

**COMPARACIÓN DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD OBTENIDO EN EL
LABORATORIO CON EL CALCULADO A PARTIR DE LAS FÓRMULAS DE
ALLEN HAZEN, SCHLICHTER Y TERZAGHI PARA LAS ARENAS DEL RÍO
TONA Y DE LA TRITURADORA INGESAN S.A FUENTE LA PLAYA DE LA VÍA
BUCARAMANGA - MATANZA.**

**LADY MAGRED JAIMES HERNANDEZ
MAURICIO ALONSO GÓMEZ GUALDRÓN**



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2010**

**COMPARACIÓN DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD OBTENIDO EN EL
LABORATORIO CON EL CALCULADO A PARTIR DE LAS FÓRMULAS DE
ALLEN HAZEN, SCHLICHTER Y TERZAGHI PARA LAS ARENAS DEL RÍO
TONA Y DE LA TRITURADORA INGESAN S.A FUENTE LA PLAYA DE LA VÍA
BUCARAMANGA - MATANZA.**

**LADY MAGRED JAIMES HERNANDEZ
MAURICIO ALONSO GÓMEZ GUALDRÓN**

Proyecto de Grado para optar el título de Ingeniero Civil

**Director
GERARDO BAUTISTA GARCÍA
Ingeniero Civil
Magister en Ingeniería Civil**



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2010**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente Del Jurado

Jurado

Jurado

Bucaramanga, Enero de 2.010

DEDICATORIA

Dedico este proyecto y toda mi carrera universitaria a Dios por ser quien ha estado a mi lado en todo momento dándome las fuerzas necesarias para continuar luchando día tras día y seguir adelante rompiendo todas las barreras que se me presenten.

Le agradezco a mi mamá Rosa María Hernández y mi papá Pedro Elías Jaimes ya que gracias a ellos soy quien soy hoy en día, fueron los que me dieron ese cariño y calor humano necesario, son los que han velado por mi salud, mis estudios, mi educación, son a ellos a quienes les debo todo el amor del mundo para formarme como un ser integral y de las cuales me siento extremadamente orgulloso.

Le agradezco a mis hermanos Sandra y Johanny Jaimes por su inmenso amor, comprensión, apoyo y por su cariño incondicional.

A mi novio Jhon Almeida por su amor, apoyo y compañía en cada etapa del camino recorrido juntos.

También le agradezco a mi mejor amiga Paola Rodríguez por su amistad, comprensión y apoyo siempre en el desarrollo de este proyecto de grado.

Lady Magred Jaimes Hernández

DEDICATORIA

A Dios por darme la oportunidad de vivir y permitirme llegar Ser Ingeniero Civil de la Universidad Pontificia Bolivariana, el cual era uno de mis proyectos a alcanzar.

A mis abuelas Alicia del Carmen López y María de Jesús Gómez les dedico este logro de mi vida, ya que gracias a ellas, pude alcanzarlo, donde con su dedicación, amor y entrega desde mi nacimiento, me formaron para ser hoy en día un profesional con sentido humano.

A mis Padres Alirio Gómez Higuera y Alix Esperanza Gualdrón López por su valioso apoyo, cariño, confianza y amor transmitido para lograr cada una de mis metas; y a las familias de mis Padres por la compañía constante en todos mis triunfos.

A mí hermana Jenny que por su apoyo constante me animan y dan un toque de alegría a mi vida; y que además espero verla cumpliendo sus metas como Ingeniera de Telecomunicaciones y Ingeniera Industrial de la Universidad Santo Tomás.

A la UEN Recreación, Deportes, Hotelería y Turismo de la Caja Santandereana de Subsidio Familiar CAJASAN por darme la oportunidad de realizar mi primera experiencia laboral como Ingeniero Sanitario y Ambiental.

A mis amigos y conocidos que hacen parte de mi crecimiento personal, donde gracias a ellos, proyecto mis acciones para seguir luchando y ser mejor día tras día.

Mauricio Alonso Gómez Gualdrón

AGRADECIMIENTOS

Sinceros agradecimientos a:

Al Ingeniero Gerardo Bautista; por su dirección, paciencia, dedicación y ayuda que nos permitieron lograr los objetivos del proyecto.

Al Ingeniero Rafael Ortiz por permitirnos ser parte del programa de Ingeniería Civil con el fin de poder seguir nuestros estudios para lograr obtener luego la doble titulación.

A los Señores Elí Rueda Aparicio y José Vicente Páez Mendoza, por su gran interés y generosa colaboración en el proyecto.

A la ingeniera Piedad por el ánimo que nos pudo compartir en los momentos más valiosos.

A la Ingeniera Silvia por su aporte a la organización de los tiempos del laboratorio. La trituradora INGESAN S.A, por su colaboración, seguimiento y apoyo para la realización de este Proyecto de Grado.

Los industriales del sector estudiado, por la valiosa colaboración en la recolección de las muestras para el desarrollo del proyecto.

Al Ingeniero Aldemar Remolina, Jefe de Facultad, quien con su interés y apoyo ayudó al reconocimiento del proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. OBJETIVOS	2
1.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2. ANTECEDENTES	3
3. METODOLOGÍA	7
4. MARCO TEÓRICO	10
4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS SUELOS	10
4.1.1 Granulometría	10
4.2 SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (S.U.C.S)	13
4.3 RELACIONES VOLUMÉTRICAS Y GAVIMÉTRICAS EN LOS SUELOS	15
4.4 COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD	18
4.4.1 Métodos Directos Para Determinar La Constante De Permeabilidad K	19
4.4.1.1 Permeámetro de carga constante	19
4.4.1.2 Permeámetro de carga variable	22
4.4.1.3 Pruebas directa de los suelos in-situ	23
4.4.2 MÉTODOS INDIRECTOS PARA DETERMINAR LA CONSTANTE DE PERMEABILIDAD K	24
4.4.2.1 Método a partir de la curva granulométrica	24
4.4.2.2 Método a partir de la prueba de consolidación	26
4.4.2.3 Método a partir de la prueba horizontal de capilaridad	27

5. RESULTADOS OBTENIDOS	28
5.1 GRANULOMETRÍA DE LOS AGREGADOS	28
5.1.1 Arena Río Tona	28
5.1.1.1 Porcentaje promedio de Arenas	28
5.1.1.2 Porcentaje promedio de Gravas	28
5.1.1.3 Porcentaje promedio de Finos	28
5.1.1.4 Diámetro efectivo D_{10} promedio	28
5.1.1.5 D_{30} promedio	28
5.1.1.6 D_{60} promedio	29
5.1.1.7 Coeficiente de uniformidad (Cu)	29
5.1.1.8 Coeficiente de Curvatura (Cc)	29
5.1.2 Arena Trituradora INGESAN	29
5.1.2.1 Porcentaje promedio de Arenas	30
5.1.2.2 Porcentaje promedio de Gravas	30
5.1.2.3 Porcentaje promedio de Finos	30
5.1.2.4 D_{10} promedio	30
5.1.2.5 D_{30} promedio	30
5.1.2.6 D_{60} promedio	30
5.1.2.7 Coeficiente de uniformidad (Cu)	31
5.1.2.8 Coeficiente de Curvatura (Cc)	31
5.2 CONSTANTES DE PERMEABILIDAD	31
5.2.1 Tablas de resultados de permeabilidad de las muestras de estudio	31
5.2.1.1 Permeabilidad Arena Río Tona	31
5.2.1.2 Permeabilidad Arena Trituradora INGESAN S.A	33

5.3 PESO ESPECÍFICO DE LOS SÓLIDOS	34
5.3.1 Tablas de resultados de los pesos específicos de las arenas seleccionadas para la investigación	34
5.3.1.1 Peso Específico De Arena Del Río Tona	34
5.3.1.2 Peso Específico Arena De La Trituradora INGESAN	34
6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	37
6.1 ARENA DEL RIO TONA	37
6.1.1 Análisis de las constantes de Allen Hazen, Terzaghi y Schlichter para la arena del río Tona	38
6.1.2 Análisis del ajuste propuesto para disminuir los porcentajes de error en las ecuaciones de Allen Hazen, Terzaghi y Schlichter para la arena del río Tona	43
6.1.3 Análisis de porcentajes de error para los coeficientes K en las fórmulas de Terzaghi, Schlichter y Allen Hazen para la arena del río Tona	45
6.2 ARENA DE LA TRITURADORA INGESAN S.A	52
6.2.1. Análisis de las constantes de Allen Hazen, Terzaghi y Schlichter para la arena de la Trituradora INGESAN	53
6.2.2 Análisis del ajuste propuesto para disminuir los porcentajes de error en las ecuaciones de Allen Hazen, Terzaghi y Schlichter para la arena del río Tona	57
6.2.3 Análisis de porcentajes de error para los coeficientes K en las fórmulas de Terzaghi, Schlichter y Allen Hazen para la arena de la Trituradora INGESAN	59
7. CONCLUSIONES	66
8. OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES	68
BIBLIOGRAFÍA.	70
ANEXOS	72

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Investigaciones recientes UPB	6
Tabla 2. Permeabilidad del río Tona	32
Tabla 3. Permeabilidad de la Trituradora INGESAN	33
Tabla 4. Peso Específico de sólidos del Río Tona	35
Tabla 5. Peso Específico de sólidos de la Trituradora INGESAN.	36
Tabla 6. Relaciones volumetricas y gravimetricas del rio Tona	38
Tabla 7. Comparación de las constantes permeabilidad - río Tona	39
Tabla 8. Porcentajes de error allen hazen - rio Tona	46
Tabla 9. Porcentajes de error terzagui - rio Tona	48
Tabla 10. Porcentajes de error schlichter - rio Tona	50
Tabla 11. Relaciones volumetricas y gravimetricas del suelo	52
Tabla 12. Comparación de las constantes permeabilidad– Trituradora INGESAN	54
Tabla 13. Porcentajes de Error Allen Hazen – Trituradora INGESAN	60
Tabla 14 Porcentajes de error Terzaghi – Trituradora INGESAN	62
Tabla 15. Porcentajes de error Schlichter- Trituradora INGESAN	64

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. FLUJOGRAMA	9
Figura 2. Curvas típicas de distribución de partículas	11
Figura 3. Características granulométricas	11
Figura 4. Esquema de una muestra de suelo en sus tres fases:	15
Figura 5. Aparato de prueba de carga constante	20
Figura 6. Aparato de carga variable	22
Figura 7. Método de Terzaghi para estimación del coeficiente de permeabilidad “k” en el campo.	27
Figura 8. Relación de comportamiento de la Porosidad (n) Vs Compacidad (c). Datos originales–Schlichter.	41
Figura 9. Relación de comportamiento de la Porosidad (n) Vs Compacidad (c). Datos Río Tona	42
Figura 10. Rangos de porcentajes de error ALLEN HAZEN-Río Tona	47
Figura 11. Rangos de porcentajes de errores TERZAGHI – RÍO TONA	49
Figura 12. Rangos de porcentaje de error SCHLICHTER – RÍO TONA	51
Figura 13. Relación de comportamiento de la Porosidad (n) Vs Compacidad (c). Datos originales–Schlichter.	55
Figura 14. Relación de comportamiento de la Porosidad (n) Vs Compacidad (c). Datos Trituradora INGESAN S.A.	56
Figura 15. Rangos de porcentajes de error ALLEN HAZEN -INGESAN	61
Figura 16. Rangos de porcentajes de error TERZAGHI -INGESAN	63
Figura 17. Rangos de porcentajes de error SCHLICHTER -INGESAN	65

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Registro fotográfico	72
ANEXO B. Resultados de Ensayos de Granulometría	72
ANEXO C. Calibración de matraz	72
ANEXO D. Resultados de ensayos de peso específico relativo	72
ANEXO E. Resultados de ensayo de permeabilidad	72
ANEXO F. Normas de INVIAS I.N.V. E – 123	72
ANEXO G. Normas de INVIAS I.N.V. E – 128	72
ANEXO H. Normas de INVIAS I.N.V. E – 130	72

RESUMEN

En este proyecto de grado se analizaron dos (2) tipos de arena (Río Tona y Trituradora INGESAN), con un porcentaje menor al 5% de finos y que pertenezca al Departamento de Santander. Para verificar dicho porcentaje de finos se realizaron tres (3) ensayos de granulometría para cada una de las muestras de arena donde posteriormente se promediaron los resultados obtenidos. Con estos datos se realizó un análisis del tamaño de partículas del suelo donde se clasificó la arena de la Trituradora INGESAN al grupo SW (Arena Bien Graduada) y para la muestra del Río Tona una clasificación SP (Arena Mal Graduada).

Una vez conocida la clasificación, se procedió a realizar 30 ensayos de permeabilidad y 30 ensayos de peso específico para cada muestra seleccionada la cual permitió comparar el coeficiente de permeabilidad obtenido en el laboratorio con las obtenidas a partir de las ecuaciones de Allen Hazen, Schlichter y Terzaghi, para posteriormente realizar el ajuste, el cual consistió en obtener las nuevas constantes, propias de cada arena y para cada ecuación, con el fin de disminuir el porcentaje de error. Las constantes obtenidas para el Río Tona fueron según Hazen ($C=10.24$), Schlichter ($C= 79.62$), Terzaghi ($C_1=10.244$ y $C_0 = 43.09$) y para la trituradora INGESAN según Hazen ($C= 18.08$), Schlichter ($C= 44.04$) y Terzaghi ($C_1= 18.08$ y $C_0= 65.97$); lo cual demuestra que no aplica según las ecuaciones originales propuestas por los autores.

Posteriormente, se calculó el porcentaje de error existente entre el coeficiente de permeabilidad de laboratorio y el obtenido con las nuevas constantes para cada ecuación estudiada para verificar la viabilidad de cada constante hallada.

ABSTRACT

In this research two (2) types of sand samples were analyzed (Tona River and INGESAN Crusher), each of these from the Santander region and with a 5% percent less of fines. To establish these percentages of fines Granulometry tests were ran to verify that the sand accomplish the objectives, in this way, three (3) tests were realized for each sand sample and the results were averaged. A grain size test of the soil also has been developed, with a calculated percentage of gravel, sands, and fines particles. With this data a graphic was drawn. The curve allow to identify the D_{10} (mm), D_{30} (mm) and D_{60} (mm). Taking into account this particle sizes, it was defined certain grade features as, uniformity coefficient (C_u) and curvature coefficient (C_c). Through soil categorization criteria ($C_u \geq 6$ y $C_c = 1 \leq C_c \leq 3$). In this way it was possible to know if the samples belong to SW (well-graded sand) or SP (poorly-graded sand).

