresión lineal presentado en la Ilustración 28 es la siguiente:

$$C_c = 0.00664(w_o) + 0.08643 \quad \text{Ecuación 28}$$

La regresión presenta un modelo con un coeficiente de correlación de $r = 0.601$ y un $R^2 = 36.84\%$, lo cual indica estadísticamente una relación moderadamente fuerte entre las variables. También en el análisis se encontró un valor-P del 0.036 en el análisis ANOVA, el cual por ser menor de 0.05 (valor- $P < 0.05$) significa que existe una relación estadísticamente significativa, entre el Índice de Compresión y la Humedad Natural con un nivel de confianza del 95%. El análisis estadístico

completo de la regresión pruebas de hipótesis se puede encontrar en el Literal 2.1 del ANEXO D.

5.2.2 Regresión de mejor ajuste entre el Índice de Compresión y la Humedad Natural

Dado que la regresión con mejor ajuste no era de comportamiento lineal, se compararon modelos alternativos. La ecuación que represento con un mejor ajuste entre C_c y w_o fue de la forma $C_c = 1/(a + b/w_o)$ donde a y b son constantes y se representa gráficamente de la siguiente manera:

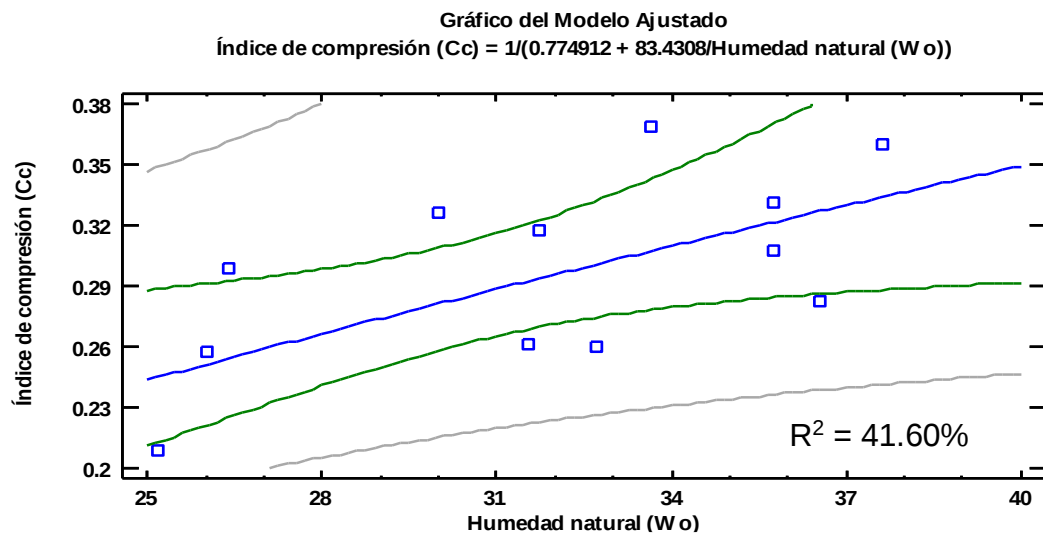


Ilustración 29. Gráfico de regresión de mejor ajuste entre C_c y w_o

La ecuación la cual representa la gráfica de regresión es la siguiente:

$$C_c = \frac{1}{0.7749 + \frac{83.4308}{w_o}} \quad \text{Ecuación 29}$$

Una vez realizada la regresión por mínimos cuadrados y obtenida la Ecuación 29, la cual cuenta con un coeficiente de correlación $r = 0.645$ y un $R^2 = 41.60\%$, que a su vez indican una relación moderadamente fuerte entre las variables y debido a que su valor-P en la tabla del análisis ANOVA es de $0.0235 < 0.05$, se puede aceptar la hipótesis de que existe una relación estadísticamente significativa entre el Índice de Compresión C_c y la Humedad Natural w_o con un nivel de confianza del 95%. El

análisis estadístico completo de la regresión pruebas de hipótesis se puede encontrar en el Literal 2.2 del ANEXO D.

5.3 ECUACIONES DE CORRELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE COMPRESIÓN (C_c) Y LA RELACIÓN DE VACÍOS INICIAL (e_o)

5.3.1 Regresión lineal entre el Índice de Compresión y la Relación de Vacíos Inicial

Se realizó de igual manera, una regresión lineal con el fin de identificar la correlación entre el Índice de Compresión y la Relación de Vacíos Inicial. La gráfica de dispersión generada entre estos parámetros se muestra a continuación:

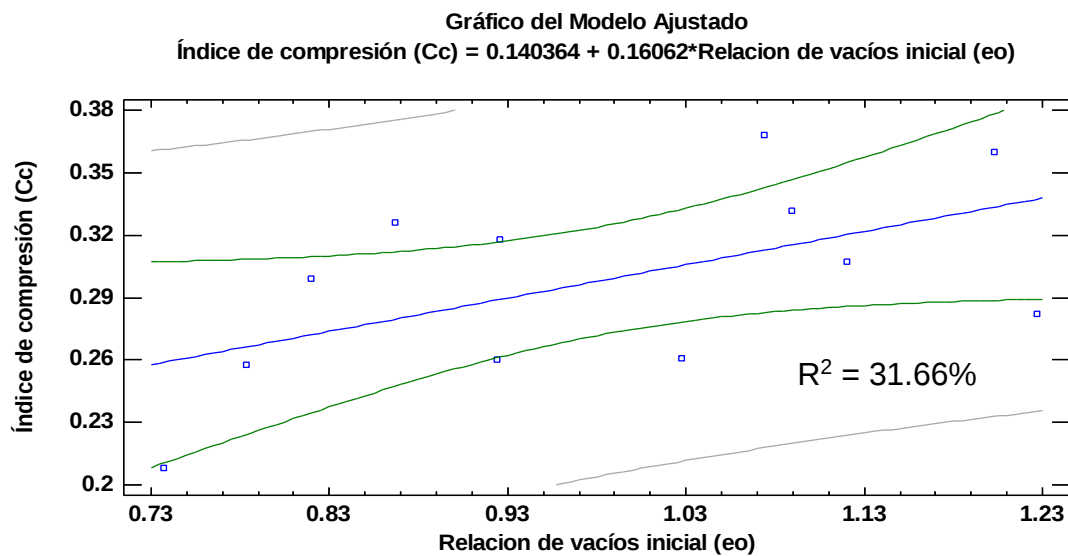


Ilustración 30. Gráfico de regresión lineal entre C_c y e_o

La ecuación lineal que representa la correlación lineal el Índice de Compresión y la relación de vacíos de las muestras, es la siguiente:

$$C_c = 0.1403 + 0.1606(e_o) \quad \text{Ecuación 30}$$

La regresión lineal realizada para correlacionar el Índice de Compresión con la Relación de Vacíos Inicial, muestra un coeficiente de correlación $r = 0.5626$ y un $R^2 = 31.66\%$ lo cual indica estadísticamente una relación moderadamente fuerte entre las variables por el valor-P = 0.056 de la tabla de ANOVA al ser mayor que 0.05 no se puede afirmar que haya una relación estadística con un 95% de

confianza, pero al estar muy cerca del valor límite no se podría descartar que se tenga una relación estadísticamente fuerte entre las variables. El análisis estadístico completo de la regresión pruebas de hipótesis se puede encontrar en el Literal 3.1 del ANEXO D.

5.3.2 Regresión de mejor ajuste entre el Índice de Compresión y la Relación de Vacíos Inicial.

Igualmente como sucedió con la Humedad Natural la regresión lineal no brindo el mejor ajuste de las variables, por eso se realizó el análisis con ajustes alternativos para encontrar la que brindara el mejor ajuste. La ecuación que presento el mejor ajuste durante la regresión con mínimos cuadrados fue de la forma $C_c = 1/(a + b/e_o)$ donde a y b son constantes en la ecuación. El gráfico de dispersión del Índice de Compresión y relación de vacíos se muestran a continuación:

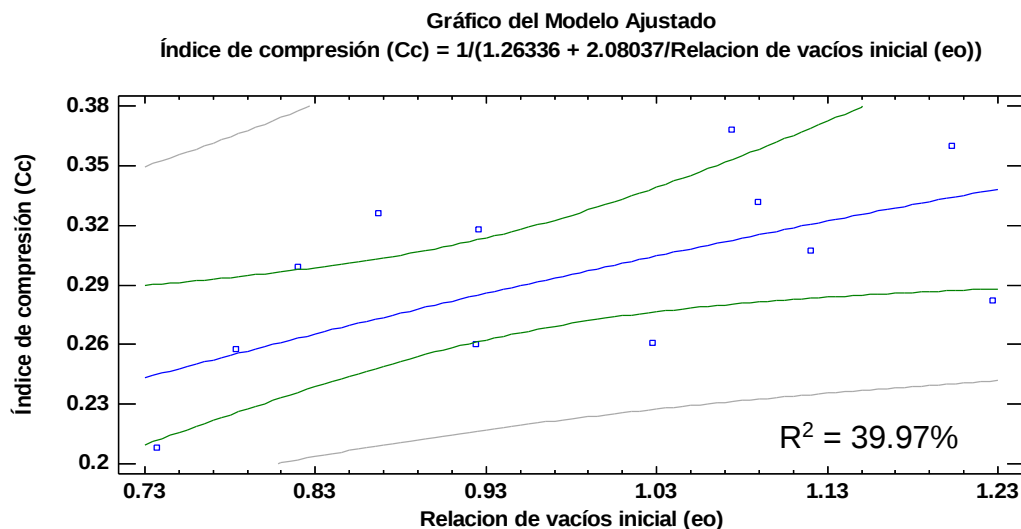


Ilustración 31. Gráfico de regresión de mejor ajuste entre C_c y e_o

La ecuación que representa el grafico en la Ilustración 31 se presenta a continuación:

$$C_c = \frac{1}{1.2633 + \frac{2.0804}{e_o}} \quad \text{Ecuación 31}$$

Para la ecuación de correlación de la Ilustración 31, se obtuvo un coeficiente de correlación de $r = 0.6322$ y un $R^2 = 39.97\%$, lo cual indica una relación

moderadamente fuerte de las variables y su valor- $P=0.027$ en la tabla de ANOVA indica una relación estadística entre las variables con un nivel de confianza del 95%. El análisis estadístico completo de la regresión pruebas de hipótesis se puede encontrar en el Literal 3.2 del ANEXO D.