Once sands category were identified, 30 trials of permeability and 30 trials of specific weight tests for each test type and for each sample were ran. With this data constant contrast using Allen Hazen, Schlichter y Terzaghi formulas was done. The outcomes were adjusted to decrease error percentage (%) of the results. The constants obtained for Tona river were according to Hazen ($C=10.24$), Schlichter ($C= 79.62$), Terzaghi ($C_1=10.244$ y $C_0 = 43.09$), and INGESAN crusher according to Hazen ($C= 18.08$), Schlichter ($C= 44.04$) y Terzaghi ($C_1= 18.08$ y $C_0= 65.97$). The data above shows it does not apply to the original equations state by the authors. Finally, error percentage between the “k” obtain in the lab and the k-adjusted was established, in order to verify the viability of the constant found.

INTRODUCCIÓN

Un suelo permeable es aquel que permite la circulación de un fluido a través de sí y está sujeto a las propiedades físicas del suelo como el tamaño de las partículas, distribución granulométrica, relación de vacíos, la temperatura, entre otros factores que facilita el transporte y almacenamiento de agua dentro de ella y que consecuentemente son de vital importancia en muchos diseños de obras civiles.

En esta tesis se trabajó con una de las propiedades más importantes para la Mecánica de Suelos como lo es la constante de conductividad hidráulica o denominada comúnmente como la constante de permeabilidad; en donde se comparó el coeficiente de permeabilidad obtenido en el laboratorio con los cálculos a partir de las fórmulas de Allen Hazen, Schlichter y Terzaghi, para de esta forma lograr establecer sus características, limitantes, rango de aplicación y replanteo de las mismas.

La constante de permeabilidad para arenas se determinó en el laboratorio mediante el ensayo de permeabilidad con cabeza constante. También se realizaron ensayos con el fin de determinar algunas variables complementarias, propias de cada ecuación estudiada.

La finalidad del presente trabajo es dar a conocer el comportamiento de las arenas más representativas del Río Tona y de la trituradora INGESAN S.A, cuando se presenten ante ellas problemas relativos a la conducción del agua, a través de los poros que poseen las arenas.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Comprobar la aplicación de las fórmulas de Allen Hazen, Schlichter y Terzaghi para la determinación del coeficiente de permeabilidad de las arenas del Río Tona y de la Trituradora INGESAN S.A fuente la playa de la vía Bucaramanga-Matanza.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleccionar arenas que contengan un porcentaje menor al 5% de finos del Departamento de Santander.
- Realizar ensayos de granulometría, gravedad específica relativa de suelos y permeabilidad en arenas.
- Verificar las constantes de permeabilidad determinadas por las formulas de Allen Hazen, Schlichter y Terzaghi de las arenas escogidas.
- Hacer recomendaciones acerca de las limitaciones y rangos de aplicación de las formulas evaluadas.
- Evaluar la cantidad de flujo de agua filtrado a través de dos muestras de arena.

2. ANTECEDENTES

HENRY DARCY (1803-1858)¹

La Ley de Darcy describe, con base en experimentos de laboratorio, las características del movimiento del agua a través de un medio poroso. Es por esto que el caudal de un fluido que circula a través de un medio porosos lineal depende de varios factores como:

- Área (A) y Longitud (L)
- Características del fluido: Viscosidad (μ)
- Diferencias de Presión (DP)

Es importante mencionar que las otras variables del sistema, el caudal (Q) que circula por el medio poroso crece en forma directa con la diferencia de presión aplicada y con el área de flujo disponible y decrece cuando aumenta la longitud y la viscosidad del fluido.

$$Q = k * A * \frac{DP}{(\mu * L)} \quad (1)$$

Donde la constante que relaciona ambos términos de la ecuación se conoce como Permeabilidad del medio poroso y constituye una propiedad de gran importancia.

La Ley de Darcy es una de las piezas fundamentales de la mecánica de los suelos. A partir de los trabajos iniciales de Darcy, un trabajo monumental para la época, muchos otros investigadores han analizado y puesto a prueba esta ley. A través de estos trabajos posteriores se ha podido determinar que mantiene su

¹ JUAREZ BADILLO-RICO RODRIGUEZ. Mecánica de Suelos. Fundamentos de la Mecánica de Suelos. Limusa. Tomo I. México. 2000.

validez para la mayoría de los tipos de flujo de fluidos en los suelos. Para filtraciones de líquidos a velocidades muy elevadas y la de gases a velocidades muy bajas, la ley de Darcy deja de ser válida.

En el caso de agua circulando en suelos, existen evidencias abrumadoras en el sentido de verificar la vigencia de la Ley de Darcy para suelos que van desde los limos hasta las arenas medias. Asimismo es perfectamente aplicable en las arcillas, para flujos en régimen permanente.

Para suelos de mayor permeabilidad que la arena media, deberá determinarse experimentalmente la relación real entre el gradiente y la velocidad para cada suelo y porosidad estudiados.

- KARL VON TERZAGHI (1883-1963)

La fórmula Terzaghi para terrenos arenosos se expresa:

$$K = C_1 * D_{10}^2 * (0,7 + 0,03 t) \text{ cm/seg} \quad (2)$$

$$C_1 = C_0 \left(\frac{n - 0,13}{\sqrt[3]{1 - n}} \right)^2 \quad (3)$$

Teniendo C_0 los siguientes valores:

Arenas de granos lisos	$C_0 = 800$
Arenas de granos rugosos	$C_0 = 460$
Arenas con limo	$C_0 < 400$

- ALLEN HAZEN

La ecuación se establece según lo siguiente:

D_{10} = Se expresa como el diámetro en centímetros (cm) correspondiente al 10% en la curva granulométrica; motivo por el cual el autor de esta fórmula la denominó "Diámetro Efectivo".

La temperatura influye en el coeficiente de permeabilidad debido a que altera la viscosidad del agua, factor importante para determinar el coeficiente de permeabilidad en el laboratorio o en el campo. Por tal razón Hazen describe su fórmula así:

$$K = 116 * (0,7 + 0,03 t) * D_{10}^2 \text{ cm/seg} \quad (4)$$

Es importante aclarar que esta fórmula solo tiene validez para arenas bastante uniformes, cuyo diámetro efectivo variaba entre 0.1 y 0.3 mm. Por otro lado el coeficiente de la fórmula es el valor medio entre los hallados por Hazen el cual está el rango de 41 a 146.

- SCHLICHTER

Para Schlichter la temperatura fue un factor importante el cual la consideró:

$$K = 771 * \left(\frac{D_{10}^2}{C} \right) * (0.7 + 0.03 t) * \frac{\text{cm}}{\text{seg}} \quad (5)$$

Para tener una mejor conexión con las fórmulas que los anteriores autores consideraron se han realizado diferentes estudios con muestras de arenas del departamento de Santander el cual su aplicación ha tenido gran relevancia en dichos análisis, observaciones y conclusiones en cada uno de ellos, los cuales estos estudios se muestran a continuación:

Tabla1. Investigaciones recientes UPB

Investigadores y Fecha de Publicación	Arenas Estudiadas	Autores	Constantes Obtenidas
Ketty Plata (2007)	Pescadero	HAZEN	$C = 8,55$
		SCHLICHTER	$C = 92,435$
		TERZAGHI	$C_1 = 8,553$ $C_0 = 130,07$
	Bocas	HAZEN	$C = 7,74$
		SCHLICHTER	$C = 92,876$
		TERZAGHI	$C_1 = 7,738$ $C_0 = 175,30$
	Topos	HAZEN	$C = 8,37$
		SCHLICHTER	$C = 94,889$
		TERZAGHI	$C_1 = 8,372$ $C_0 = 154,22$
Héctor Bayona / Sergio Prada (2008)	Río Sogamoso	HAZEN	$C = 13,10$
		SCHLICHTER	$C = 61,81$
		TERZAGHI	$C_1 = 13,097$ $C_0 = 100,19$
	Río Magdalena	HAZEN	$C = 7,78$
		SCHLICHTER	$C = 101,72$
		TERZAGHI	$C_1 = 7,778$ $C_0 = 89,88$
Paula Moreno / Mauricio Vargas (2008)	Río Manco	HAZEN	$C = 32,47$
		SCHLICHTER	$C = 27,30$
		TERZAGHI	$C_1 = 32,467$ $C_0 = 757,35$
	Río Frío	HAZEN	$C = 88,14$
		SCHLICHTER	$C = 9,41$
		TERZAGHI	$C_1 = 88,141$ $C_0 = 759,19$
Jurley Vanessa Rincón / Luisa Fernanda Uribe (2009)	Río de Oro	HAZEN	$C = 8,91$
		SCHLICHTER	$C = 86,73$
		TERZAGHI	$C_1 = 8,908$ $C_0 = 133,29$
	Río Suratoque	HAZEN	$C = 6,20$
		SCHLICHTER	$C = 126,64$
		TERZAGHI	$C_1 = 6,204$ $C_0 = 93,09$
Fabián Orlando / Jaimes Quijano (2009)	Quebrada Aranzoque	HAZEN	$C = 37,71$
		SCHLICHTER	$C = 20,46$
		TERZAGHI	$C_1 = 37,714$ $C_0 = 303,77$

Fuente: Autor(es)

3. METODOLOGÍA

Para la realización de este proyecto se realizaron las siguientes actividades con el fin de darle un orden eficaz a la elaboración y cumplimiento de los objetivos del proyecto:

FASE I. Recopilación, Evaluación y Análisis de la información

Se estudiaron los principios de cada ensayo, las normas que los rigen para su ejecución, y así mismo su procedimiento para cada uno de los ensayos propuestos para esta investigación. La presentación de este documento está regida bajo la Norma Técnica Colombiana (INCONTEC).

Entre otras de las normas claves con que se basó este proyecto fue la norma INVIAS mencionada al final del documento.

FASE II. Selección de muestras

Para esta segunda fase, las muestras seleccionadas presentaron un porcentaje menor al 5% de finos y pertenecieron al Departamento de Santander. Para obtener esta selección se realizó el ensayo de granulometría descrita en el FASE III.

FASE III. Ensayos de laboratorio

Los ensayos que se utilizaron para esta investigación son: Ensayos de Granulometría, Ensayos de Permeabilidad y Ensayos de Peso Específico o Densidad Relativa de Sólidos.

FASE IV. Comparación de constantes Allen Hazen, Schlichter y Terzaghi

La Comparación de las constantes obtenidas en los ensayos de laboratorio son los resultados encontrados mediante las fórmulas de Allen Hazen, Schlichter y Terzaghi.

FASE V. Ajuste a constantes de Allen Hazen, Schlichter y Terzaghi.

El Ajuste a las constantes, se realizó con el fin de disminuir el porcentaje (%) de error de los resultados obtenidos en la Fase IV.

Para disminuir el factor de error propuesto en la fórmula de Allen Hazen & Schlichter se planteó de la siguiente forma:

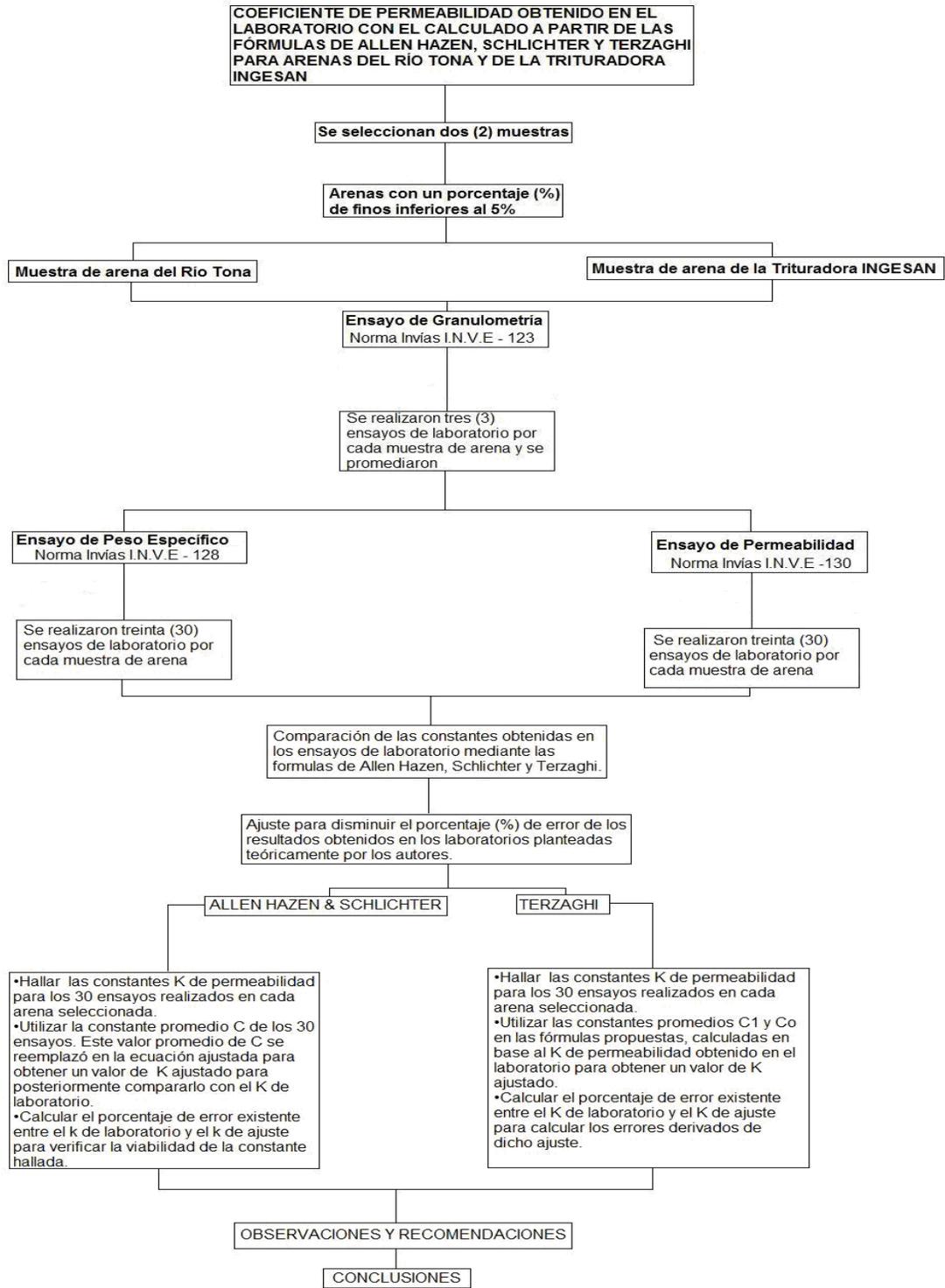
- Se hallaron las constantes K de permeabilidad para los 30 ensayos realizados en cada arena seleccionada.
- Se tomaron la constante promedio C de los 30 ensayos. Este valor promedio de C se reemplazó en la ecuación ajustada de Hazen para obtener un valor de K ajustado para posteriormente compararlo con el K de permeabilidad obtenido en el laboratorio.
- Se calculó el porcentaje de error existente entre el K de laboratorio y el K de ajuste para verificar la viabilidad de la constante hallada.