5.4 ECUACIONES DE CORRELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE COMPRESIÓN (C_c) Y EL LÍMITE LÍQUIDO (LL)

5.4.1 Regresión lineal entre el Índice de Compresión y el Límite Líquido

Las correlaciones en función de una regresión lineal entre el Índice de Compresión y el Límite Líquido, son de las ecuaciones más comunes y usadas en la mecánica de suelos. El gráfico de dispersión y el gráfico de la regresión lineal para la presente investigación se presenta a continuación:

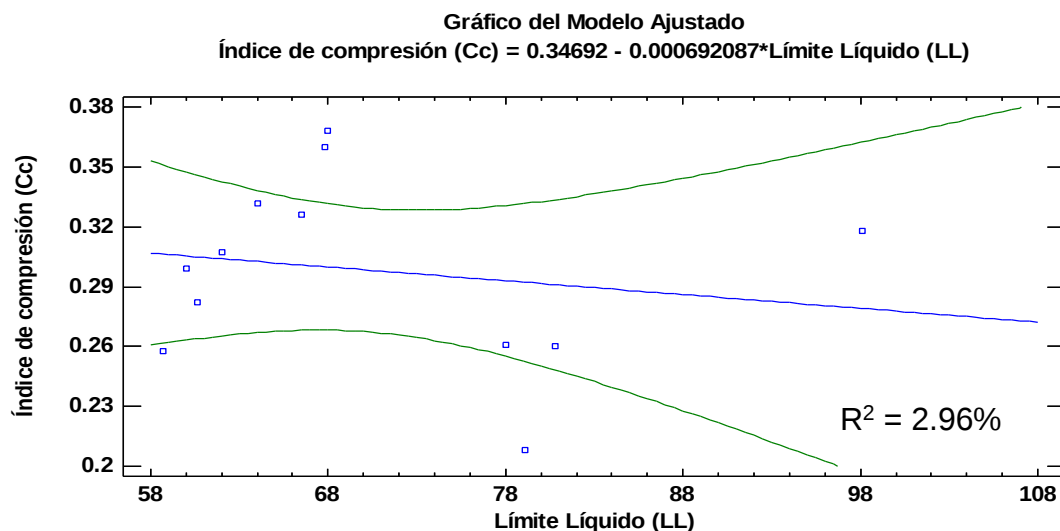


Ilustración 32. Gráfico de regresión lineal entre C_c y LL

La ecuación que representa el ajuste anteriormente referido es la siguiente:

$$C_c = 0.3469 - 0.0007(LL) \quad \text{Ecuación 32}$$

El modelo de regresión lineal entre el Límite Líquido y el Índice de Compresión no brinda un gran ajuste teniendo en cuenta que tiene valores de coeficiente de

correlación $r = 0.1721$ y un $R^2 = 4.75$ lo cual indica una correlación relativamente débil entre las variables además el valor-P en la tabla de ANOVA, muestra que no hay una relación estadísticamente significativa entre el Índice de Compresión y el Límite Líquido. El análisis estadístico completo de la regresión pruebas de hipótesis se puede encontrar en el Literal 4.1 del ANEXO D.

Sin embargo al realizar la regresión se muestra una tendencia la cual es interesante a la hora de realizar su análisis, ya que los valores del Límite Líquido para las muestras propias extraídas para la presente investigación, presentaban una característica lineal con un ajuste visiblemente mejor, por tanto se decidió mostrar también la correlación lineal para los valores propios como se ve a continuación:

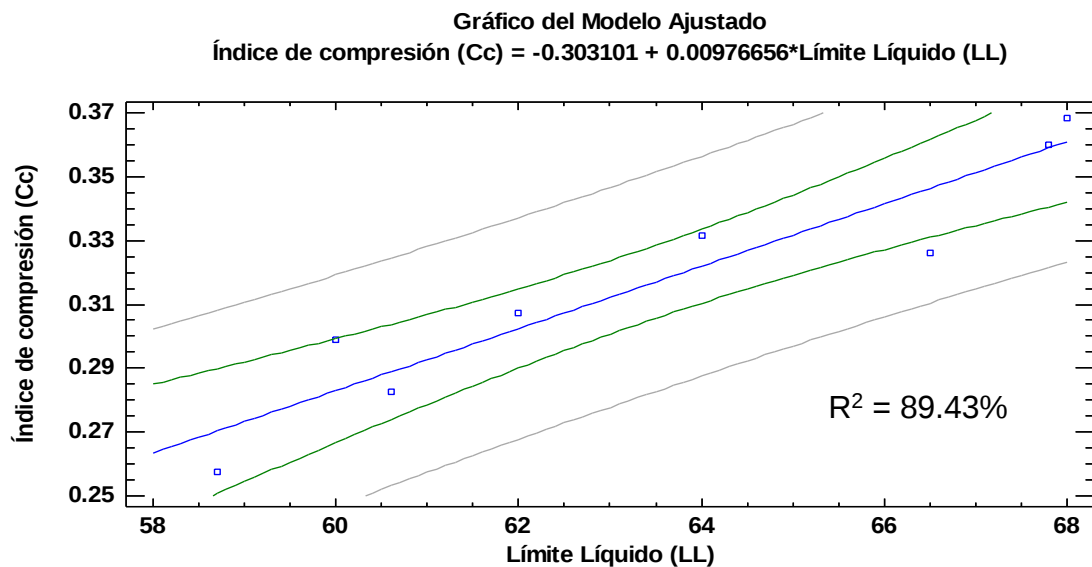


Ilustración 33. Gráfico de regresión lineal para las muestras propias entre C_c y LL

La ecuación que representa el grafico de la ilustración 33, está representada de la siguiente manera:

$$C_c = 0.0098(LL) - 0.0301 \quad \text{Ecuación 33}$$

La Ecuación 33, la cual es producto de la regresión lineal aplicada únicamente en los parámetros propios de las muestras procesadas en la investigación obtenidas del Oasis de la Flora (M1 a M8), tiene un coeficiente de correlación $r = 0.9457$ y un valor $R^2 = 89.433\%$, con un valor-P menor a 0.05 lo cual indica una relación estadísticamente fuerte entre las variables. Cabe aclarar que al usar únicamente las

muestras de una zona de la ciudad las cuales no tienen una variación muy alta, generaría ecuaciones únicamente aplicables a la zona de extracción. El análisis estadístico completo de la regresión pruebas de hipótesis se puede encontrar en el Literal 4.2 del ANEXO D.

5.5 ECUACIONES DE CORRELACIÓN PARA EL ÍNDICE DE COMPRESIÓN (C_c) EN FUNCIÓN DE DOS VARIABLES INDEPENDIENTES

Una vez obtenidas las ecuaciones de correlación en función de una sola variable independiente, se plantea la idea sobre la eficacia al relacionar dos parámetros de los ya mencionados para predecir el índice de compresión. Los resultados obtenidos son los siguientes:

5.5.1 Correlación entre el Índice de Compresión (C_c) en función de la Relación de Vacíos Inicial (e_o) y la Humedad Natural (w_o)

Al realizar el análisis estadístico para relacionar el Índice de Compresión en función de la Relación de Vacíos Inicial y la Humedad Natural, se obtuvo la siguiente ecuación lineal:

$$C_c = 0.0755 - 0.0584(e_o) + 0.0087(w_o) \quad \text{Ecuación 34}$$

La Ecuación 34 que representa la regresión lineal del Índice de Compresión en función de la Relación de Vacíos Inicial y la Humedad Natural, presenta un valor de $R^2 = 37.204\%$, posee un valor-P en la tabla ANOVA de 0.12, por lo cual no se puede afirmar una correlación estadística con un 95% de probabilidad.