Y para el ajuste de disminución del factor de error propuesto para la fórmula de Terzaghi se debe realizar lo siguiente:

- Se Hallaron las constantes K de permeabilidad para los 30 ensayos realizados en cada arena seleccionada.
- Se utilizaron las constantes promedios C_1 y C_0 en las fórmulas propuestas, calculadas en base al K de permeabilidad obtenido en el laboratorio para obtener un valor de K ajustado.
- Se calculó el porcentaje de error existente entre el K de laboratorio y el K de ajuste para calcular los errores derivados de dicho ajuste.

En el flujograma que se presenta a continuación, se observa de una forma más clara y esquemática las fases que se deben realizar para el óptimo desarrollo de los objetivos del proyecto de investigación.

Figura 1. FLUJOGRAMA



4. MARCO TEÓRICO

4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS SUELOS²

El conocimiento de las principales características físicas de los suelos es de vital importancia en el estudio de la mecánica de suelos, pues mediante su atinada interpretación se puede predecir el futuro comportamiento de un terrero bajo cargas cuando dicho terrero presente diferentes contenidos de humedad.

4.1.1 Granulometría

El análisis granulométrico se refiere a la determinación de la cantidad en por ciento de los diversos tamaños de las partículas que constituyen el suelo. Para el conocimiento de la composición granulométrica de un determinado suelo existen diferentes procedimientos.

Para clasificar los tamaños de las partículas gruesas el procedimiento más utilizado es el del tamizado. Sin embargo, al aumentar la finura de los granos del tamizado se hace cada vez más complejo, teniendo entonces que recurrir a procedimientos por sedimentación. Conociendo la granulometría del material, se representa gráficamente para formar la curva granulométrica del mismo.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR MALLAS³

Un análisis granulométrico por mallas se efectúa tomando una cantidad medida de suelo seco, pasándolo a través de una serie de mallas. La cantidad de suelo retenido en cada malla se mide y se determina el porcentaje acumulado de suelo que pasa a través de cada malla. Este porcentaje generalmente es denominado el

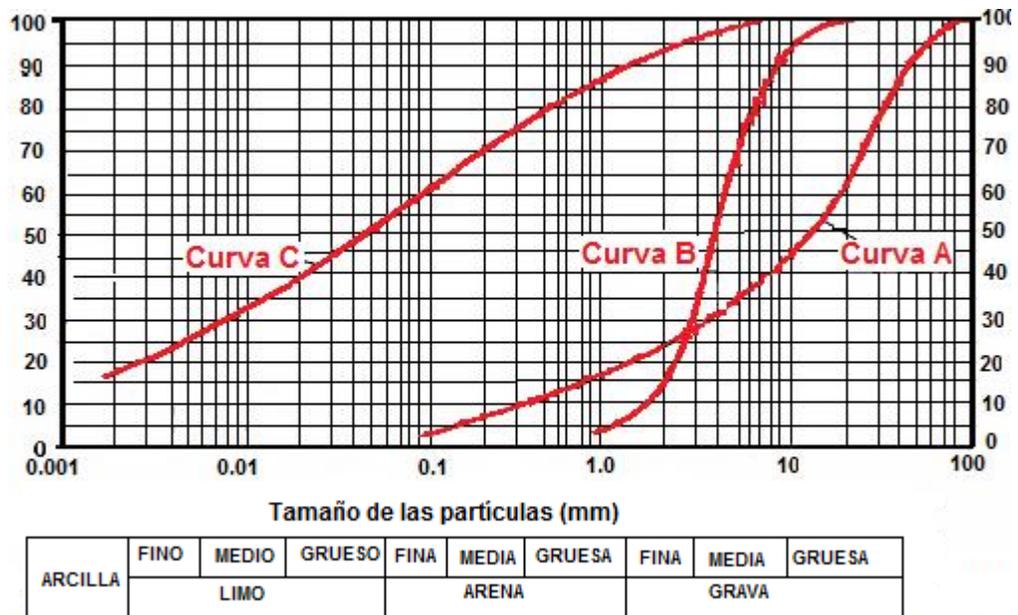
² CRESPO VILLALAZ, Carlos. Mecánica de Suelos y Cimentaciones. Editorial LIMUSA NORIEGA 5^a Edición. MÉXICO, 2006.

³ BRAJA M. Das, Principios de Ingeniería de Cimentaciones, Editorial THOMSON, 4^a edición. MÉXICO, 2001.

“porcentaje que pasa”.

La curva granulométrica es una representación gráfica de la distribución (del análisis granulométrico) de tamaño de partícula⁴. Como se ilustra en la siguiente figura 2:

Figura 2. Curvas típicas de distribución de partículas

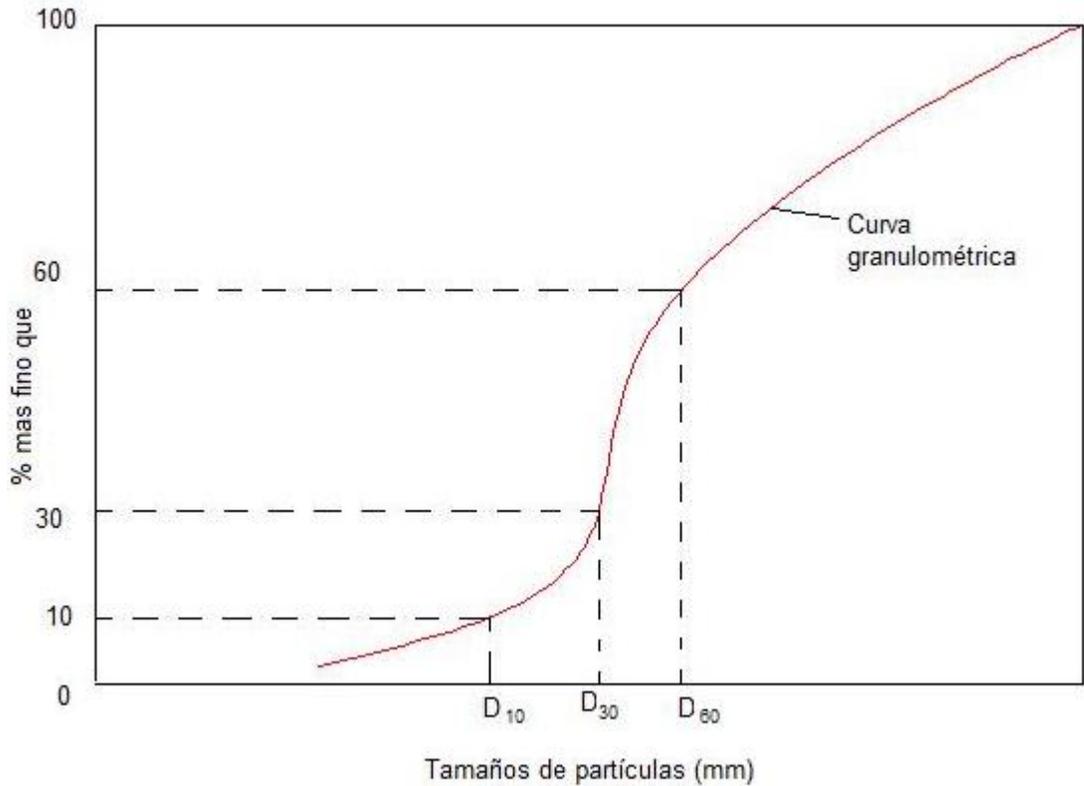


Fuente: R. Whitlow, Fundamentos de mecánica de suelos, Compañía editorial Continental, S.A. DE. C.V, Primera edición, México.1994.

Existe otro análisis de curvas de granulometría que puede llevarse a cabo usando ciertos valores geométricos llamados características de graduación. El cual consiste en localizar tres puntos indicativos en la curva granulométrica de los siguientes tamaños característicos: (Figura 3).

Figura 3. Características granulométricas

⁴ R. Whitlow, Fundamentos de mecánica de suelos, Compañía editorial Continental, S.A. DE. C.V, Primera edición, México.1994. Pág. 31.



Fuente: BRAJAN M. Das, Principios de Ingeniería de Cimentaciones, Editorial THOMSON, 4^a Edición, Editorial THOMSON. MÉXICO, 2001.

Como se pudo observar en la figura 3, los parámetros que determinan la curva granulométrica de suelo de grano grueso son: el coeficiente de uniformidad (Cu) y el coeficiente de graduación, o coeficiente de curvatura (Cc).⁵

Estos parámetros son:

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (6)$$

$$Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} D_{60}} \quad (7)$$

⁵ BRAJAN M. Das, Principios de Ingeniería de Cimentaciones, Editorial THOMSON, 4^a Edición, Editorial THOMSON. MÉXICO, 2001.

(D₆₀) (D₁₀)

D₁₀ = Tamaño máximo del 10% más pequeño de la muestra

D₃₀ = Tamaño máximo del 30% más pequeño de la muestra

D₆₀ = Tamaño máximo del 60% más pequeño de la muestra

Donde el D₁₀, D₃₀, D₆₀ son diámetros correspondientes al porcentaje que pasa 10,30 y 60% respectivamente.

4.2 SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (S.U.C.S)⁶

Los suelos de partículas finas y partículas gruesas, se distinguen mediante el cribado del material por la malla N° 200, Los suelos gruesos son si más 50% del material son retenidos en la malla N° 200, y fino si más del 50% de las partículas son menores que dicha malla. Los suelos se designan por símbolos del grupo, estos símbolos constan de un sufijo y un prefijo.

Los suelos gruesos se dividen en dos grandes grupos que son: las gravas y las arenas.

Gravas. Símbolo G. Se caracterizan porque más del 50% o más de la fracción gruesa es retenida por la malla N.4.

Arenas. Símbolo S. Se caracterizan porque más del 50% o más de la fracción gruesa pasa por la malla N.4.

Las gravas y arenas con un contenido de finos inferior al 5% reciben su nombre de acuerdo con su gradación, resultando los grupos GW, GP, SW y SP.

Letras sufijos:

⁶ BERRY Peter L y REID David, Mecánica de los Suelos, Editorial Mc GRAW-HILL. México. 1993.

W: bien graduado.

P: mal graduado.

Cu: Coeficiente de uniformidad.

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (8)$$

Cc: Coeficiente de curvatura.

$$Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (9)$$

Una grava es bien gradada si $Cu > 4$ y Cc está entre 1 y 3, de lo contrario será mal gradada.

Una arena es bien gradada si $Cu > 6$ y Cc está entre 1 y 3, de lo contrario será mal gradada.

Si el contenido de finos de las gravas y las arenas es superior al 12% las gravas y arenas serán arcillosas (C) o limosas (M), de acuerdo con la naturaleza de sus finos, lo cual se juzga a partir de los límites de plasticidad.

Los suelos finos se dividen en arcillas y limos de acuerdo con la ubicación de estos en la carta de plasticidad y pueden ser de alta compresibilidad (H) o baja compresibilidad (L). Además existen suelos finos con un alto contenido de materia orgánica, los cuales pertenecen al grupo O.

4.3 RELACIONES VOLUMÉTRICAS Y GAVIMÉTRICAS EN LOS SUELOS⁷

Con el fin de entender mejor las relaciones volumétricas y gravimétricas en los suelos se hace necesario distinguir las tres fases del suelo: la sólida, la líquida y la gaseosa. La fase sólida está formada por las partículas minerales del suelo, la líquida por el agua, aunque en el suelo puedan existir otros líquidos de menor significación; y la fase gaseosa comprende todo el aire si bien pueden estar presentes otros gases. La capa viscosa del agua adsorbida que presenta propiedades intermedias entre la fase sólida y líquida, suelen incluirse en esta última, pues es susceptible de desaparecer cuando el suelo es sometido a una fuerte evaporación.

Por otra parte, la fase líquida y gaseosa del suelo, suele comprenderse en el volumen de vacíos, mientras que la fase sólida, constituyen el volumen de los sólidos.

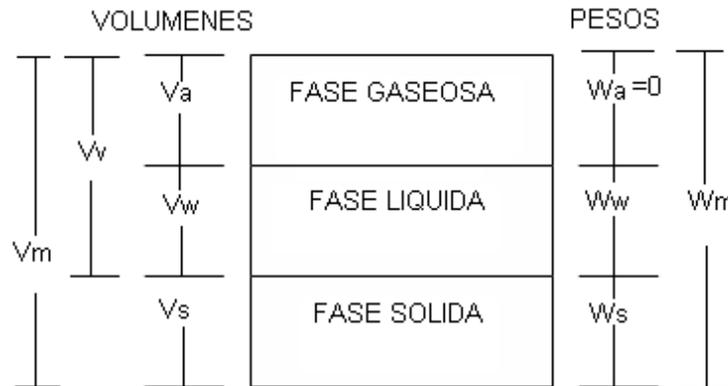
Se observa que un suelo está totalmente saturado cuando todos sus vacíos están ocupados por agua. Cuando el suelo se encuentra en tal circunstancia consta, como caso particular, con sólo dos fases: la sólida y la líquida.

Se debe tener en cuenta que algunos suelos contienen además materia orgánica en diversas formas y cantidades.

La figura 4, representa el esquema de una muestra de suelo, en el que aparecen las fases principales (sólida, líquida y gaseosa), así como los conceptos de uso más común como los símbolos que corresponden:

Figura 4. Esquema de una muestra de suelo en sus tres fases:

⁷ JUÁREZ Eulalio y RICO RODRÍGUEZ Alfonso, Mecánica de Suelos, Fundamentos de la Mecánica de Suelos, Editorial LIMUSA, Tomo I, MÉXICO, 2000.



Fuente: Autores

El significado de los símbolos es el siguiente:

V_m : Volumen total de la muestra de suelo. (Volumen de la masa).

V_s : Volumen de la fase sólida de la muestra. (Volumen de sólido).

V_v : Volumen de los vacíos de la muestra de suelo. (Volumen de vacíos).

V_w : Volumen de la fase líquida contenida en la muestra. (Volumen de agua).

V_a : Volumen de la fase gaseosa de la muestra. (Volumen de aire).

W_m : Peso total de la muestra del suelo. (Peso de la masa).

W_s : Peso de la fase sólida de la muestra de suelo. (Peso de los sólidos).

W_w : Peso de la fase líquida de la muestra. (Peso del agua).

W_a : Peso de la fase gaseosa de la muestra.

Las relaciones de volumen hacen referencia a las características que influyen en una muestra de suelo lo que se pueden definir de la siguiente forma⁸:

⁸ BRAJA M. Das, Principios de Ingeniería de Cimentaciones, Editorial THOMSON, 4ª Edición, MÉXICO, 2001.