5.5.2 Correlación entre el Índice de Compresión (C_c) en función de la Relación de Vacíos Inicial (e_o) y el Límite Líquido (LL)

También se encontró pertinente analizar la relación entre el Índice de Compresión en función de los valores de la Relación de Vacíos Inicial y el Límite Líquido. La ecuación resultante a la regresión lineal por mínimos cuadrados fue la siguiente:

$$C_c = 0.1573(e_o) - 0.0002(LL) + 0.1586 \quad \text{Ecuación 35}$$

La Ecuación 35 que representa la correlación del Índice de Compresión en función de la Relación de Vacíos Inicial y el límite líquido tiene un valor $R^2 = 31.93\%$, se obtiene una mejor relación entre el Índice de Compresión y la Relación de Vacíos Inicial que entre el Límite Líquido.

5.6 RESUMEN DE LAS ECUACIONES DE CORRELACIÓN PARA REPRESENTAR EL ÍNDICE DE COMPRESIÓN (C_c) EN CAMPO

Tabla 18. Resumen de ecuaciones de correlación formuladas producto de la investigación.

Ecuación	Coefficiente Correlación (r)	R ²	Observaciones
$C_c = 0.00664(w_o) + 0.08643$ [Ecuación 28]	0.601	36.84%	-Relación moderadamente fuerte entre las variables. -Relación estadísticamente significativa con un 95% de confiabilidad.
$C_c = \frac{1}{0.7749 + \frac{83.4308}{w_o}}$ [Ecuación 29]	0.645	41.60%	-Relación moderadamente fuerte entre las variables -Relación estadísticamente significativa con un 95% de confiabilidad. -Mejor ajuste con respecto a la regresión lineal. -Ecuación de mejor ajuste.
$C_c = 0.1403 + 0.1606(e_o)$ [Ecuación 30]	0.5626	31.66%	-Relación moderadamente fuerte entre las variables. -No se puede afirmar una relación estadísticamente significativa con un 95% de confiabilidad.
$C_c = \frac{1}{1.2633 + \frac{2.0804}{e_o}}$ [Ecuación 31]	0.6322	39.97%	-Relación moderadamente fuerte entre las variables. -Relación estadísticamente significativa con un 95% de confiabilidad. -Mejor ajuste con respecto a la regresión lineal.

$C_c = 0.3469 - 0.0007(LL)$ [Ecuación 32]	0.1721	4.75%	-Relación débil entre las variables - No se puede afirmar una relación estadísticamente significativa con un 95% de confiabilidad .
$C_c = 0.0098(LL) - 0.3031$ [Ecuación 33]	0.9475	89.43%	-Relación altamente fuerte entre las variables -Relación estadísticamente significativa con un 95% de confiabilidad. -Formulada a partir de un solo lugar de extracción.
$C_c = 0.0755 - 0.0584(e_o) + 0.0087(w_o)$ [Ecuación 34]	N.A	37.20%	-Se presenta una relación moderadamente fuerte entre las variables. -Se obtiene mejor ajuste usando las variables por separado.
$C_c = 0.1573(e_o) - 0.0002(LL) + 0.1586$ [Ecuación 35]	N.A	31.93%	-Se presenta una relación moderadamente fuerte entre las variables. -Se obtiene mejor ajuste usando las variables por separado.

Se puede observar que la variable que tuvo una mayor correlación con respecto al Índice de Compresión fue la Humedad Natural, sin embargo el ajuste con la relación de vacíos tuvo un comportamiento altamente similar. Las regresiones lineales no tuvieron el mejor ajuste para el índice de compresión. Finalmente se observa que se obtuvo una gran correlación entre el Índice de Compresión y el Límite Líquido para las muestras extraídas del conjunto Oasis de la flora, pero no se puede considerar un indicador fiable por la poca variación que hay entre los valores del Límite Líquido para este sector.

5.7 COMPARACIÓN DE ECUACIONES LAS FORMULADAS EN LA INVESTIGACIÓN, FRENTE A ALGUNAS DE LAS COMÚNMENTE UTILIZADAS PARA DETERMINAR EL ÍNDICE DE COMPRESIÓN

Una vez obtenidas las ecuaciones de correlación para calcular el valor del Índice de Compresión formuladas en la presente investigación, se propone realizar la

comparación con las ecuaciones comúnmente usadas y encontradas en la literatura de la mecánica de suelos. Se compararon las ecuaciones en función del mismo parámetro y modelo de regresión y los resultados se presenta a continuación:

5.7.1 Comparación de las ecuaciones formuladas a partir de la Humedad Natural (w_o)

Se graficó las dispersión de los datos.

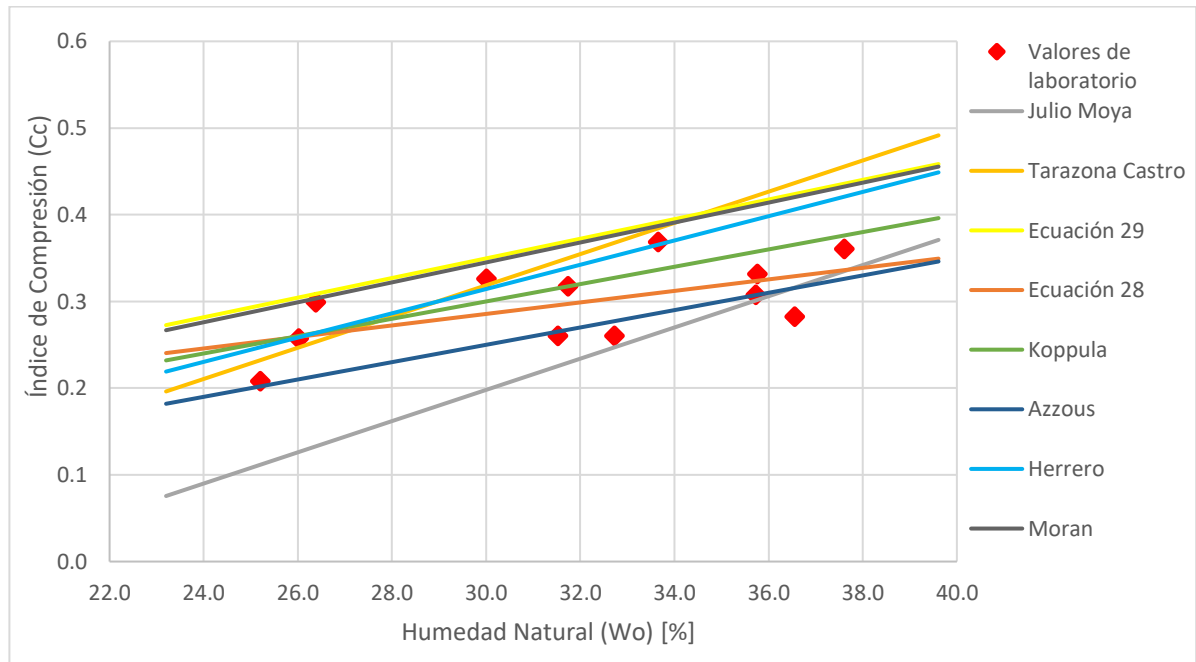


Ilustración 34. Gráfico de comparación de ecuaciones de correlación vs datos de laboratorio para el Índice de Compresión obtenido a partir de ecuaciones en función de la Humedad Natural de la muestra.

En el gráfico de la Ilustración 34 se pueden observar los datos encontrados en el laboratorio, comparados con los resultados obtenidos con las ecuaciones de correlación con comportamiento similar al presentado por los datos y también con los resultados obtenidos con las ecuaciones de correlación en función de la Humedad Natural obtenidas en la presente investigación. La línea gris representan la ecuación del ingeniero Julio Moya formulada para las arcillas de la sabana de Bogotá en 1987, la línea anaranjada por su parte representa la ecuación formulada en 1974 por los investigadores Castro y González para las arcillas de Bogotá y las líneas de color roja y amarilla representan la ecuación formulada a partir de la regresión lineal (Ecuación 28) y la de mejor ajuste (Ecuación 29) respectivamente. Finalmente se muestran las ecuaciones formuladas en la Mecánica de Suelos

internacional, la línea verde representa la ecuación formulada por Koppula en 1984 para las arcillas de Chicago, la azul oscura formulada por Azzous en 1976 para arcillas de Brasil. Aplicando las ecuaciones formuladas en las últimas décadas como Ayala & Flores (2012) y Acevedo, Flores y Gómez (2014) ambas realizadas para suelos de México y Slamet Widodo & Abdelazim Ibrahim (2012) arrojaron resultados negativos para el Índice de Compresión resultados los cuales carecen de coherencia con los anteriormente encontrados durante la investigación y aplicando las correlaciones de otros autores.

Se seleccionan las ecuaciones más representativas como son Julio Moya (1987) y Tarazona & Castro (1974) por ser las correlaciones formuladas en suelos Colombianos en función de la Humedad Natural (w_o) y las ecuaciones que presentaron menor variación para el Índice de Compresión (C_c) obtenido en laboratorio y para los valores de Humedad Natural (w_o) obtenidos en los ensayos de la presente investigación se realizó el cálculo del Índice de Compresión (C_c) para cada una de las ecuaciones representativas como se muestra a continuación:

Tabla 19. Valores del Índice de Compresión para las ecuaciones más representativas en función de la Humedad Natural (w_o).