- Relación de vacíos (e): Es la relación de volumen de vacíos entre el volumen de sólidos de suelo en una masa dada de suelo

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (10)$$

Donde V_v (Volumen de vacíos) y el V_s (Volumen de sólidos de suelos)

- Porosidad(n): Es la relación de volumen de vacíos entre el volumen de la muestra de suelo, donde V_t = Volumen total de suelo

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad (11)$$

Esta relación puede variar entre 0 y 100. Los valores reales están dentro del rango del 20% y 95%.

- Grado de Saturación (S): Es la relación de volumen de agua en los espacios vacíos entre el volumen de vacíos, generalmente expresado en porcentaje %, donde V_w = Volumen de agua

$$S = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \quad (12)$$

Varía entre 0 (suelo seco) a 100% (suelo totalmente saturado).

- Contenido de humedad o agua: Es la relación entre el peso de agua contenida en el mismo y el peso de su fase sólida, se expresa en porcentaje.

$$W (\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (13)$$

Donde W_s = peso de sólidos

W_w = peso del agua

4.4 COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD⁹

La capacidad de un suelo para permitir que lo atraviese el agua recibe el nombre de permeabilidad. El coeficiente de permeabilidad (K) puede definirse como la velocidad del flujo producida por un gradiente hidráulico unitario como se muestra en la siguiente ecuación:

$$v = k * i \quad (14)$$

Donde:

V = velocidad de flujo

K = constante de flujo o coeficiente de permeabilidad

i = gradiente hidráulico = $\Delta H / \Delta L$

El valor del coeficiente de permeabilidad “k” es usado como una medida de la resistencia al flujo ofrecida por el suelo y son varios factores los que intervienen, tales como:

- La densidad del suelo
- La distribución de tamaño de partícula
- La forma y orientación de partícula del suelo
- Grado de saturación
- Tipo de cationes
- Viscosidad del agua de suelo, que varía con la temperatura

Existen varios procedimientos para la determinación de la permeabilidad de los suelos: unos directos, llamados así porque se basa en pruebas cuyo objetivo

⁹ R. Whitlow, Fundamentos de Mecánica de Suelos, Compañía Editorial Continental, S.A. DE. C.V, Primera Edición. MÉXICO, 1994.

fundamental es la medición del coeficiente; otros indirectos, proporcionados, en forma secundaria, por pruebas y técnicas que primariamente persiguen otros fines.

Estos métodos son los siguientes¹⁰:

- Métodos Directos:
 - Permeámetro de carga constante
 - Permeámetro de carga variable
 - Prueba directa de los suelos in-situ

- Métodos Indirectos:
 - A partir de la curva granulométrica
 - A partir de la prueba de consolidación
 - A partir de la prueba horizontal de capilaridad

4.4.1 Métodos Directos Para Determinar La Constante De Permeabilidad K

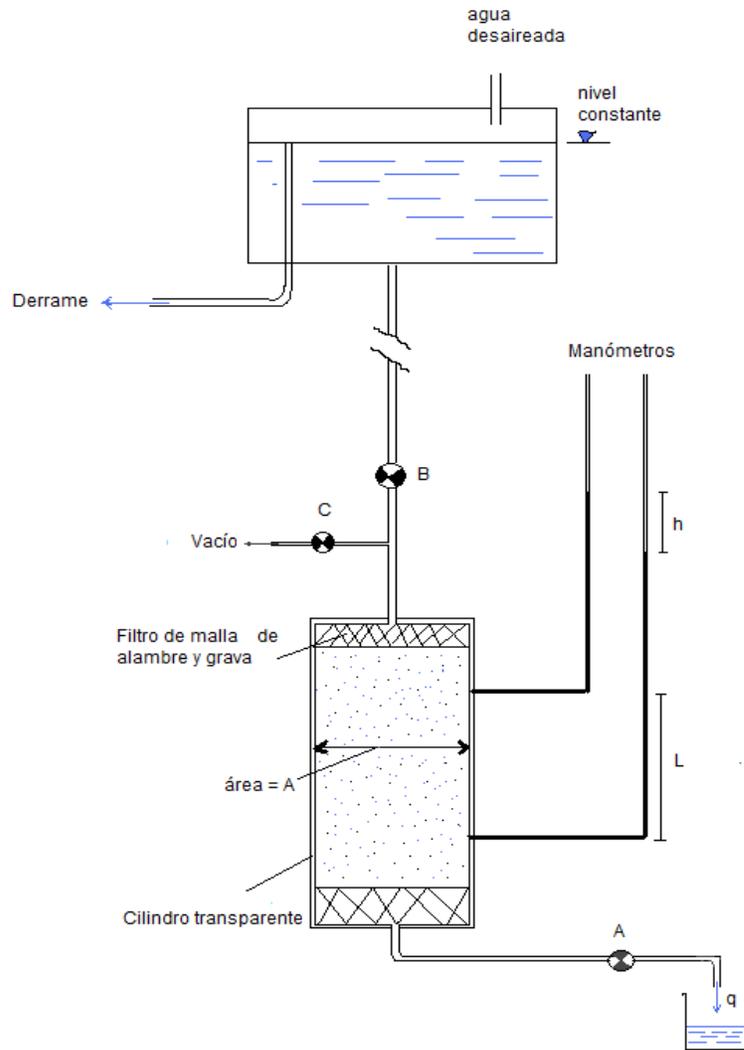
4.4.1.1 Permeámetro de carga constante¹¹

La prueba de carga constante se usa para determinar el coeficiente de permeabilidad (k) de suelos de granos gruesos tales como gravas y arenas. El aparato usado para este fin recibe el nombre de permeámetro de carga constante el cual se puede observar en la figura 5.

¹⁰ JUÁREZ Eulalio y RICO RODRÍGUEZ Alfonso, Mecánica de Suelos, Fundamentos de la Mecánica de Suelos, Editorial LIMUSA, Tomo I, MÉXICO, 2000.

¹¹ R. Whitlow, Fundamentos de Mecánica de Suelos, Compañía Editorial Continental, S.A. DE. C.V, Primera Edición. MÉXICO, 1994.

Figura 5. Aparato de prueba de carga constante



Fuente: Autores

El permeámetro de carga constante funciona de la siguiente forma: la muestra de suelo se introduce en un cilindro plástico transparente de metacrilato de metilo con filtros de malla de alambre y grava por encima y por debajo. En la pared lateral del cilindro existen varios de conexión de manómetros para tomar diferentes lecturas de pares de cargas de presión. El agua que fluye a través de la muestra proviene de un tanque o deposito diseñado para mantener una carga constante, y la cantidad de agua se mide pesando el

recipiente del recolector.

Se observa la presencia de burbujas de aire las cuales pueden afectar los resultados, es imperativo asegurarse de que el aire se haya eliminado del sistema en la medida de lo posible. Esto se lleva a cabo por una parte, suministrando agua des aireada al tanque de carga constante, y por la otra aplicando un vacío a la muestra antes de iniciar la prueba.

En cuanto al flujo, se debe continuar hasta lograr un estado estable o flujo establecido, esto es hasta que los niveles en los tubos de los manómetros sean constantes.

Una vez que se ha alcanzado el estado estable, se mide la cantidad que fluye durante un tiempo dado y se registran las lecturas de los dos niveles manométricos. Después se modifica la velocidad de flujo y se repite el procedimiento. Se debe efectuar varias pruebas con velocidad de flujo y carga para establecer el valor promedio K. Para obtener el valor de K se aplica la Ley de Darcy a partir de la siguiente ecuación:

$$q = k * A * i \quad (15)$$

Donde:

$$k = q / A * i$$

$$k = QL / (A * ht) \quad (16)$$

Donde: Q = cantidad de agua recolectada en el tiempo (t s)

A = área de sección transversal de la muestra

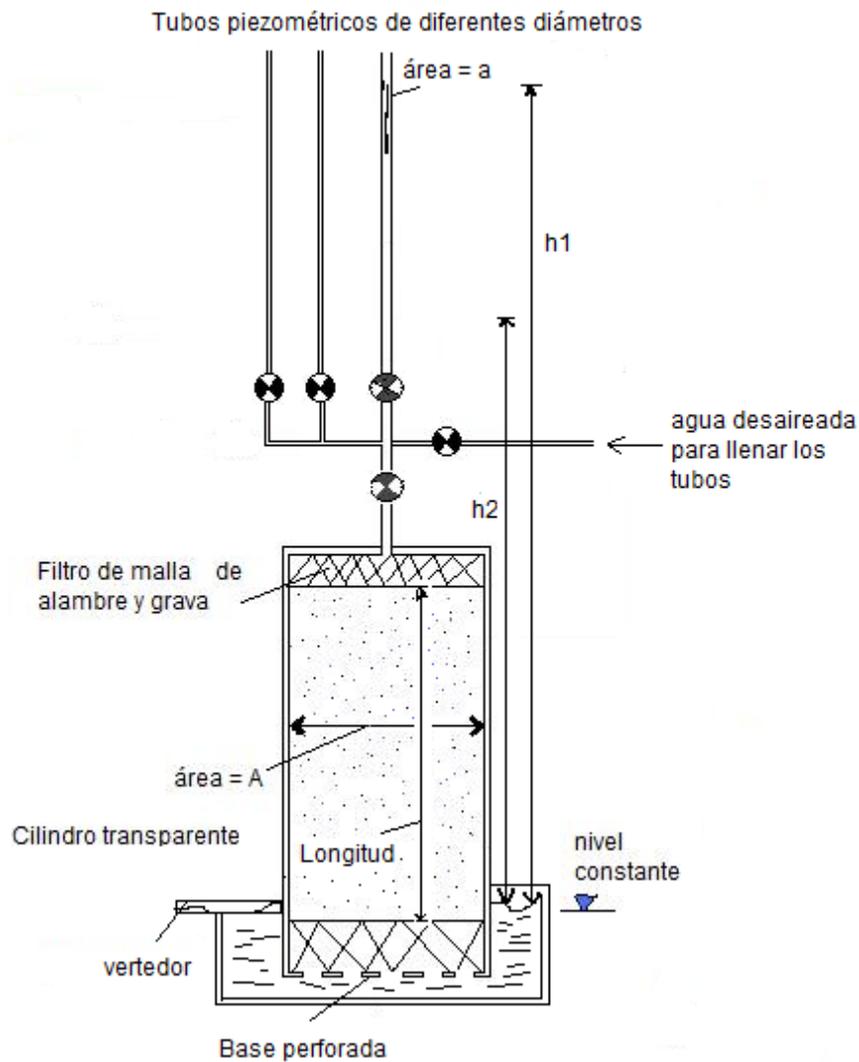
h = diferencia de niveles de los manómetros

L = distancia de los puntos de conexión de los manómetros

4.4.1.2 Permeámetro de carga variable

La prueba de carga variable se usa para determinar el coeficiente de permeabilidad de suelo de grano fino tales como arenas finas, limos y arcillas. Para estos suelos, el ritmo de flujo de agua que los atraviesa es demasiado pequeño para permitir mediciones precisas con el permeámetro de carga constante. En la figura 6 se muestra el permeámetro de carga variable

Figura 6. Aparato de carga variable



Fuente: Autores

Para la realización del perímetro de carga variable se utiliza un cilindro de 100

mm de diámetro (generalmente) y se introduce una muestra inalterada del suelo; el cilindro puede ser U100 de muestreo o el tubo corta núcleos que se usa en los ensayos de densidad en campo. Las muestras también pueden prepararse por compactación en un molde estándar.

Los extremos superiores e inferior de la muestra se protegen con un filtro de malla de alambre y grava. La base del cilindro queda sumergida en un recipiente con agua que cuenta con un vertedor de nivel constante, y el extremo superior se conecta a un tubo piezométrico abierto de diámetro conocido.

La prueba se lleva a cabo llenando la columna con agua desairada y permitiendo que se produzca la infiltración a través de la muestra. Se registra la altura de agua en la columna a diferentes tiempos durante la prueba, y está se repite con tubos piezométricos de diferente diámetro. Después de calcular los resultados se determina el valor de “k”. Por lo general se reportan también los pesos unitarios iniciales y final y el contenido de humedad de la muestra, partiendo de la Ley de Darcy: $q = k * A * i$

4.4.1.3 Pruebas directa de los suelos in-situ

Debido a los problemas asociados con la confiabilidad de las pruebas de laboratorio se deben emplear métodos de campo cuando los valores de permeabilidad tengan gran importancia. Las pruebas detalladas de bombeo en pozos múltiples pueden ser costosas, pero ofrecen un alto nivel de confiabilidad debido a la inflación de un amplio intervalo de características macro estructurales.

4.4.2 MÉTODOS INDIRECTOS PARA DETERMINAR LA CONSTANTE DE PERMEABILIDAD K

4.4.2.1 Método a partir de la curva granulométrica¹²:

Desde hace tiempo se ha tratado de establecer correlaciones entre la granulometría de un material y su permeabilidad, en los suelos arenosos gruesos, los poros entre partículas minerales son relativamente grandes y por ello la permeabilidad es alta, y en suelos de menor tamaño los poros entre los granos son más pequeños por lo cual estos materiales son de menor permeabilidad.

Una de las formas de calcular la constante de permeabilidad (K), por el método de la curva granulométrica se realiza reemplazando la fórmula de ALLEN, expresada de la siguiente manera:

$$K = C * (D_{10})^2 \text{ (cm/seg)} \quad (17)$$

En donde K es el coeficiente de permeabilidad (cm /seg) y el D_{10} (cm) es el diámetro efectivo de Hazen.

Hazen obtuvo su fórmula experimentando con arenas uniformes con un diámetro efectivo entre 0,1 y 3 mm; en estos suelos C varía entre 41 y 146. El valor de C = 116 suele mencionarse como un promedio de las experiencias efectuadas por Hazen.

La temperatura influye en el valor de la permeabilidad, por alterar la viscosidad del agua, teniendo en cuenta este factor la fórmula se plantea de la siguiente manera:

$$K = C (0,7 + 0,03 t) * (D_{10})^2 \text{ (cm/seg)} \quad (18)$$

¹² CRESPO VILLAZ, Carlos. Mecánica de Suelos y Cimentaciones. Editorial LIMUSA NORIEGA 5ª Edición. MÉXICO, 2006.