Humedad Natural (w_o) [%]	Índice de Compresión (C_c)						
	Ecuación 28	Julio moya	Tarazona y Castro	Koppula	Azzous	Ecuación 29	Laboratorio
25.200	0.254	0.112	0.232	0.252	0.202	0.295	0.208
31.740	0.297	0.229	0.350	0.317	0.267	0.370	0.318
34.160	0.313	0.273	0.393	0.342	0.292	0.397	0.467
31.520	0.296	0.225	0.346	0.315	0.265	0.367	0.261
32.730	0.304	0.247	0.368	0.327	0.277	0.381	0.260
37.610	0.336	0.335	0.456	0.376	0.326	0.436	0.360
35.730	0.324	0.301	0.422	0.357	0.307	0.415	0.307
36.556	0.329	0.316	0.437	0.366	0.316	0.424	0.282
26.386	0.262	0.133	0.254	0.264	0.214	0.309	0.299
26.020	0.259	0.126	0.247	0.260	0.210	0.305	0.257
35.764	0.324	0.302	0.422	0.358	0.308	0.415	0.332
33.655	0.310	0.264	0.384	0.337	0.287	0.391	0.369
30.002	0.286	0.198	0.319	0.300	0.250	0.350	0.326
0.000	0.086	-0.342	-0.221	0.000	-0.050	N.A	

Se presentaron los valores del Índice de Compresión (C_c) obtenidos a partir de las ecuaciones de correlación en función de la Humedad Natural (w_o) de las muestras de la presente investigación obtenidas a partir de los ensayos de laboratorio como

se muestra en la Tabla 19, se observa que la mayor variación de resultados se presenta usando la ecuación del Ingeniero Julio Moya desarrollada a partir de arcillas de Bogotá, también se muestra que para el valor 0 de la Humedad Natural (w_o) se presentan valores negativos o muy pequeños para el Índice de Compresión (C_c) y en otras ocasiones no podría ser usada la formula matemáticamente. Teniendo los datos hallados a partir de las correlaciones y los datos encontrados en el laboratorio se procede a encontrar el porcentaje de variación con respecto a los valores del Índice de Compresión (C_c) encontrados a partir de los ensayos de consolidación.

Tabla 20. Porcentaje de variación del Índice de Compresión obtenido con las ecuaciones de correlación en función de la Humedad Natural (w_o) con respecto al valor obtenido en el laboratorio.

Humedad Natural (w_o) [%]	Porcentaje de variación con respecto al laboratorio					
	Ecuación 28	Julio Moya	Tarazona y Castro	Koppula	Azzous	Ecuación 29
25.200	18%	-87%	10%	17%	-3%	29%
31.740	-7%	-39%	9%	0%	-19%	14%
34.160	-49%	-71%	-19%	-37%	-60%	-18%
31.520	12%	-16%	25%	17%	2%	29%
32.730	14%	-5%	29%	21%	6%	32%
37.610	-7%	-8%	21%	4%	-10%	17%
35.730	5%	-2%	27%	14%	0%	26%
36.556	14%	11%	35%	23%	11%	33%
26.386	-14%	-125%	-18%	-13%	-40%	3%
26.020	1%	-104%	-4%	1%	-22%	15%
35.764	-2%	-10%	21%	7%	-8%	20%
33.655	-19%	-40%	4%	-10%	-29%	6%
30.002	-14%	-65%	-2%	-9%	-30%	7%
Variación Promedio	14%	45%	17%	13%	18%	19%
Pendiente de la recta	0.006	0.018	0.018	0.010	0.010	0.011

Se calculó el Índice de Compresión (C_c) en función de la Humedad Natural para los 13 ensayos de consolidación y Humedad Natural (w_o) de la presente investigación, donde se encontró un menor porcentaje de variación para la ecuación formulada por Koppula en 1976 generado a partir de arcillas de la ciudad de Chicago, Estados Unidos, sin embargo se obtuvo porcentajes de variación muy similares para las ecuaciones Ecuación 28, Ecuación 29 y Tarazona y Castro, las primeras formuladas

en la presente investigación y la restante formulada para arcillas de la ciudad de Bogotá. Vale la pena anotar que las ecuaciones más representativas mostradas en la Tabla 19, poseen un comportamiento numérico y una pendiente similar para permitir agregar validación a las ecuaciones generadas en la presente investigación. Al comparar con las ecuaciones presentes en los antecedentes, se pudo observar mayor relación con las anteriormente citadas de las cuales dos fueron formuladas en el territorio nacional, además las ecuaciones generadas en la presente investigación para determinar el Índice de Compresión en función del valor de la Humedad Natural del suelo, tienen similitud con investigaciones anteriores lo que aporta confiabilidad en el trabajo realizado y bases para continuar con investigaciones posteriores que permitan ampliar el estado del arte de la mecánica de suelos en el país.

5.7.2 Comparación de las ecuaciones formuladas a partir de la Relación de Vacíos Inicial (e_o)

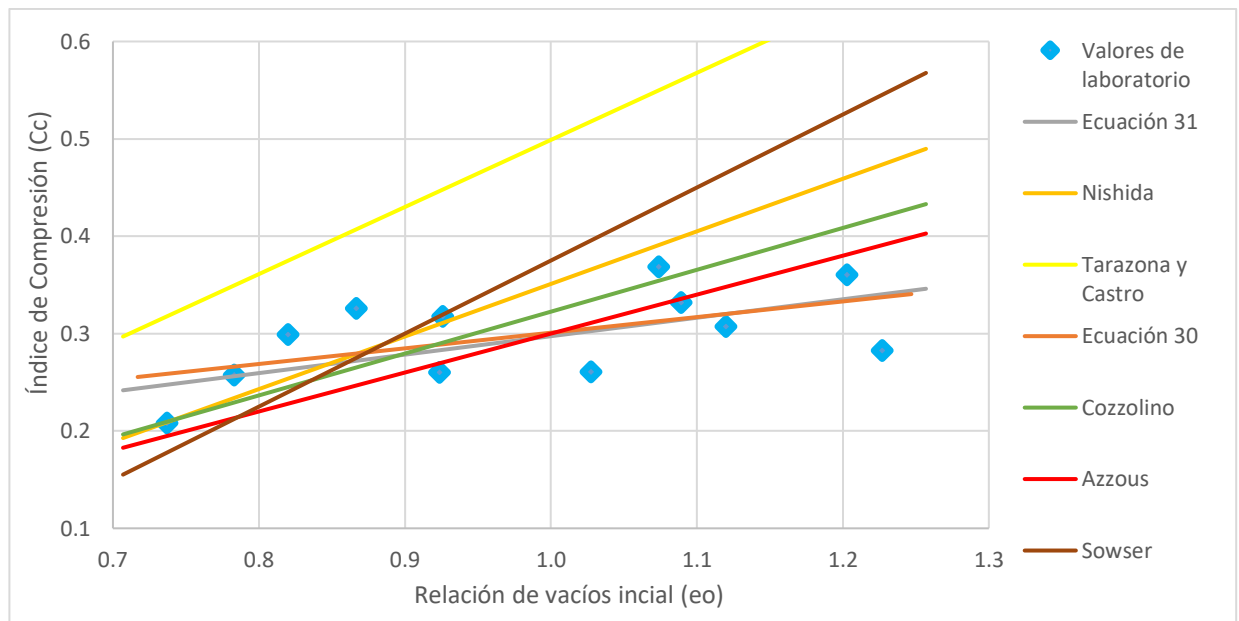


Ilustración 35. Gráfico de comparación de ecuaciones de correlación vs datos de laboratorio para el índice de compresión, obtenido a partir de ecuaciones en función de la relación de vacíos de la muestra.

Se presentan los valores del Índice de Compresión obtenidos en el laboratorio en comparación con los obtenidos mediante las ecuaciones que mejor representa la tendencia de los datos. La línea de color naranja representa la ecuación formulada

por Nishida en 1956 para todas las arcillas, la línea amarilla la ecuación formulada por Tarazona y Castro en 1974 para las arcillas de Bogotá, la línea verde representa la ecuación formulada por Cozzolino en 1961 para las arcillas de Brasil, la línea roja representa la ecuación formulada por Azzous para todas las arcillas en 1976.

Se puede observar que las ecuaciones formuladas en la presente investigación para encontrar el Índice de Compresión a partir de la Relación de Vacíos Inicial (Ecuación 30 y Ecuación 31), tienen una pendiente menor a la de las ecuaciones antes mencionadas lo que implica menor sensibilidad al aumento o reducción del valor de la relación de vacíos, al predecir el índice de compresión. Aplicando las ecuaciones formuladas en las últimas décadas como Ayala & Flores (2012) y Acevedo, Flores y Gómez (2014) ambas realizadas para suelos de México y Slamet Widodo & Abdelazim Ibrahim (2012) arrojaron resultados negativos para el Índice de Compresión resultados los cuales carecen de coherencia con los anteriormente encontrados durante la investigación y aplicando las correlaciones de otros autores.

Tabla 21. Valores del Índice de Compresión para las ecuaciones más representativas en función de la Humedad Natural (e_0).

Relación de Vacíos Inicial (e_0)	Índice de Compresión (C_c)							
	Ecuación 30	Ecuación 31	Nishida	Cozzolino	Tarazona y Castro	Azzous	Sowers	Laboratorio
0.737	0.259	0.245	0.209	0.209	0.318	0.195	0.177	0.208
0.926	0.289	0.285	0.311	0.291	0.448	0.270	0.319	0.318
0.965	0.295	0.293	0.332	0.308	0.475	0.286	0.348	0.467
1.027	0.305	0.304	0.366	0.334	0.518	0.311	0.395	0.261
0.924	0.289	0.284	0.310	0.290	0.446	0.270	0.317	0.260
1.203	0.333	0.334	0.460	0.410	0.639	0.381	0.527	0.360
1.120	0.320	0.320	0.416	0.374	0.582	0.348	0.465	0.307
1.227	0.337	0.338	0.474	0.420	0.655	0.391	0.545	0.282
0.820	0.272	0.263	0.254	0.245	0.375	0.228	0.240	0.299
0.783	0.266	0.255	0.234	0.229	0.350	0.213	0.212	0.257
1.089	0.315	0.315	0.399	0.361	0.560	0.336	0.441	0.332
1.074	0.313	0.312	0.391	0.354	0.550	0.330	0.430	0.369
0.867	0.280	0.273	0.279	0.265	0.407	0.247	0.275	0.326
0.000	0.140	N.A	-0.189	-0.108	-0.190	-0.100	-0.375	

Al comparar los resultados obtenidos con las ecuaciones utilizadas en la mecánica de suelos, con los resultados obtenidos con las ecuaciones formuladas en la presente investigación se puede observar cierta similitud en la predicción de los

datos de Índice de Compresión como se muestra numéricamente en la Tabla 21 lo cual manifiesta confiabilidad en las ecuaciones formuladas en la presente investigación.

Tabla 22. Porcentaje de variación del Índice de Compresión obtenido con las ecuaciones de correlación en función de la Relación de Vacíos Inicial (e_0) con respecto al valor obtenido en el laboratorio.

Relación de Vacíos Inicial (e_0)	Porcentaje de variación con respecto al laboratorio						
	Ecuación 30	Ecuación 31	Nishida	Cozzolino	Tarazona y Castro	Azzous	Sowers
0.737	19%	15%	0%	1%	34%	7%	17%
0.926	-10%	-12%	-2%	-9%	29%	18%	1%
0.965	-58%	-60%	-41%	-52%	2%	63%	34%
1.027	15%	14%	29%	22%	50%	16%	34%
0.924	10%	9%	16%	10%	42%	3%	18%
1.203	-8%	-8%	22%	12%	44%	5%	32%
1.120	4%	4%	26%	18%	47%	12%	34%
1.227	16%	16%	40%	33%	57%	28%	48%
0.820	-10%	-14%	-18%	-22%	20%	31%	25%
0.783	3%	-1%	-10%	-12%	26%	21%	21%
1.089	-5%	-5%	17%	8%	41%	1%	25%
1.074	-18%	-18%	6%	-4%	33%	12%	14%
0.867	-17%	-19%	-17%	-23%	20%	32%	19%
Variación Promedio	15%	15%	19%	17%	34%	19%	25%
Pendiente de la recta	0.161	0.189	0.540	0.430	0.689	0.400	0.750

Para los resultados del Índice de Compresión (C_c) obtenidos a partir de las ecuaciones de correlación en función de la Relación de Vacíos Inicial (e_0) se puede observar una variación con respecto a los resultados de laboratorio del 15% para las ecuaciones 30 y 31, también se presenta un comportamiento muy similar para las ecuaciones de Nishida y Cozzolino con una variación del 19% y 17% respectivamente, por otro lado la ecuación formulada por Tarazona y Castro para arcillas de Bogotá se convirtió en la de mayor variación con respecto a las demás ecuaciones significativas formuladas en función de la Relación de Vacíos Inicial (e_0).

5.7.3 Comparación de las ecuaciones formuladas a partir del Límite Líquido (LL)

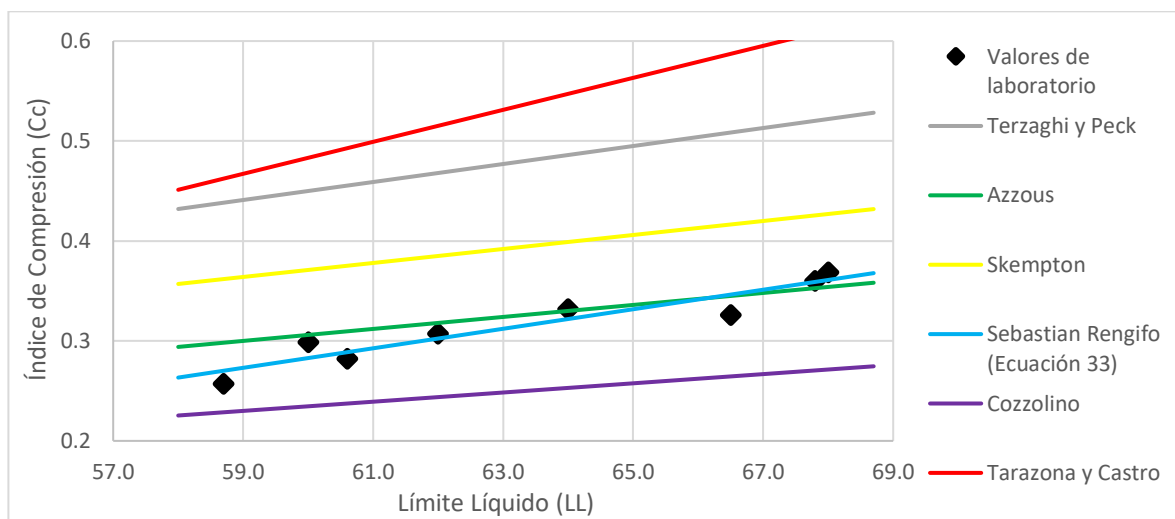


Ilustración 36. Gráfico de comparación de ecuaciones de correlación vs datos de laboratorio para el índice de compresión, obtenido a partir de ecuaciones en función del Límite Líquido de la muestra.

En la Ilustración 36, se muestra el gráfico de dispersión y la línea de la Ecuación 33, en color azul, también la línea de color gris que corresponde a la ecuación de correlación formulada por Terzaghi y Peck en 1967 aplicable para arcillas normalmente consolidadas, la línea de color amarillo que corresponde a la ecuación formulada por Skempton en 1944 para arcillas remoldeadas, la línea de color verde que corresponde a la ecuación formulada por Azzous en 1976 aplicable para todas las arcillas, la línea de color morado que corresponde a la ecuación formulada por Cozzolino en 1961 aplicable para las arcillas de Brasil y finalmente la línea de color rojo que corresponde a la ecuación formulada por Tarazona y Castro en 1974 para las arcillas de Bogotá. Se puede observar que la Ecuación 33 formulada a partir de una regresión lineal tiene un comportamiento similar en la pendiente de su gráfica a la de las ecuaciones normalmente usadas para encontrar el Índice de Compresión en campo, pero los valores de la ecuación se encuentran por debajo de los que se obtendría con las ecuaciones más utilizadas en la mecánica de suelos. Sin embargo tiene un comportamiento muy similar a la ecuación generada por Azzous con posibilidad de uso para todas las arcillas. La cercanía de las magnitudes entre el Índice de Compresión generado con la ecuación propuesta en la presente investigación y las generadas a partir de las correlaciones más utilizadas en la

mecánica de suelos aporta confiabilidad a la ecuación formulada. Aplicando las ecuaciones formuladas en las últimas décadas como Ayala & Flores (2012) y Acevedo, Flores y Gómez (2014) ambas realizadas para suelos de México y Slamet Widodo & Abdelazim Ibrahim (2012) arrojaron resultados superiores a 1.0 para el Índice de Compresión resultados los cuales carecen de coherencia con los anteriormente encontrados durante la investigación y aplicando las correlaciones de otros autores.

Se realiza comparación numérica para los valores del Índice de Compresión (C_c) obtenidos a partir de las ecuaciones de correlación en función del Límite Líquido, esta comparación se hace con las ecuaciones las cuales tiene una menor variación muestral entre el Índice de Compresión (C_c) encontrado y el hallado en el laboratorio, lo cual se presenta en la Tabla 23.

Tabla. Valores del Índice de Compresión (C_c) para los diferentes valores del Limite Líquido, según las ecuaciones comparadas.

Tabla 23. Valores del Índice de Compresión para las ecuaciones más representativas en función del Límite Líquido.

Límite Líquido (LL) [%]	Índice de Compresión (C_c)						Laboratorio
	Ecuación 33	Terzaghi y Peck	Azzous	Cozzolino	Skempton	Tarazona y Castro	
67.8	0.359	0.520	0.353	0.270	0.426	0.608	0.360
62.0	0.302	0.468	0.318	0.244	0.385	0.515	0.307
60.6	0.289	0.455	0.310	0.237	0.375	0.493	0.282
60.0	0.283	0.450	0.306	0.235	0.371	0.483	0.299
58.7	0.270	0.438	0.298	0.229	0.362	0.462	0.257
64.0	0.322	0.486	0.330	0.253	0.399	0.547	0.332
68.0	0.361	0.522	0.354	0.271	0.427	0.611	0.369
66.5	0.346	0.509	0.345	0.265	0.417	0.587	0.326
0.0	-0.303	-0.090	-0.054	-0.041	-0.049	-0.477	-

En la tabla 24, se pueden observar el valor del Índice de Compresión (C_c) para los diferentes valores del Límite Líquido obtenidos durante la investigación, se observan valores para el Índice de Compresión (C_c) entre 0.229 y 0.611 para valores del Límite Líquido entre 58% y 68%.