Siendo t la temperatura en °C,

Además lo dicho anteriormente, la formula de correlación propuesta por Schlichter la compacidad se expresa:

$$K = 771 * (D_{10})^2 * \frac{(0,7 + 0,03 t)}{C} \text{ (cm/seg)} \quad (19)$$

Donde c es una función de n que corresponde a los valores:

n = 0,26	0,38	0,46
C = 83,4	24,1	12,8

Para finalizar, la fórmula propuesta por Terzaghi para suelos arenosos es:

$$K = C_1 D_{10}^2 (0.7+0.03 t) \text{ (cm/seg)} \quad (20)$$

Donde:

$$C_1 = C_0 \left(\frac{n - 0,13}{\sqrt{1 - n}} \right)^2 \quad (21)$$

Donde n es la porosidad y C₀ es un coeficiente con los valores indicados como se muestra a continuación:

Arenas de granos redondeados	C ₀ = 800
Arenas de granos angulosos	C ₀ = 460
Arenas con limos	C ₀ < 400

4.4.2.2 Método a partir de la prueba de consolidación¹³:

Se debe tener en cuenta que los suelos, al igual que otros materiales usados en la construcción sufren deformaciones bajo el efecto de un esfuerzo aplicado sobre ellos. Sin embargo, si se considera que la mayoría de los materiales son elásticos, la relación que existe en los suelos entre esfuerzo y deformación es más complicada.

Por otra parte, la deformación que sufre el suelo bajo la acción de una carga no se presenta inmediatamente, después de la aplicación del esfuerzo, tal como sucede en los materiales elásticos. Debido a que para el reacomodamiento de las partículas, que es la parte principal de la deformación, necesita expulsar parte de los fluidos que contiene el suelo, y si el agua constituye la mayor parte de los fluidos del suelo es poco permeable y su expulsión requiere de mucho tiempo.

Una de las principales influencias fue la teoría propuesta por Terzaghi el cual propuso la siguiente ecuación:

$$C_v = \frac{K}{m_v \gamma_w} = \frac{k}{\frac{\Delta e}{\Delta p (1 + e_{ov})} \gamma_w} \quad (22)$$

Donde:

k = Permeabilidad hidráulica de la arcilla

Δe = cambio total de la relación de vacíos causada por un incremento Δp del esfuerzo

e_{prom} = relación de vacíos promedio durante la consolidación

m_v = Coeficiente volumétrico de compresibilidad

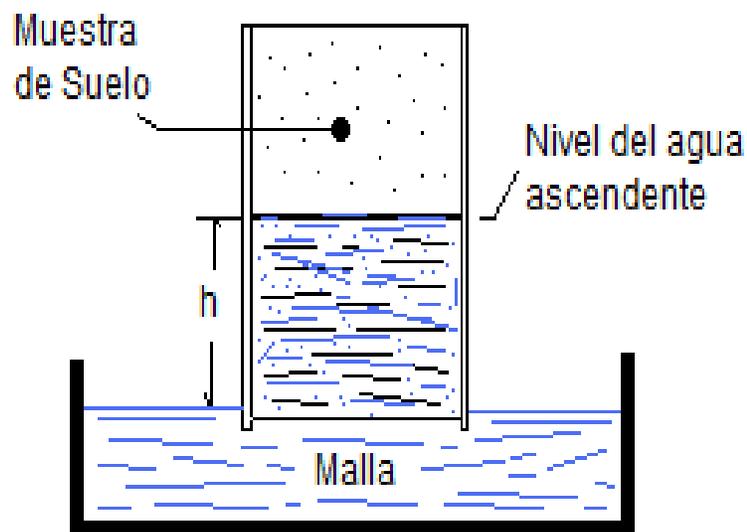
¹³ CRESPO VILLALAZ Carlos, Mecánica de Suelos y Cimentaciones, LIMUSA NORIEGA, 5ª Edición, MÉXICO, 2006

4.4.2.3 Método a partir de la prueba horizontal de capilaridad¹⁴

La prueba horizontal de capilaridad consiste en la rapidez con que se eleva el agua, por acción capilar, en un suelo; en la cual se puede obtener la medida indirecta de la permeabilidad de éste.

La prueba horizontal fue desarrollada por Terzaghi, en la cual planteó el método que consiste en colocar una muestra de suelo en un tubo vertical transparente, y este es detenido por una malla apropiada colocada en el extremo inferior. El tubo es fijado de tal modo que su base quede en el nivel del agua como se muestra en la figura 7.

Figura 7. Método de Terzaghi para estimación del coeficiente de permeabilidad k en el campo.



Fuente: Autores

¹⁴ JUÁREZ Eulio y RICO RODRÍGUEZ Alfonso, Mecánica de Suelos, Fundamentos de la Mecánica de Suelos, Editorial LIMUSA, Tomo I, MÉXICO, 2000.

5. RESULTADOS OBTENIDOS

Después de haberse realizado los diferentes ensayos con las muestras del Río Tona y Trituradora INGESAN, los resultados obtenidos se muestran a continuación:

5.1 GRANULOMETRÍA DE LOS AGREGADOS

5.1.1 Arena Río Tona

5.1.1.1 Porcentaje promedio de Arenas

% ARENAS Promedio: (Muestra 1 + Muestra 2 + Muestra 3) / 3

% ARENAS Promedio: (91,61 + 92,58 + 92,26) / 3

% ARENAS Promedio: 92,15

5.1.1.2 Porcentaje promedio de Gravas

% GRAVAS Promedio: (Muestra 1 + Muestra 2 + Muestra 3) / 3

% GRAVAS Promedio: (8,36 + 7,39 + 7,68) / 3

% GRAVAS Promedio: 7,81

5.1.1.3 Porcentaje promedio de Finos

% FINOS Promedio: (Muestra 1 + Muestra 2 + Muestra 3) / 3

% FINOS Promedio: (0,03 + 0,03 + 0,06) / 3

% FINOS Promedio: 0,04

5.1.1.4 Diámetro efectivo D_{10} promedio

D_{10} Promedio: (Muestra 1 + Muestra 2 + Muestra 3) / 3

D_{10} Promedio: (0,3mm + 0,3mm + 0,3mm) / 3

D_{10} Promedio: 0,30mm

5.1.1.5 D_{30} promedio

D_{30} Promedio: (Muestra 1 + Muestra 2 + Muestra 3) / 3

D_{30} Promedio: (0,40mm + 0,39mm + 0,39mm) / 3

D_{30} Promedio: 0,39mm

5.1.1.6 D60 promedio

D_{60} Promedio: (Muestra 1 + Muestra 2 + Muestra 3) / 3

D_{60} Promedio: (0,79mm + 0,79mm + 0,79mm) / 3

D_{60} Promedio: 0,79 mm

5.1.1.7. Coeficiente de uniformidad (Cu):

Cu: D_{60} / D_{10}

Cu: (0,79 / 0,30)

Cu: 2.63

5.1.1.8. Coeficiente de Curvatura (Cc):

Cc: $(D_{30})^2 / (D_{60} * D_{10})$

Cc: $(0,39)^2 / (0,79 * 0,30)$

Cc: 0,64

Clasificación del suelo de Arena del Río Tona

Según el sistema unificado de clasificación de suelos la arena del Río Tona no cumple con las dos condiciones Cu (Cu: 2.63) y Cc (Cc: 0,64) por tal razón esta se clasifica como SP (Arena limosa mal graduada, arenas con grava con pocos finos o sin ellos).

5.1.2 Arena Trituradora INGESAN

5.1.2.1 Porcentaje promedio de Arenas

% ARENAS Promedio: (Muestra 1 + Muestra 2 + Muestra 3) / 3

% ARENAS Promedio: (99,41 + 99,58 + 99,63) / 3

% ARENAS Promedio: 99.54

5.1.2.2 Porcentaje promedio de Gravas

% GRAVAS Promedio: (Muestra 1 + Muestra 2 + Muestra 3) / 3

% GRAVAS Promedio: (0,58 + 0,39 + 0,36) / 3

% GRAVAS Promedio: 0,44

5.1.2.3 Porcentaje promedio de Finos

% FINOS Promedio: (Muestra 1 + Muestra 2 + Muestra 3) / 3

% FINOS Promedio: (0,01 + 0,03 + 0,01) / 3

% FINOS Promedio: 0,017

5.1.2.4. D₁₀ promedio:

D₁₀ Promedio: (Muestra 1 + Muestra 2 + Muestra 3) / 3

D₁₀ Promedio: (0,2mm + 0,2mm + 0,17mm) / 3

D₁₀ Promedio: 0,19mm

5.1.2.5 D₃₀ promedio

D₃₀ Promedio: (Muestra 1 + Muestra 2 + Muestra 3) / 3

D₃₀ Promedio: (0,62mm + 0,65mm + 0,60mm) / 3

D₃₀ Promedio: 0,62mm

5.1.2.6 D₆₀ promedio

D₆₀ Promedio: (Muestra 1 + Muestra 2 + Muestra 3) / 3

D₆₀ Promedio: (1,5mm + 1,5mm + 1,5mm) / 3

D₆₀ Promedio: 1,5 mm

5.1.2.7 Coeficiente de uniformidad (Cu):

$$\text{Cu: } D_{60} / D_{10}$$

$$\text{Cu: } (1,50 / 0,19)$$

$$\text{Cu: } 7,89$$

5.1.2.8 Coeficiente de Curvatura (Cc):

$$\text{Cc: } D_{30}^2 / (D_{60} * D_{10})$$

$$\text{Cc: } 0,62^2 / (1,50 * 0,19)$$

$$\text{Cc: } 1,35$$

Clasificación del suelo de Arena de la Trituradora INGESAN

Según el sistema unificado de clasificación de suelos la arena de la Trituradora INGESAN cumple con las dos condiciones Cu (Cu: 7.89) y Cc (Cc: 1,35) por tal razón esta se clasifica como SW (Arena bien graduadas, arenas con gravas, con poco o nada de finos).

5.2 CONSTANTES DE PERMEABILIDAD

Se realizaron 30 ensayos de permeabilidad en el laboratorio, utilizando el método de “cabeza constante” para cada una de las arenas, donde posteriormente con estos resultados obtenidos, encontramos el promedio y la desviación estándar como se muestra en la tabla 2 y 3.

5.2.1 Tablas de resultados de permeabilidad de las muestras de estudio

5.2.1.1 Permeabilidad Arena Río Tona. A continuación en la tabla 2 se muestra el promedio y la desviación estándar de los $K_t(\text{cm/sg})$ y $K_{20}(\text{cm/sg})$ de los 30 ensayos realizados con el método de cabeza constante para la muestra de arena tomada en el río Tona.

Tabla 2. Permeabilidad del río Tona

<i>RIO TONA</i>			
Muestra	temperatura	Kt (cm/sg)	K₂₀(cm/sg)
1	23,0	0,018650212	0,017365213
2	24,0	0,013484744	0,012267072
3	23,0	0,012834717	0,011950405
4	23,0	0,009828693	0,009151496
5	23,0	0,011163185	0,010394042
6	24,0	0,014848219	0,013507425
7	23,0	0,017931378	0,016695906
8	24,0	0,013968206	0,012706877
9	24,0	0,012083733	0,010992572
10	24,0	0,014471809	0,013165005
11	24,0	0,01006247	0,009153829
12	24,0	0,014616198	0,013296356
13	24,0	0,015481097	0,014083154
14	23,0	0,00791891	0,007373297
15	23,0	0,016466668	0,015332115
16	23,0	0,017974013	0,016735604
17	23,0	0,016579237	0,015436927
18	23,0	0,013220968	0,012310043
19	24,0	0,015787207	0,014361623
20	24,0	0,016611534	0,015111513
21	23,0	0,010267277	0,009559861
22	23,0	0,012401427	0,011546968
23	23,0	0,009319953	0,008677808
24	23,0	0,007939702	0,007392657
25	23,0	0,016557481	0,01541667
26	24,0	0,018373179	0,016714081
27	24,0	0,015741001	0,014319589
28	24,0	0,013515506	0,012295056
29	24,0	0,015360595	0,013973533
30	24,0	0,019208555	0,017474022
		PROMEDIO	0,012958691
		MEDIANA	0,01323068
		DESVIACION	0,002918706

Fuente: Autor(es)

En la tabla 2, se puede observar que el valor promedio para el K₂₀ obtenido para el río Tona en el laboratorio fue de 0,012958691 cm/sg; que su mediana fue de 0,01323068 cm/sg y que su desviación estándar fue de 0,002918706 cm/sg.

5.2.1.2 Permeabilidad Arena Trituradora INGESAN S.A. A continuación en la tabla 3, se muestra el promedio y la desviación estándar de los K_t (cm/sg) y K_{20} (cm/sg) para los 30 ensayos realizados con el método de cabeza constante para la muestra de arena tomada de la Trituradora INGESAN S.A.

Tabla 3. Permeabilidad de la Trituradora INGESAN

<i>Trituradora INGESAN</i>			
Muestra	temperatura	Kt (cm/sg)	K₂₀(cm/sg)
1	23,0	0,01080229	0,010058012
2	23,0	0,011345614	0,010563902
3	23,0	0,013824235	0,012871746
4	23,0	0,006104036	0,005683468
5	23,0	0,008850996	0,008241162
6	23,0	0,008725718	0,008124516
7	23,0	0,007666336	0,007138125
8	23,0	0,010125126	0,009427504
9	23,0	0,012832938	0,011948748
10	23,0	0,010315922	0,009605155
11	23,0	0,008817692	0,008210153
12	23,0	0,010434495	0,009715559
13	23,0	0,010926585	0,010173744
14	23,0	0,01248601	0,011625724
15	23,0	0,010244777	0,009538912
16	23,0	0,010417107	0,009699368
17	23,0	0,008626245	0,008031896
18	23,0	0,010912384	0,010160521
19	23,0	0,006777974	0,006310972
20	23,0	0,007832487	0,007292829
21	24,5	0,011147454	0,010027135
22	24,5	0,00979151	0,008807463
23	24,5	0,010042557	0,00903328
24	24,5	0,008153566	0,007334133
25	24,0	0,00907437	0,008254954
26	24,0	0,009440004	0,008587572
27	24,0	0,012342096	0,011227605
28	24,0	0,009280167	0,008442168
29	24,5	0,010541715	0,009482272
30	24,0	0,009781709	0,008898421
		PROMEDIO	0,009150567
		MEDIANA	0,009230392
		DESVIACION	0,00161517

Fuente: Autor(es)

En la tabla 3, se puede observar que el valor promedio para el K_{20} obtenido de la Trituradora INGESAN de acuerdo a los cálculos fue de 0,009150567 cm/sg, la

mediana de 0,009230392 cm/sg y la desviación estándar de 0,00161517 cm/sg.

5.3 PESO ESPECÍFICO DE LOS SÓLIDOS

Se realizaron 30 ensayos de peso específico para cada una de las muestras de estudio (río Tona y Trituradora INGESAN), donde se obtuvieron el promedio, la mediana y la desviación estándar, como se muestra en la tabla 4.

5.3.1 Tablas de resultados de los pesos específicos de las arenas seleccionadas para la investigación.

5.3.1.1. Peso Específico De Arena Del Río Tona. En la tabla 4 se muestra el GS (Gravedad específica) promedio de los 30 ensayos trabajados en el laboratorio:

En la tabla 4 se puede observar que el valor promedio del peso específico de sólidos de acuerdo a los cálculos es de 2,75, mediana de 2,75 y una desviación estándar de 0,023.