Se observa a continuación en la Tabla 24 la variación entre el valor del Índice de Compresión obtenido con las ecuaciones anteriormente mencionadas y el valor obtenido en el laboratorio, para los valores del Límite Líquido mostrados, se observan diferencias máximas del 44% para la ecuación de Tarazona y Castro

(1974) y una diferencia promedio del 41% siendo esta la ecuación de menor ajuste con respecto a los datos del laboratorio. Por otro lado se presenta la ecuación formulada por Azzous (1967), con una variación promedio el 5% con respecto a los valores del laboratorio, también la Ecuación 33 propuesta en la presente investigación la cual posee una variación del 3%, esto teniendo en cuenta que dicha ecuación fue formulada con los datos de Límite Líquido e Índice de Compresión de laboratorio.

Tabla 24. Porcentaje de variación del Índice de Compresión obtenido con las ecuaciones de correlación en función del Límite Líquido (LL) con respecto al valor obtenido en el laboratorio.

Límite Líquido (LL) [%]	Porcentaje de variación con respecto al laboratorio					
	Ecuación 33	Terzaghi y Peck	Azzous	Cozzolino	Skempton	Tarazona y Castro
67.8	0%	31%	-2%	-33%	15%	41%
62.0	-2%	34%	3%	-26%	20%	40%
60.6	2%	38%	9%	-19%	25%	43%
60.0	-6%	34%	2%	-27%	19%	38%
58.7	5%	41%	14%	-13%	29%	44%
64.0	-3%	32%	-1%	-31%	17%	39%
68.0	-2%	29%	-4%	-36%	14%	40%
66.5	6%	36%	5%	-23%	22%	44%
Variación Promedio	3%	34%	5%	26%	20%	41%
Pendiente de la recta	0.0098	0.0090	0.0060	0.0046	0.0070	0.016

Por otro lado también se muestran las pendientes de las ecuaciones las cuales se encuentran entre 0.0046 y 0.0116, teniendo valores de pendientes muy similares entre la Ecuación 33 formulada en la presente investigación y la ecuación formulada por Terzaghi y Peck (1976) y con una mayor variación al ser comparada contra la ecuación formulada por Azzous (1967), lo que significaría que la estrecha relación entre los resultados obtenidos por la Ecuación 33 y la mencionada anteriormente tendría más diferencia con magnitudes mayores del Límite Líquido.

5.7.4 Comparación de resultados con datos de arcillas de la Ciudad de Cali

Durante el Estudio De Microzonificación Sísmica de la ciudad de Cali – Colombia, se realizaron una serie de ensayos para el informe de caracterización geotécnica

alrededor de la ciudad y dividieron los resultados según el tipo de suelo obtenido en la extracción. Para esta investigación es pertinente analizar el uso de las correlaciones para tipo de suelos arcillosos, los suelos arcillosos presentados en el informe de caracterización geotécnica fueron divididos de la siguiente manera:

Tabla 25. Materiales típicos arcillosos de la ciudad de Cali.

(Fuente: Estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali. 2015. Informe 4. p.69)

ID	USCS	DESCRIPCIÓN
C1	CH MH	Arcilla limosa y limo arcilloso, colores café, amarillo y gris, consistencia firme, muy sobreconsolidada, con presencia de materia orgánica, material superficial.
C2	CH	Arcilla limosa, colores amarillo, habano y rojizo, consistencia firme, sobreconsolidado, con presencia de gravas esporádicas
C3	CH	Arcilla limosa, colores café y gris, consistencia firme, con presencia de óxido, fragmentos de grava y materia orgánica.
C4	CH	Arcilla limosa, color azul con vetas habanas, consistencia muy firme.
C5	CH	Arcilla limosa, colores rojizo, amarillo y habano, consistencia firme.
C6	CH	Arcilla, colores gris verdosa marrón, consistencia firme.

Se dividieron en 6 tipos de arcillas en su mayoría de alta plasticidad (CH) y se separó dependiendo del color la consistencia y la presencia de materia orgánica. Como resultado de los ensayos de laboratorio se obtuvieron los siguientes resultados sobre las propiedades de los suelos arcillosos de la ciudad:

Tabla 26. Propiedades promedio de los materiales arcillosos típicos de la ciudad de Cali.

(Fuente: Estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali. 2015. Informe 4. p.73)

Parámetro	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Humedad Natural (wo) [%]	40.75	40.88	46.30	48.51	45.60	47.53
Relación de Vacíos Inicial (eo)	1.12	1.04	1.140	1.33	1.28	1.00
Límite Líquido (LL) [%]	74.03	72.49	77.48	104.74	93.65	93.69
Índice de Compresión (C_c)	0.314	0.328	0.349	0.53	0.337	0.348

Se presentaron valores promedios para el Índice de Compresión (C_c) y la Relación de Vacíos Inicial muy similares a los presentados en la presente investigación y para los valores de los parámetros de Humedad Natural (w_o) y Límite Líquido (LL) valores por valores un poco más altos de los encontrados en el actual trabajo. Para el caso de la Humedad Natural (w_o) se presentaron valores entre 40 - 48% para los ensayos realizados a partir de suelos arcillosos durante el estudio de la Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Cali frente a los valores de Humedad Natural (w_o) entre 25 – 38%.

Una vez extraídos los datos significativos para la presente investigación se procede a comparar el valor del Índice de Compresión (C_c) obtenido a partir de las ecuaciones obtenidas en la presente investigación y también con las ecuaciones que presentaron mejor ajuste con respecto a las pruebas realizadas en el laboratorio, por tanto consideradas más significativas. Se procede entonces a realizar las comparaciones entre el Índice de Compresión (C_c) inferido en función de las propiedades ya mencionadas, Humedad Natural (w_o), Relación de Vacíos Inicial (e_o) y Límite Líquido (LL), en su orden como se presenta a continuación:

Tabla 27. Porcentaje de variación entre el Índice de Compresión (C_c) con las ecuaciones más representativas en función de la Humedad Natural (w_o) y el valor hallado en laboratorio de las arcillas típicas de la ciudad de Cali.

Ecuación	Parámetro	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Ecuación 28	w_o [%]	40.75	40.88	46.3	48.51	45.6	47.53
	C_c	0.357	0.358	0.394	0.408	0.389	0.402
	Variación	13.7%	9.1%	12.8%	-22.9%	15.5%	15.5%
Ecuación 29	w_o [%]	40.75	40.88	46.3	48.51	45.6	47.53
	C_c	0.471	0.472	0.532	0.556	0.524	0.546
	Variación	33.3%	30.5%	34.4%	4.7%	35.7%	36.2%
Julio Moya	w_o [%]	40.75	40.88	46.3	48.51	45.6	47.53
	C_c	0.392	0.394	0.491	0.531	0.479	0.514
	Variación	19.8%	16.7%	29.0%	0.2%	29.6%	32.2%
Tarazona y Castro	w_o [%]	40.75	40.88	46.3	48.51	45.6	47.53
	C_c	0.512	0.514	0.612	0.652	0.599	0.634
	Variación	38.7%	36.2%	43.0%	18.7%	43.8%	45.1%
Koppula	w_o [%]	40.75	40.88	46.3	48.51	45.6	47.53
	C_c	0.408	0.409	0.463	0.485	0.456	0.475
	Variación	22.9%	19.8%	24.6%	-9.3%	26.1%	26.8%

Aplicando las ecuaciones de correlación más significativas formuladas en función de la Humedad Natural (w_o) para hallar el valor del Índice de Compresión (C_c), se puede observar que la Ecuación 28 es la que tiene menor variación con respecto a los valores del Índice de Compresión (C_c) encontrados en el laboratorio para la Microzonificación de la ciudad de Cali, con variaciones entre el 9 – 23%, teniendo en cuenta que la mayor variación se presenta para la formulación para el suelo C4. También es importante rescatar que para todas las ecuaciones de correlación tienen una variación máxima del 43.8%.

También se realiza el mismo tipo de análisis para las ecuaciones formuladas en función de la Relación de Vacíos Inicial (e_o), como se muestra a continuación:

Tabla 28. Porcentaje de variación entre el Índice de Compresión (C_c) con las ecuaciones más representativas en función de Relación de Vacíos Inicial (e_o) y el valor hallado en laboratorio de las arcillas típicas de la ciudad de Cali.

Ecuación	Parámetro	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Ecuación 30	e_o	1.12	1.04	1.14	1.33	1.28	1
	C_c	0.320	0.307	0.323	0.354	0.346	0.301
	Variación	1.9%	-6.7%	-7.9%	-49.8%	2.6%	-15.7%
Ecuación 31	e_o	1.12	1.04	1.14	1.33	1.28	1
	C_c	0.320	0.306	0.324	0.354	0.346	0.299
	Variación	2.0%	-7.0%	-7.8%	-49.9%	2.7%	-16.4%
Nishida	e_o	1.12	1.04	1.14	1.33	1.28	1
	C_c	0.416	0.373	0.427	0.529	0.502	0.351
	Variación	24.5%	12.0%	18.2%	-0.2%	32.9%	0.9%
Cozzolino	e_o	1.12	1.04	1.14	1.33	1.28	1
	C_c	0.374	0.340	0.383	0.464	0.443	0.323
	Variación	16.1%	3.4%	8.8%	-14.1%	23.9%	-7.9%
Tarazona y Castro	e_o	1.12	1.04	1.14	1.33	1.28	1
	C_c	0.582	0.526	0.595	0.726	0.692	0.499
	Variación	46.0%	37.7%	41.4%	27.0%	51.3%	30.2%

Una vez presentada la variación del Índice de Compresión (C_c) calculado con las ecuaciones de correlación en función de la Relación de Vacíos Inicial (e_o) contra los resultados obtenidos en laboratorio se puede observar que la Ecuación 30 y Ecuación 31 con variaciones muy similares para ambas ecuaciones entre el 2 y 17%, sin considerar que para el tipo de suelo C4, se encuentra una variación máxima del 40% aproximadamente para ambas ecuaciones. También las ecuaciones formuladas por Cozzolino y Nishida

tienen una variación entre 1 – 24% teniendo un mejor ajuste todas las anteriores que la ecuación presentada por Tarazona y Castro formulada en Colombia.

Tabla 29. Porcentaje de variación entre el Índice de Compresión (C_c) con las ecuaciones más representativas en función del Límite Líquido (LL) y el valor hallado en laboratorio de las arcillas típicas de la ciudad de Cali.

Ecuación	Parámetro	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Ecuación 33	LL [%]	74.03	72.49	77.48	104.74	93.65	93.69
	C_c	0.420	0.405	0.454	0.720	0.611	0.612
	Variación	25.2%	19.0%	23.1%	26.4%	44.9%	43.1%
Terzaghi y Peck	LL [%]	74.03	72.49	77.48	104.74	93.65	93.69
	C_c	0.576	0.562	0.607	0.853	0.753	0.753
	Variación	45.5%	41.7%	42.5%	37.8%	55.2%	53.8%
Azzous	LL [%]	74.03	72.49	77.48	104.74	93.65	93.69
	C_c	0.390	0.381	0.411	0.574	0.508	0.508
	Variación	19.5%	13.9%	15.1%	7.7%	33.6%	31.5%
Cozzolino	LL [%]	74.03	72.49	77.48	104.74	93.65	93.69
	C_c	0.299	0.292	0.315	0.440	0.389	0.390
	Variación	-5.0%	-12.3%	-10.8%	-20.3%	13.5%	10.7%
Skempton	LL [%]	74.03	72.49	77.48	104.74	93.65	93.69
	C_c	0.469	0.458	0.493	0.684	0.607	0.607
	Variación	33.1%	28.5%	29.3%	22.5%	44.4%	42.7%
Tarazona y Castro	LL [%]	74.03	72.49	77.48	104.74	93.65	93.69
	C_c	0.708	0.683	0.763	1.199	1.022	1.022
	Variación	55.6%	52.0%	54.3%	55.8%	67.0%	66.0%

Al aplicar las ecuaciones de correlación en función del Límite Líquido (LL) para estimar el Índice de Compresión para las arcillas típicas de la ciudad con los valores obtenidos en la microzonificación sísmica se pueden observar variaciones más altas con respecto a los valores de laboratorio para todas las ecuaciones en comparación con las ecuaciones en función de la Humedad Natural y la Relación de Vacíos Inicial. Se presentaron variación con respecto a los valores del laboratorio entre el 42 y 54% para la ecuación propuesta por Terzaghi y Peck, variaciones entre 22 y 44% para la ecuación propuesta por Skempton dos de las más citadas en la literatura y usadas en campo frente a variaciones entre 19 y 44% para la Ecuación 33 formulada en la presente investigación.

5.8 Resumen de resultados

- Se logró identificar que el Índice de Compresión tiene una relación moderadamente fuerte (en función del coeficiente de correlación) con las variables de Relación de Vacíos Inicial y Humedad Natural del suelo, con coeficientes de correlación (r) de 0.645 y 0.632 respectivamente.
- Se logró identificar mediante análisis ANOVA, que el Índice de Compresión posee una relación estadísticamente significativa con una confiabilidad del 95% con los valores de Relación de Vacíos Inicial (e_o) y Humedad Natural (w_o) para la presente investigación.
- Se observa la tendencia de que el valor del Índice de Compresión C_c aumente cuando aumenta el valor de las variables independientes LL , w_o y e_o .
- Al comparar los resultados de las ecuaciones formuladas con los datos de la microzonificación sísmica se puede observar que para las ecuaciones formuladas en la presente investigación las que más exactitud poseen son las formuladas en función de la Humedad Natural (w_o), seguido de las formuladas en función de la Relación de Vacíos Inicial (e_o) y finalmente las ecuaciones que mayor variación las formuladas en función del Límite Líquido.
- Las ecuaciones de regresión lineal presentaron menor ajuste durante el análisis estadístico sin embargo presenta menor variación de resultados en comparación con los obtenidos en el laboratorio y en comparación con los resultados de la Microzonificación Sísmica de la ciudad de Cali.
- Al realizar el análisis de las correlaciones para las muestras extraídas del conjunto residencial Oasis de La Flora durante la presente investigación se obtiene una muy alta relación entre el Índice de Compresión y el Límite Líquido los cuales concuerdan con los resultados obtenidos a partir de las ecuaciones de correlación, usadas en la Mecánica de Suelos.

CONCLUSIONES

- No se determinó una relación directa del Índice de Compresión con el Límite Líquido para todas las muestras. Sin embargo se evidenció una relación muy alta entre las variables para las muestras obtenidas del conjunto residencial Oasis de la Flora, que al comparar con las ecuaciones comúnmente usadas en la mecánica de suelos (Skempton (1944), Terzaghi (1967)), tienen un comportamiento similar en cuanto a pendiente de la recta y variación entre el 15% y 3% respectivamente en magnitud del resultado.
- El uso de datos de la investigación realizada por C. Bastidas y G. Fabián en 2016 puede haber generado variación en los resultados de la presente investigación ya que a pesar de contar con granulometría similar al no ser analizadas a fondo las propiedades electroquímicas de las partículas no se puede afirmar que sean el mismo tipo de material arcilloso.
- A pesar de que las ecuaciones NO lineales tuvieron un R^2 mayor; al realizar la comparación de resultados con los datos de la microzonificación sísmica, las ecuaciones de forma lineal presentan una menor variación de los resultados con respecto al Índice de Compresión obtenido para las diferentes tipos de arcillas de la ciudad de Cali.
- Se observa un comportamiento lineal entre el Índice de Compresión (C_c) y las propiedades del suelo: Relación de Vacíos Inicial (e_o), Humedad Natural (w_o), y Límite Líquido consecuente con lo documentado en los antecedentes. Por tal motivo se puede confirmar la correlación lineal de la variable dependiente con las variables independientes anteriormente mencionadas.
- Al comparar los resultados obtenidos con las ecuaciones de las correlaciones formuladas en la presente investigación, con los resultados obtenidos con ecuaciones formuladas por los investigadores Koppula, Terzaghi, Cozzolino y Nishida, para diferentes tipos de arcillas se encontraron variaciones similares con respecto a los valores del Índice de Compresión (C_c) obtenido en laboratorio para los datos de la presente investigación y de la Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Cali lo cual aporta confiabilidad a los resultados de la presente investigación.