5.3.1.2. Peso Específico Arena De La Trituradora INGESAN

En la tabla 5 se observa el promedio y la desviación estándar de los 30 ensayos realizados en el laboratorio correspondientes a la arena de la Trituradora INGESAN

Tabla 4. Peso Específico de sólidos del Río Tona.

GS RIO TONA	
MUESTRA	GS
1	2,77
2	2,76
3	2,75
4	2,81
5	2,78
6	2,73
7	2,75
8	2,75
9	2,73
10	2,72
11	2,75
12	2,76
13	2,76
14	2,77
15	2,74
16	2,75
17	2,72
18	2,76
19	2,72
20	2,76
21	2,72
22	2,75
23	2,75
24	2,78
25	2,76
26	2,72
27	2,72
28	2,75
29	2,72
30	2,71
PROMEDIO	2,75
MEDIANA	2,75
DESVIACION	0,023

Fuente: Autor(es)

Tabla 5. Peso Específico de sólidos de la Trituradora INGESAN.

GS Trituradora INGESAN	
MUESTRA	GS
1	2,78
2	2,80
3	2,78
4	2,78
5	2,79
6	2,78
7	2,80
8	2,79
9	2,80
10	2,79
11	2,81
12	2,82
13	2,81
14	2,80
15	2,78
16	2,80
17	2,80
18	2,80
19	2,81
20	2,84
21	2,78
22	2,80
23	2,80
24	2,75
25	2,80
26	2,83
27	2,84
28	2,78
29	2,81
30	2,78
PROMEDIO	2,80
MEDIANA	2,80
DESVIACION	0,019

Fuente: Autor(es)

En la tabla 5 se puede observar que el valor promedio del peso específico de sólidos de acuerdo a los cálculos obtenidos es de 2,80 y la desviación estándar de 0,019.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Se analizaron por medio de los ensayos de laboratorio la permeabilidad y el peso específico de sólidos de las muestras objeto de estudio (río Tona y Trituradora INGESAN).

A través de los resultados obtenidos por las muestras seleccionadas se realizaron los cálculos para las diferentes ecuaciones propuestas por Allen Hazen, Terzaghi, Schlichter.

6.1 ARENA DEL RIO TONA

Para este tipo de arena se realizaron 30 ensayos, donde se obtuvieron los resultados de la relación volumétrica y gravimétrica.

En la tabla 6 se puede observar los diferentes promedios de volúmenes, los cuales dieron como resultado: $V_a: 0,0 \text{ cm}^3$; $V_w: 73.18 \text{ cm}^3$; $V_s: 66.36 \text{ cm}^3$; $V_v: 73.18 \text{ cm}^3$; $V_t: 139.54 \text{ cm}^3$; en cuanto los promedios de peso se pudo observar: $W_a: 0 \text{ gr.}$; $W_w: 73.2 \text{ gr.}$; $W_s: 182.5 \text{ gr.}$; $W_v: 73.2 \text{ gr.}$; $W_t: 255.7$; y por último los valores de relaciones volumétricas y gravimétricas fueron: $W\%: 41.3 \%$; $S_r: 1,00$; $n: 0,524$; $e: 1.137$; $\gamma_d: 1.31 \text{ gr/cm}^3$; $\gamma_m: 1,83 \text{ gr/cm}^3$

Por medio de los resultados expuestos anteriormente (de las relaciones volumétricas y gravimétricas) los cuales se analizaron con el fin de calcular la porosidad de la muestra del río Tona.

Tabla 6. RELACIONES VOLUMETRICAS Y GRAVIMETRICAS DEL RIO TONA

ENSAYO	VOLUMENES					PESOS					RELACIONES					
	Nº	Va cc.	Vw cc.	Vs cc.	Vv cc.	Vt cc.	Wa gr.	Ww gr.	Ws gr.	Wv gr.	Wt gr.	W% %	Sr %	n	e	γ_m gr/cc.
1	0	92,01	42,04	92,0	134,04	0	92,0	115,6	92,0	207,6	79,6	1,00	0,686	2,189	1,55	0,86
2	0	79,86	54,18	79,9	134,04	0	79,9	149,0	79,9	228,9	53,6	1,00	0,596	1,474	1,71	1,11
3	0	71,42	75,09	71,4	146,51	0	71,4	206,5	71,4	277,9	34,6	1,00	0,487	0,951	1,90	1,41
4	0	61,79	72,25	61,8	134,04	0	61,8	198,7	61,8	260,5	31,1	1,00	0,461	0,855	1,94	1,48
5	0	68,75	71,53	68,7	140,28	0	68,7	196,7	68,7	265,4	35,0	1,00	0,490	0,961	1,89	1,40
6	0	87,64	58,87	87,6	146,51	0	87,6	161,9	87,6	249,5	54,1	1,00	0,598	1,489	1,70	1,11
7	0	63,40	67,53	63,4	130,92	0	63,4	185,7	63,4	249,1	34,1	1,00	0,484	0,939	1,90	1,42
8	0	57,47	73,45	57,5	130,92	0	57,5	202,0	57,5	259,5	28,5	1,00	0,439	0,782	1,98	1,54
9	0	74,20	56,73	74,2	130,92	0	74,2	156,0	74,2	230,2	47,6	1,00	0,567	1,308	1,76	1,19
10	0	85,21	70,65	85,2	155,86	0	85,2	194,3	85,2	279,5	43,9	1,00	0,547	1,206	1,79	1,25
11	0	73,63	63,53	73,6	137,16	0	73,6	174,7	73,6	248,3	42,1	1,00	0,537	1,159	1,81	1,27
12	0	60,88	73,16	60,9	134,04	0	60,9	201,2	60,9	262,1	30,3	1,00	0,454	0,832	1,96	1,50
13	0	69,27	67,89	69,3	137,16	0	69,3	186,7	69,3	256,0	37,1	1,00	0,505	1,020	1,87	1,36
14	0	68,68	59,13	68,7	127,81	0	68,7	162,6	68,7	231,3	42,2	1,00	0,537	1,162	1,81	1,27
15	0	80,93	59,35	80,9	140,28	0	80,9	163,2	80,9	244,1	49,6	1,00	0,577	1,364	1,74	1,16
16	0	77,87	62,40	77,9	140,27	0	77,9	171,6	77,9	249,5	45,4	1,00	0,555	1,248	1,78	1,22
17	0	64,42	75,85	64,4	140,28	0	64,4	208,6	64,4	273,0	30,9	1,00	0,459	0,849	1,95	1,49
18	0	63,06	70,98	63,1	134,04	0	63,1	195,2	63,1	258,3	32,3	1,00	0,470	0,888	1,93	1,46
19	0	66,75	73,53	66,7	140,28	0	66,7	202,2	66,7	268,9	33,0	1,00	0,476	0,908	1,92	1,44
20	0	66,13	74,15	66,1	140,28	0	66,1	203,9	66,1	270,0	32,4	1,00	0,471	0,892	1,92	1,45
21	0	75,63	65,89	75,6	141,52	0	75,6	181,2	75,6	256,8	41,7	1,00	0,534	1,148	1,81	1,28
22	0	59,86	74,18	59,9	134,04	0	59,9	204,0	59,9	263,9	29,3	1,00	0,447	0,807	1,97	1,52
23	0	65,08	75,20	65,1	140,28	0	65,1	206,8	65,1	271,9	31,5	1,00	0,464	0,865	1,94	1,47
24	0	68,36	68,80	68,4	137,16	0	68,4	189,2	68,4	257,6	36,1	1,00	0,498	0,994	1,88	1,38
25	0	72,68	67,60	72,7	140,28	0	72,7	185,9	72,7	258,6	39,1	1,00	0,518	1,075	1,84	1,33
26	0	70,93	69,35	70,9	140,28	0	70,9	190,7	70,9	261,6	37,2	1,00	0,506	1,023	1,87	1,36
27	0	83,90	71,96	83,9	155,86	0	83,9	197,9	83,9	281,8	42,4	1,00	0,538	1,166	1,81	1,27
28	0	79,88	60,40	79,9	140,28	0	79,9	166,1	79,9	246,0	48,1	1,00	0,569	1,322	1,75	1,18
29	0	85,11	56,73	85,1	141,83	0	85,1	156,0	85,1	241,1	54,6	1,00	0,600	1,500	1,70	1,10
30	0	100,65	58,33	100,7	158,98	0	100,7	160,4	100,7	261,1	62,8	1,00	0,633	1,726	1,64	1,01
Promedio	0	73,18	66,36	73,18	139,54	0	73,2	182,5	73,2	255,7	41,3	1,00	0,524	1,137	1,83	1,31

Fuente: Autor(es)

6.1.1 Análisis de las constantes de Allen Hazen, Terzaghi y Schlichter para la arena del río Tona.

Después de conocer los datos de la tabla 7, se procede a realizar un análisis de

las constantes calculadas de las ecuaciones de Allen Hazen, Terzaghi y Schlichter teniendo como base un valor real de (K) hallado en los ensayos de laboratorio, para posteriormente hacer la comparación con las constantes propuestas teóricamente por los autores anteriormente mencionados.

En la tabla 7 se observan las diferentes constantes obtenidas de la aplicación de las ecuaciones de Allen Hazen, Schlichter y Terzaghi, con base a las constantes obtenidas en los ensayos de laboratorio, de la muestra del río Tona.

Tabla 7. COMPARACIÓN DE LAS CONSTANTES PERMEABILIDAD - RÍO TONA

Ensayo N°	Volumen (Q) (cm ³)	Area (A) (cm ²)	Cabeza (h) (cm)	Altura (L) (cm)	Temp. (°C)	n (Lab.)	K (Lab.)	C (Allen.)	C (Schli.)	C1 (Terza.)	Co (Terza.)
1	1582	31,17	65,0	4,30	23,0	0,686	0,0174	13,88	55,54	13,88	20,70
2	1144	31,17	65,0	4,30	24,0	0,596	0,0123	9,60	80,32	9,60	24,19
3	950	31,17	62,0	4,70	23,0	0,487	0,0120	9,55	80,71	9,55	47,88
4	808	31,17	63,0	4,30	23,0	0,461	0,0092	7,32	105,39	7,32	44,24
5	863	31,17	62,0	4,50	23,0	0,490	0,0104	8,31	92,80	8,31	40,90
6	1126	31,17	63,5	4,70	24,0	0,598	0,0135	10,57	72,95	10,57	26,26
7	1485	31,17	62,0	4,20	23,0	0,484	0,0167	13,35	57,77	13,35	68,41
8	1179	31,17	63,2	4,20	24,0	0,439	0,0127	9,94	77,54	9,94	70,86
9	1041	31,17	64,5	4,20	24,0	0,567	0,0110	8,60	89,64	8,60	25,82
10	1056	31,17	65,0	5,00	24,0	0,547	0,0132	10,30	74,85	10,30	35,01
11	821	31,17	64,0	4,40	24,0	0,537	0,0092	7,16	107,64	7,16	25,91
12	1183	31,17	62,0	4,30	24,0	0,454	0,0133	10,40	74,11	10,40	66,12
13	1244	31,17	63,0	4,40	24,0	0,505	0,0141	11,02	69,97	11,02	49,03
14	667	31,17	61,5	4,10	23,0	0,537	0,0074	5,89	130,81	5,89	21,24
15	1273	31,17	62,0	4,50	23,0	0,577	0,0153	12,26	62,91	12,26	34,58
16	1401	31,17	62,5	4,50	23,0	0,555	0,0167	13,38	57,63	13,38	43,14
17	1302	31,17	63,0	4,50	23,0	0,459	0,0154	12,34	62,48	12,34	75,55
18	1104	31,17	64,0	4,30	23,0	0,470	0,0123	9,84	78,35	9,84	55,57
19	1250	31,17	63,5	4,50	24,0	0,476	0,0144	11,24	68,61	11,24	61,08
20	1326	31,17	64,0	4,50	24,0	0,471	0,0151	11,82	65,20	11,82	66,31
21	812	31,17	64,0	4,54	23,0	0,534	0,0096	7,64	100,89	7,64	28,07
22	1020	31,17	63,0	4,30	23,0	0,447	0,0115	9,23	83,53	9,23	62,08
23	732	31,17	63,0	4,50	23,0	0,464	0,0087	6,94	111,15	6,94	41,06
24	608	31,17	60,0	4,40	23,0	0,498	0,0074	5,91	130,47	5,91	27,49
25	1259	31,17	61,0	4,50	23,0	0,518	0,0154	12,32	62,56	12,32	50,29
26	1329	31,17	58,0	4,50	24,0	0,506	0,0167	13,08	58,95	13,08	57,94
27	1113	31,17	63,0	5,00	24,0	0,538	0,0143	11,20	68,81	11,20	40,15
28	1028	31,17	61,0	4,50	24,0	0,569	0,0123	9,62	80,14	9,62	28,41
29	1156	31,17	61,0	4,55	24,0	0,600	0,0140	10,93	70,51	10,93	26,86
30	1268	31,17	60,0	5,10	24,0	0,633	0,0175	13,67	56,39	13,67	27,68
Promedio	1104	31,17	62,6	4,48	23,5	0,524	0,0130	10,24	79,62	10,244	43,09

Fuente: Autor(es)

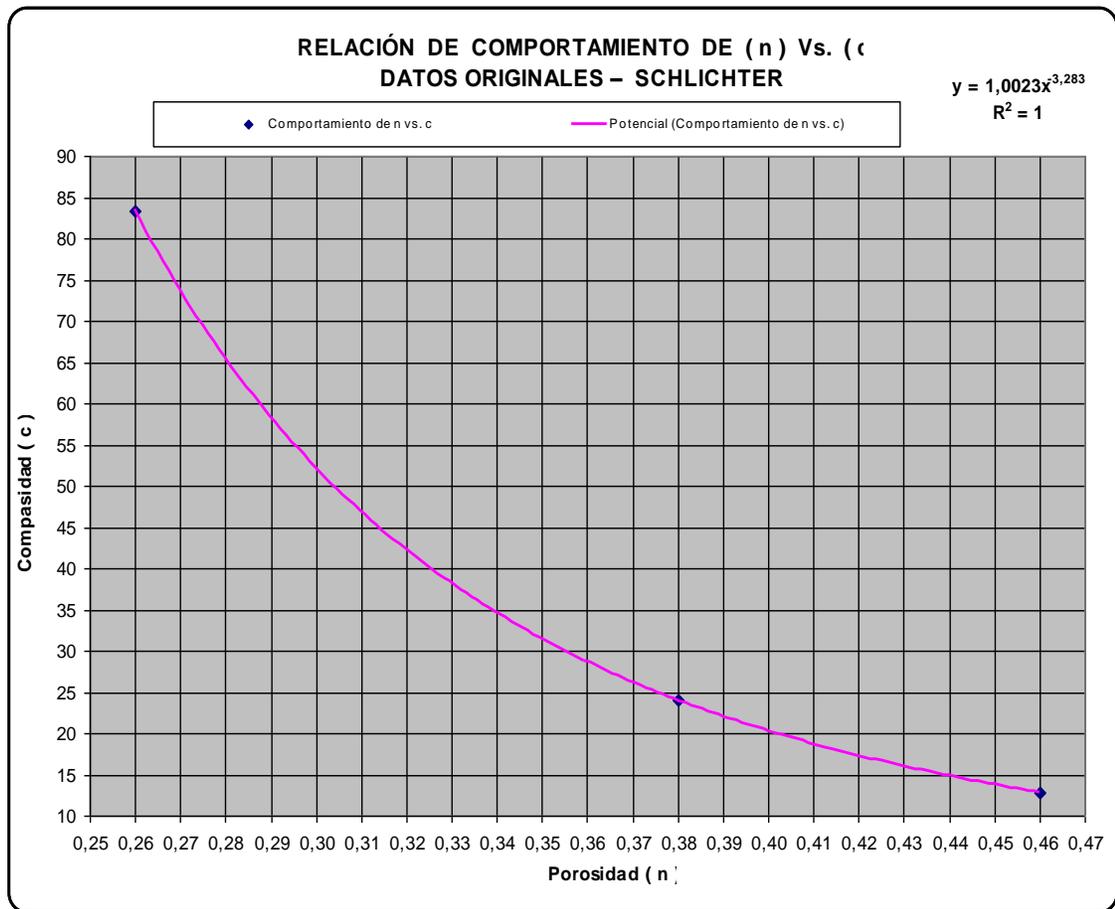
En la tabla 7 se puede apreciar que las constantes promedio obtenidas a partir del coeficiente de permeabilidad hallado en el laboratorio de las muestras las arenas del Río Tona son las siguientes: constante de permeabilidad de Allen Hazen C=10,24; para Schlichter C=79,62; para Terzaghi C1=10,244 y para la constante Co = 43,09.

Análisis de la constante obtenida en la fórmula de Schlichter

En la fórmula de Schlichter se trabajó con un valor promedio ya que no se encontró una correlación ni tendencia de ningún tipo entre la porosidad (n) y las constantes encontradas en los 30 ensayos. Por esta razón se utilizó el valor promedio de la constante de los ensayos realizados.

La figura 8 muestra la correlación que hizo Schlichter para calcular las respectivas constantes a usar dependiendo de los tipos de arena.

Figura 8. Relación de comportamiento de la Porosidad (n) Vs Compacidad (c). Datos originales–Schlichter.



Fuente: Autor(es)

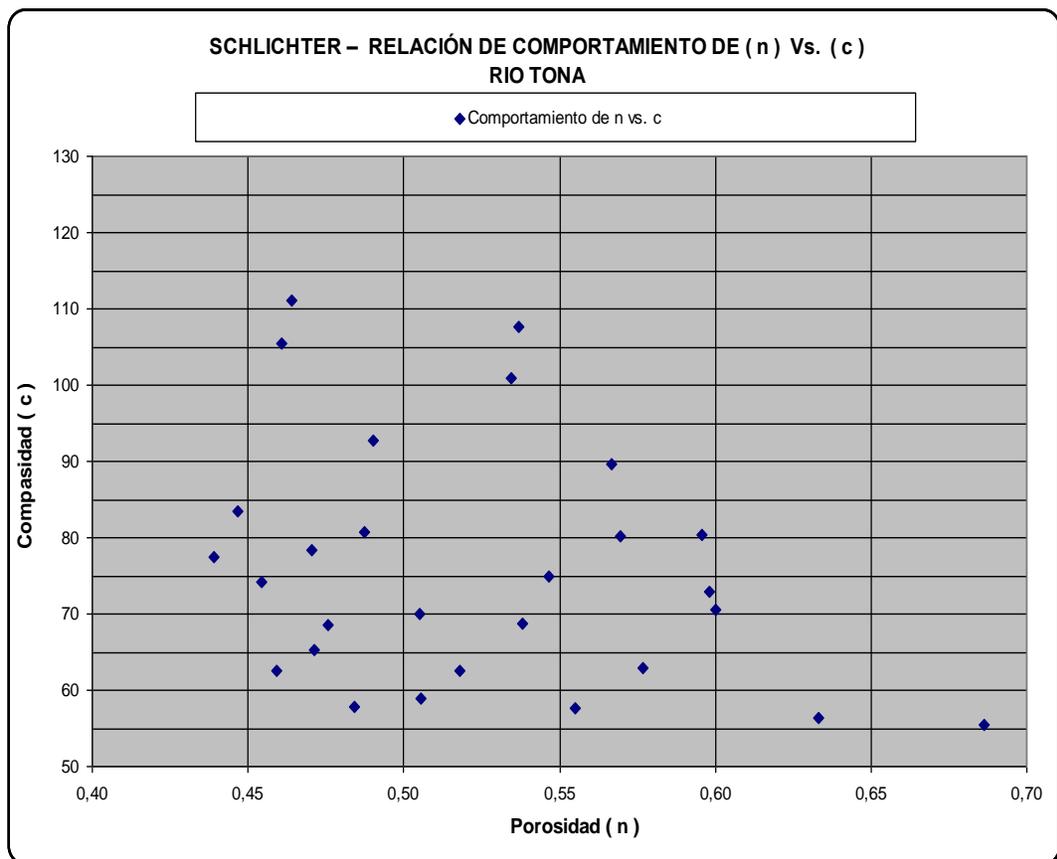
La figura anterior muestra una correlación $R^2=1$ con su fórmula $Y=1,0023x^{-3,283}$,

está calculada con los valores:

n	C Schlichter
0,26	83,4
0,38	24,1
0,46	12,8

La figura 9 es el resultado a partir de los datos obtenidos de los cálculos de las constantes de Schlichter Vs la porosidad, para la arena del Río Tona.

Figura 9. Relación de comportamiento de la Porosidad (n) Vs Compacidad (c).
Datos Río Tona



Fuente: Autor (es)

En la figura 9 se observa que en la arena del Río Tona no existe ninguna correlación o tendencia entre la porosidad (n) y las constantes calculadas con

base a las constantes obtenidas en el laboratorio.

Análisis de la constante obtenida en la fórmula de Terzaghi

Según la fórmula de Terzaghi es necesario calcular dos (2) constantes C_1 y C_o (donde una está en función de la otra).

C_o está en función del tipo de suelo:

Donde la determinación de C_o según la forma de los agregados.

Arenas de granos redondeados $C_o = 800$

Arenas de granos angulosos $C_o = 460$

Arenas con limos $C_o < 400$

C_1 está en función de la porosidad (n).

En este proyecto se tomó un valor promedio de todos los C_o obtenidos en los ensayos por tratarse de un mismo suelo. También se tomó un valor promedio de C_1 debido a la similitud en los valores de la porosidad.

6.1.2. Análisis del ajuste propuesto para disminuir los porcentajes de error en las ecuaciones de Allen Hazen, Terzaghi y Schlichter para la arena del río Tona.

El ajuste realizado para este análisis fue propuesto como mecanismo de disminución del porcentaje de error existente entre la constante de permeabilidad obtenida en el laboratorio con respecto a las constantes teóricas de Allen Hazen , Terzaghi y Schlichter.

Ajuste propuesto para la ecuación de Allen Hazen

Para el ajuste de disminución del factor de error propuesto para la fórmula de Allen Hazen se planteó de la siguiente forma:

- Hallar las constantes K de permeabilidad para los 30 ensayos realizados en cada arena seleccionada.
- Tomar la constante promedio C de los 30 ensayos. Este valor promedio de C se reemplazó en la ecuación ajustada de Hazen para obtener un valor de K ajustado para posteriormente compararlo con el K de permeabilidad obtenido en el laboratorio.
- Calcular el porcentaje de error existente entre el K de laboratorio y el K de ajuste para verificar la viabilidad de la constante hallada.

Ajuste propuesto para la ecuación de Schlichter

Para el ajuste de disminución del factor de error propuesto para la fórmula de Schlichter se planteó de la siguiente forma:

- Hallar las constantes K de permeabilidad para los 30 ensayos realizados en cada arena seleccionada.
- Tomar la constante promedio C de los 30 ensayos. Este valor promedio de C se reemplazó en la ecuación ajustada de Schlichter para obtener un valor de K ajustado para posteriormente compararlo con el K de permeabilidad obtenido en el laboratorio.
- Calcular el porcentaje de error existente entre el k de laboratorio y el k de ajuste para verificar la viabilidad de la constante hallada.

Ajuste propuesto para la ecuación de Terzaghi

Para el ajuste de disminución del factor de error propuesto para la fórmula de Terzaghi se hizo lo siguiente:

- Hallar las constantes K de permeabilidad para los 30 ensayos realizados en cada arena seleccionada.
- Utilizar las constantes promedios C_1 y C_0 en las fórmulas propuestas, calculadas en base al K de permeabilidad obtenido en el laboratorio para obtener un valor de K ajustado.

- Calcular el porcentaje de error existente entre el K de laboratorio y el K de ajuste para calcular los errores derivados de dicho ajuste.

6.1.3 Análisis de porcentajes de error para los coeficientes K en las fórmulas de Terzaghi, Schlichter y Allen Hazen para la arena del río Tona

Después de realizar los ensayos de granulometría, permeabilidad y gravedad específica de sólidos, se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación en las tablas (8, 9 y 10). Paralelo a esto se calcularon los valores de permeabilidad a partir de las formulas de Terzaghi, Schlichter y Allen Hazen, comparando los errores de estas formulas respecto a los de los ensayos de laboratorio de la muestra objeto de estudio de los que se obtuvieron los valores reales.

Porcentajes de error Allen Hazen

La siguiente tabla muestra los porcentajes de error de los coeficientes de permeabilidad ajustados con respecto a los obtenidos en el laboratorio para la arena del el río Tona.

Tabla 8. PORCENTAJES DE ERROR ALLEN HAZEN - RIO TONA

PORCENTAJES DE ERROR ALLEN HAZEN - RIO TONA							
N°	K _{LAB} (cm ² /seg)	K _{AH.ORIGINAL} (cm ² /seg)	ERROR _{AH.ORIGINAL} (%)	K _{AH.AJUSTE} (cm ² /seg)	ERROR _{AH.AJUSTE} (%)	ERROR	RANGOS
1	0,017365213	0,145116	735,7	0,012815436	26,2	1,5	0-10
2	0,012267072	0,148248	1108,5	0,013092028	6,7	1,8	
3	0,011950405	0,145116	1114,3	0,012815436	7,2	2,1	
4	0,009151496	0,145116	1485,7	0,012815436	40,0	2,5	
5	0,010394042	0,145116	1296,1	0,012815436	23,3	3,1	
6	0,013507425	0,148248	997,5	0,013092028	3,1	4,0	
7	0,016695906	0,145116	769,2	0,012815436	23,2	5,5	
8	0,012706877	0,148248	1066,7	0,013092028	3,0	5,7	
9	0,010992572	0,148248	1248,6	0,013092028	19,1	6,2	
10	0,013165005	0,148248	1026,1	0,013092028	0,6	7,5	
11	0,009153829	0,148248	1519,5	0,013092028	43,0	7,9	
12	0,013296356	0,148248	1015,0	0,013092028	1,5	9,4	
13	0,014083154	0,148248	952,7	0,013092028	7,0	9,7	
14	0,007373297	0,145116	1868,1	0,012815436	73,8	9,9	
15	0,015332115	0,145116	846,5	0,012815436	16,4	14,2	10-20
16	0,016735604	0,145116	767,1	0,012815436	23,4	17,2	
17	0,015436927	0,145116	840,1	0,012815436	17,0	17,7	
18	0,012310043	0,145116	1078,8	0,012815436	4,1	18,0	
19	0,014361623	0,148248	932,3	0,013092028	8,8	22,1	20-30
20	0,015111513	0,148248	881,0	0,013092028	13,4	22,4	
21	0,009559861	0,145116	1418,0	0,012815436	34,1	24,0	
22	0,011546968	0,145116	1156,7	0,012815436	11,0	24,1	
23	0,008677808	0,145116	1572,3	0,012815436	47,7	25,8	
24	0,007392657	0,145116	1863,0	0,012815436	73,4	26,9	
25	0,015416670	0,145116	841,3	0,012815436	16,9	38,7	30-80
26	0,016714081	0,148248	787,0	0,013092028	21,7	41,7	
27	0,014319589	0,148248	935,3	0,013092028	8,6	46,3	
28	0,012295056	0,148248	1105,8	0,013092028	6,5	50,7	
29	0,013973533	0,148248	960,9	0,013092028	6,3	71,7	
30	0,017474022	0,148248	748,4	0,013092028	25,1	72,2	
PROMEDIO:			1097,9	PROMEDIO:	20,4		

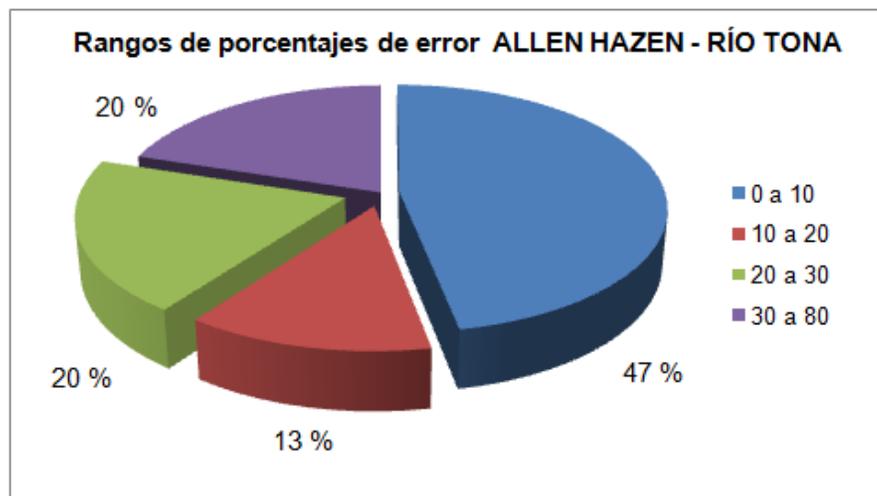
Fuente: Autor(es)

En la tabla 8 se muestra un análisis de los resultados obtenidos con respecto a los porcentajes de error. El promedio obtenido del error sin hacer el ajuste fue de 1097,9% y con el ajuste correspondió a un 20,4%.