- Se determinó que para los valores de la presente investigación y valores de la Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Cali la variable independiente que tenía mayor correlación con el Índice de Compresión era el porcentaje de Humedad Natural (w_o).
- Se definió para la presente investigación que el método apropiado en suelos cohesivos y grado de saturación menor al 100%, para realizar el ensayo de consolidación unidimensional es sometiendo primero la muestra al ensayo de expansión en el consolidómetro, para así evitar la expansión de la muestra durante los primeros escalones de carga después de saturado.
- Las ecuaciones de correlación para estimar el Índice de Compresión en función de múltiples variables disminuyeron el ajuste estadístico de los resultados en comparación con las ecuaciones de correlación en función de una única variable independiente, por eso se considera más adecuado usar las ecuaciones para estimar el Índice de Compresión formuladas en función de una sola variable independiente para la presente investigación.
- Se puede observar que para todas las ecuaciones formuladas en la actual investigación se presenta menor variación en los resultados con respecto a los datos de la microzonificación sísmica de Cali, con las arcillas denominadas C1, C2 Y C3, arcillas limosas sobreconsolidadas con consistencia firme y de colores claros y grises, material comúnmente encontrado en el norte de la ciudad, zona de estudio de la presente investigación.
- Al comparar las ecuaciones de correlación formuladas por los autores J. Moya y Tarazona y Castro con las ecuaciones formuladas por Azzous, Nishida y Koppula, se observan resultados más similares a los obtenidos por las ecuaciones formuladas en la presente investigación por el segundo grupo. Por tanto se concluye que las ecuaciones formuladas a partir de arcillas del territorio nacional no presentan un mejor ajuste a los resultados que las formuladas con otros tipos de arcillas fuera del país.
- Se presenta potencial dispersión en los datos posiblemente resultado del manejo de las muestras y la preparación durante los ensayos de laboratorio, lo que generaría variación en los resultados de las regresiones, es recomendable continuar ampliando el estado del arte sobre las arcillas de la zona norte de la ciudad para continuar minimizando los errores y obtener correlaciones aún más precisas.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda usar las ecuaciones de correlación formuladas en la presente investigación en arcillas de la zona 6.a Abanico de Menga y El Bosque. Sin embargo por el similar comportamiento de las ecuaciones formuladas en la presente investigación con las ecuaciones comúnmente usadas en la mecánica de suelos, se podría usar en arcillas de características similares a las obtenidas en la presente investigación.
- Para futuras investigaciones se recomienda realizar un análisis más a fondo sobre las propiedades electroquímicas de las arcillas y así poder realizar una correcta caracterización del suelo y así poder definir correctamente la aplicabilidad de las correlaciones formuladas.
- Se recomienda que las muestras de arcilla con características expansivas y grados de saturación menores al 100%, las cuales se vayan a someter a ensayo de consolidación unidimensional sean previamente sometidas al ensayo de expansión en el consolidómetro con el fin de evitar expansiones después de la saturación de la muestra durante los primeros escalones de carga.
- Dada la importancia de conocer los materiales arcillosos de la ciudad, se recomienda realizar más estudios que aporten a la caracterización en la zona norte de Cali para determinar correlaciones más precisas y elaborar una base de datos con las propiedades de este tipo de suelos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acevedo, E., Flores, O., & Gómez, E. (2014). Relación que guarda el Índice de Compresión de las arcillas del Valle de México con las propiedades índice. XXVII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica.

Arancibia G, Carolina Alejandra. (2003). Arcillas expansivas: Comportamiento, identificación y su correlación mediante ensayos de fácil ejecución. Trabajo de grado constructor civil. Valdivia: Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de Ingeniería.

ASTM C128-15. (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.

ASTM D2216-10. (2010). Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.

ASTM D2435 / D2435M-11. (2011). Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.

ASTM D4318-10e1. (2010). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.

Ayala, K., & Flores, O. (2012). Variación del Índice de Compresión con las propiedades índice del suelo. XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Cancún, Quintana Roo, Noviembre.

Azzouz, A. S., KRIZEK, R. J., & CoRoTis, R. B. (1976). Regression analysis of soil compressibility. Soils and Foundations, 16(2), 19-29.

Bastidas Camilo, Gonzales Fabián. (2016). Comportamiento De Las Arcillas De Un Sector Del Norte De Cali En La Prueba De Consolidación Unidimensional. Universidad Del Valle.

Binod Tiwari, Beena Ajmera. (2012). New Correlation Equations for Compression Index of Remolded Clays. Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering, ASCE.

Bowles E. Joseph. (1980). Manual De Laboratorio De Suelos En Ingeniería Civil. McGraw-Hill Education.

Bowles, J. (1997). Foundations Analysis and Design. 5 Edición.

Calvo Barriga, M. I., & Durán Álvarez, D. J. (2013). Determinación del índice de compresibilidad e índice de expansión de los suelos cohesivos blandos en la zona de Tonsupa en la provincia de Esmeraldas (Doctoral Dissertation, PUCE).

Carlos A. Martínez. (2016). Correlación entre el Límite Líquido y el coeficiente de compresibilidad para arcillas de llanura costera. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Carlos Crespo Villalaz. (2004). Mecánica de suelos y cimentaciones. Editorial Limusa.

Casagrande, A. (1958). Notes on the design of the liquid limit device. Geotechnique.

Cozzolino, V. M. (1961). Statistical forecasting of compression index. In Proceedings of the 5th international conference on soil mechanics and foundation engineering Paris (Vol. 1, pp. 51-53).

Das, Braja. (2001). Fundamentos De Ingeniería Geotécnica. México, D.F.: Thomson Learning.

Dewis, J., & Freitas, F. (1970). Métodos físicos y químicos de análisis de suelos y aguas.

Doval Montoya, M. (1990). "Bentonitas". En: Recursos Minerales de España. Coord. J. García Guinea y J. Martínez Frias. Textos Universitarios (C.S.I.C.).

Espinosa, A. & Sarria, A. (1985). Riesgo sísmico en Colombia. Mem. VI Congr. latinoam. Geol, 1, 206-243.

Franco, M., Ovidio, É., & Abello Acosta, L. E. (1994). Correlación entre el Índice de Compresión y el Límite Líquido para limos y arcillas provenientes del batolito antioqueño en el municipio de Santuario (Doctoral Dissertation, Universidad Nacional de Colombia).

Galán Huertos, E. (1990). "Palygorskita y sepiolita". En: Recursos Minerales de España. Coord. J. García Guinea y J. Martínez Frias. Textos Universitarios (C.S.I.C.)

Gil Lim Yoon, Byung Tak Kim, Sang Soo Jeon. (2004). Empirical Correlations Of Compression Index For Marine Clay From Regression Analysis. Canadian Geotechnical Journal.

Hough, B. K. (1957). Basic Soils Engineering.

Ingeominas. (2005). Estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali. Bogotá. Ministerio de Minas y Energía

ISO 14688-1. (2003). Ingeniería geotécnica. Identificación y clasificación de suelos. Parte 1: Identificación y descripción. AEN/CTN 103 – GEOTECNIA.

Iván Adolfo Restrepo Mora. (2012). Correlación De La Resistencia A Compresión Uniaxial Con La Humedad Y Porosidad Eficaz De Rocas De La Cantera Cachivi en el Valle Del Cauca. Universidad del Valle.

J. E. Duran. (2013). Características De Compresibilidad Y Resistencia De Arcillas Típicas Del Depósito Lacustre De Bogotá. Escuela Colombiana De Ingeniería Julio Garavito

J. H. Park, T. Koumoto. (2004). New Compression Index Equation. Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering, ASCE.

Jimenez, J.A. (1976). Geotecnia y Cimientos. Tomo I. Editorial Rueda Madrid.

Juaréz Eulalio. (2005). Mecanica de suelos I: Fundamentos de la Mecánica De Suelos. Editorial Limusa. México.

Koppula, S. D. (1981). Statistical estimation of compression index.

M. Salas, P. Núñez. (2013). Comportamiento de cimentaciones en suelos expansivos. Universidad Nacional Autónoma de México.

Mendoza H, Vargas J, Lopez L, Bautista G. (2002). Métodos de Regresión. Universidad Nacional de Colombia, <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/2007315/>.

Moya, J., & Rodriguez, J. (1987). El subsuelo de Bogota y los problemas de cimentaciones. In Proc., 8th Panamerican Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering (pp. 197-264). Univ. Nacional de Colombia.

Nishida, Y. (1956). A brief note on compression index of soil. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 82(3), 1-14.

- Novales, A. (2010). Análisis de Regresión. Departamento de Economía Cuantitativa, Universidad Complutense.
- NTC. (2013). Método de Ensayo Para Determinar En El Laboratorio El Contenido De Agua (Humedad) De Suelos Y Rocas, Con Base En La Masa. 1945.
- NTC. (2013). Método de Ensayo para la Determinación del Límite Líquido, del Límite Plástico y del Índice de Plasticidad de los Suelos Cohesivos. 4630.
- Porta. Jaume y López Marta. (2014). Edafología (3ª ed.). Ediciones Mundi-Prensa.
- R. Thomas, A. Cuenca, J. Delgado, C. Domenech, A. Mirad. (2010). Cálculo Analítico De La Presión De Preconsolidación Del Suelo: Aplicación A La Vega Baja Del Río Segura (Alicante).
- Romero, E. G., & Barrios, M. S. (2002). Las arcillas: propiedades y usos. Universidad Complutense y Universidad de Salamanca, Madrid.
- Schmertmann, J. H. (1955). The undisturbed consolidation behavior of clay. In From Research to Practice in Geotechnical Engineering: (pp. 1-33). ASCE.
- Skempton, A. W., & Jones, O. T. (1944). Notes on the compressibility of clays. Quarterly Journal of the Geological Society, 100(1-4), 119-135.
- Slamet Widodo, Abdelazim Ibrahim. (2012). Estimation of Primary Compression Index (Cc) Using Physical Properties of Pontianak Soft Clay. International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA).
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1967). Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley & Sons, Incorporated.
- Uriel, E. (2013). Regresión lineal múltiple: estimación y propiedades. Universidad de Valencia Versión, 09-2013.
- Villafañe, G., Coronado, C., & Ríos, L. (2000). Cimentaciones en Suelos Expansivos. Práctica Local. In Memorias del 8º Congreso Colombiano de Geotecnia. Sociedad Colombiana de Geotecnia. Bogotá.
- W. M. Yan, Ka-Veng Yuen, Gil Lim Yoon. (2009). Bayesian Probabilistic Approach for the Correlations of Compression Index for Marine Clays. Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering, ASCE.