Después de hacer el ajuste, se observa que de los 30 ensayos realizados para

esta arena el 46,67% de las muestras tiene porcentajes de error entre 0 y 10. El 13,33% de las muestras tiene un porcentaje de error entre un rango de 10 a 20. El 20% de las muestras tiene un porcentaje de error entre un rango de 20 a 30. El 20% de las muestras tiene un porcentaje de error entre un rango de 30 a 80.

Figura 10. Rangos de porcentajes de error ALLEN HAZEN-Río Tona



Fuente: Autor(es)

Porcentajes de error de Terzaghi- Río Tona.

La siguiente tabla muestra los porcentajes de error de los coeficientes de permeabilidad ajustados con respecto a los obtenidos en el laboratorio para la arena del el río Tona.

Tabla 9. PORCENTAJES DE ERROR TERZAGUI - RIO TONA

N°	K _{LABE} (cm ² /seg)	K _{T,ORIGINAL} (cm ² /seg)	ERROR _{T,ORIGINAL} (%)	K _{T,AJUSTE} (cm ² /seg)	ERROR _{T,AJUSTE} (%)	ERROR	RANGOS
1	0,017365213	0,671202437	3765,2	0,036155955	108,2	0,3	0-10
2	0,012267072	0,405738394	3207,5	0,021856088	78,2	1,3	
3	0,011950405	0,199686949	1571,0	0,010756624	10,0	2,9	
4	0,009151496	0,165500395	1708,5	0,008915082	2,6	6,0	
5	0,010394042	0,203325793	1856,2	0,010952639	5,4	6,6	
6	0,013507425	0,411521672	2946,6	0,022167618	64,1	7,2	
7	0,016695906	0,195255683	1069,5	0,010517923	37,0	8,3	
8	0,012706877	0,143464061	1029,0	0,007728041	39,2	8,9	
9	0,010992572	0,340544062	2997,9	0,018344236	66,9	9,6	
10	0,013165005	0,300819463	2185,0	0,016204374	23,1	13,2	
11	0,009153829	0,282681824	2988,1	0,015227346	66,3	17,2	10--20
12	0,013296356	0,160867318	1109,9	0,00866551	34,8	17,6	
13	0,014083154	0,229793049	1531,7	0,012378363	12,1	17,8	
14	0,007373297	0,277654778	3665,7	0,014956551	102,8	18,7	
15	0,015332115	0,354736584	2213,7	0,019108751	24,6	18,9	
16	0,016735604	0,310381703	1754,6	0,016719467	0,1	19,4	
17	0,015436927	0,163453755	958,8	0,008804835	43,0	20,3	20-30
18	0,012310043	0,177220234	1339,6	0,0095464	22,5	22,5	
19	0,014361623	0,188101105	1209,7	0,010132525	29,4	22,6	
20	0,015111513	0,182317377	1106,5	0,00982097	35,0	24,2	
21	0,009559861	0,272481331	2750,3	0,014677871	53,5	24,5	
22	0,011546968	0,148798222	1188,6	0,008015379	30,6	25,2	
23	0,008677808	0,169093678	1848,6	0,009108643	5,0	26,3	
24	0,007392657	0,215141206	2810,2	0,011589105	56,8	26,8	
25	0,015416670	0,245231843	1490,7	0,013210011	14,3	27,3	
26	0,016714081	0,230762222	1280,6	0,01243057	25,6	34,8	
27	0,014319589	0,285301358	1892,4	0,015368453	7,3	35,8	30-60
28	0,012295056	0,346214818	2715,9	0,018649705	51,7	57,2	60-100
29	0,013973533	0,416130382	2878,0	0,022415877	60,4	76,4	
30	0,017474022	0,504972293	2789,8	0,027201563	55,7	97,0	
PROMEDIO:			2062,0	PROMEDIO:		38,9	

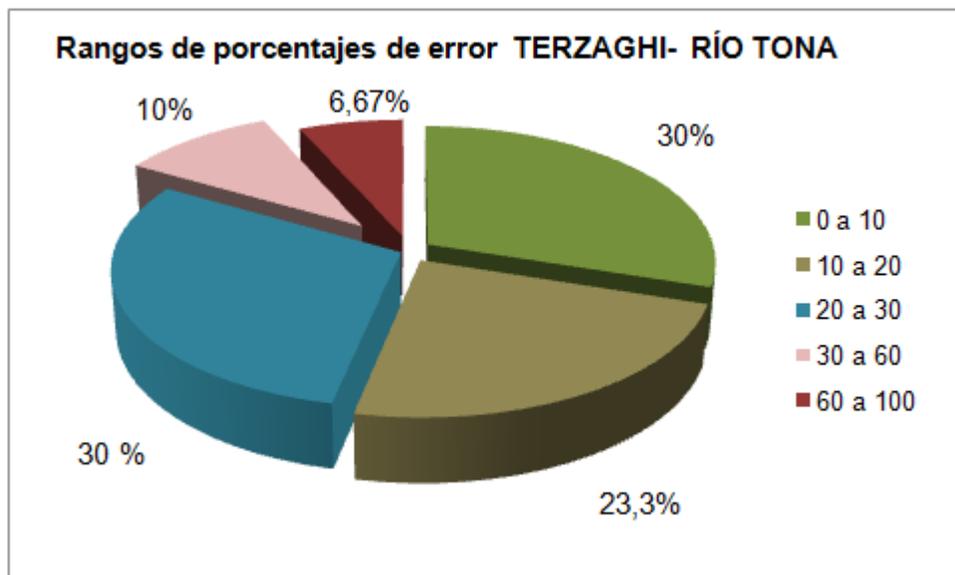
Fuente: Autor(es)

En la tabla 9 se muestra un análisis de los resultados obtenidos con respecto a los porcentajes de error. El promedio obtenido de los datos del error sin hacer el ajuste fue de 2062% y con el ajuste es de 38,9%.

Después de hacer el ajuste, se analiza que de los 30 ensayos realizados para esta

arena el 30% de las muestras tiene porcentajes de error entre 0 y 10. El 23,33% de las muestras tiene un porcentaje de error entre un rango de 10 a 20. El 30% de las muestras tiene un porcentaje de error entre un rango de 20 a 30. El 10% de las muestras tiene un porcentaje de error entre un rango de 30 a 60 y el 6,67% de las muestras tiene un porcentaje de error entre un rango de 60 a 100. En la figura 11 se observa la distribución porcentual de los promedios de error obtenidos en la tabla anterior.

Figura 11. Rangos de porcentajes de erros TERZAGHI – RÍO TONA



Fuente: Autor(es)

Porcentajes de error de Schlichter

La tabla 10 muestra los porcentajes de error de los coeficientes de permeabilidad ajustados con respecto a los obtenidos en el laboratorio para la arena del el río Tona.

Tabla 10. PORCENTAJES DE ERROR SCHLICHTER - RIO TONA

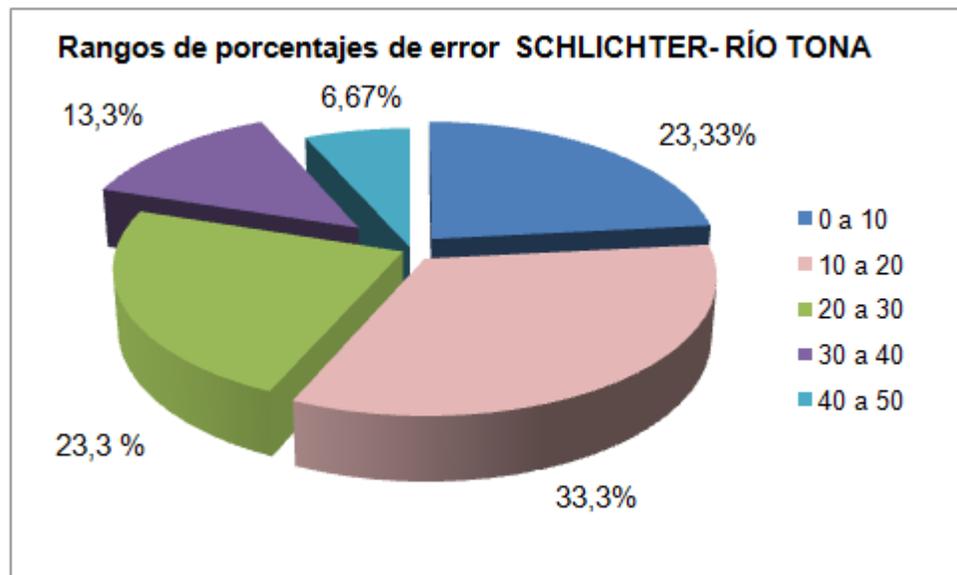
N°	$K_{LAB}(cm^3/seg)$	$K_{T.ORIGINAL}(cm^3/seg)$	ERROR _{T.ORIGINAL} (%)	$K_{T.AJUSTE}(cm^3/seg)$	ERROR _{T.AJUSTE} (%)	ERROR	RANGOS
1	0,017365213	0,279758104	1511,0	0,012113859	30,2	0,1	0-10
2	0,012267072	0,17955716	1363,7	0,012375309	0,9	0,2	
3	0,011950405	0,090959809	661,1	0,012113859	1,4	0,6	
4	0,009151496	0,075701096	727,2	0,012113859	32,4	1,0	
5	0,010394042	0,09257801	790,7	0,012113859	16,5	4,7	
6	0,013507425	0,181926611	1246,9	0,012375309	8,4	6,5	
7	0,016695906	0,088987428	433,0	0,012113859	27,4	8,3	
8	0,012706877	0,065864195	418,3	0,012375309	2,6	10,0	
9	0,010992572	0,152366296	1286,1	0,012375309	12,6	11,1	10-20
10	0,013165005	0,135388328	928,4	0,012375309	6,0	11,8	
11	0,009153829	0,127541816	1293,3	0,012375309	35,2	13,4	
12	0,013296356	0,073661709	454,0	0,012375309	6,9	13,9	
13	0,014083154	0,104363478	641,1	0,012375309	12,1	17,6	
14	0,007373297	0,125257516	1598,8	0,012113859	64,3	17,6	
15	0,015332115	0,158161605	931,6	0,012113859	21,0	19,0	
16	0,016735604	0,139365759	732,8	0,012113859	27,6	19,1	
17	0,015436927	0,074785126	384,5	0,012113859	21,5	19,4	20-30
18	0,012310043	0,080941838	557,5	0,012113859	1,6	20,4	
19	0,014361623	0,085839634	497,7	0,012375309	13,8	22,8	
20	0,015111513	0,083257169	451,0	0,012375309	18,1	23,2	
21	0,009559861	0,123010003	1186,7	0,012113859	26,7	24,4	
22	0,011546968	0,068221347	490,8	0,012113859	4,9	25,8	
23	0,008677808	0,07730875	790,9	0,012113859	39,6	28,5	
24	0,007392657	0,097822481	1223,2	0,012113859	63,9	28,9	
25	0,015416670	0,111100143	620,6	0,012113859	21,4	30,4	30-40
26	0,016714081	0,104791775	527,0	0,012375309	26,0	30,6	
27	0,014319589	0,128678524	798,6	0,012375309	13,6	33,5	
28	0,012295056	0,15476549	1158,8	0,012375309	0,7	36,5	
29	0,013973533	0,183809729	1215,4	0,012375309	11,4	44,7	40-50
30	0,017474022	0,219206701	1154,5	0,012375309	29,2	45,0	
PROMEDIO:			869,2	PROMEDIO:		19,9	

Fuente: Autor(es)

En la tabla 10 se muestra un análisis de los resultados obtenidos con respecto a los porcentajes de error. La mediana obtenida del error sin hacer el ajuste fue de 869,2% y con el ajuste es de 19,9%.

Después de hacer el ajuste, se analiza que de los 30 ensayos realizados para esta arena el 23,33% de las muestras tiene porcentajes de error entre 0 y 10. El 33,33% de las muestras tiene un porcentaje de error entre un rango de 10 a 20. El 23,33% de las muestras tiene un porcentaje de error entre un rango de 20 a 30. El 13,33% de las muestras tiene un porcentaje de error entre un rango de 30 a 40 y el 6,67% de las muestras tiene un porcentaje de error entre un rango de 40 a 50. En la siguiente gráfica se observa la distribución porcentual de los promedios de error obtenidos en la tabla anterior.

Figura 12. Rangos de porcentaje de error SCHLICHTER – RÍO TONA



Fuente: Autor(es)

6.2 ARENA DE LA TRITURADORA INGESAN S.A

La tabla 11 muestra los resultados obtenidos de los 30 ensayos realizados para esta arena y su característica en relación a la parte volumétrica y gravimétrica, y sus respectivas relaciones.

Tabla 11. RELACIONES VOLUMETRICAS Y GRAVIMETRICAS DEL SUELO

ENSAYO N°	VOLUMENES					PESOS					RELACIONES					
	Va cc.	Vw cc.	Vs cc.	Vv cc.	Vt cc.	Wa gr.	Ww gr.	Ws gr.	Wv gr.	Wt gr.	W% %	Sr %	n	e	γ_m gr/cc.	γ_d gr/cc.
1	0	68,78	62,14	68,8	130,92	0	68,8	174,0	68,8	242,8	39,5	1,00	0,525	1,107	1,85	1,33
2	0	89,56	50,71	89,6	140,28	0	89,6	142,0	89,6	231,6	63,1	1,00	0,638	1,766	1,65	1,01
3	0	84,65	71,21	84,6	155,86	0	84,6	199,4	84,6	284,0	42,5	1,00	0,543	1,189	1,82	1,28
4	0	67,14	63,79	67,1	130,92	0	67,1	178,6	67,1	245,7	37,6	1,00	0,513	1,053	1,88	1,36
5	0	61,78	69,14	61,8	130,92	0	61,8	193,6	61,8	255,4	31,9	1,00	0,472	0,894	1,95	1,48
6	0	81,92	58,36	81,9	140,28	0	81,9	163,4	81,9	245,3	50,1	1,00	0,584	1,404	1,75	1,16
7	0	77,77	71,86	77,8	149,63	0	77,8	201,2	77,8	279,0	38,7	1,00	0,520	1,082	1,86	1,34
8	0	79,92	60,36	79,9	140,28	0	79,9	169,0	79,9	248,9	47,3	1,00	0,570	1,324	1,77	1,20
9	0	94,64	70,57	94,6	165,21	0	94,6	197,6	94,6	292,2	47,9	1,00	0,573	1,341	1,77	1,20
10	0	71,56	68,71	71,6	140,28	0	71,6	192,4	71,6	264,0	37,2	1,00	0,510	1,041	1,88	1,37
11	0	75,61	58,43	75,6	134,04	0	75,6	163,6	75,6	239,2	46,2	1,00	0,564	1,294	1,78	1,22
12	0	75,34	61,82	75,3	137,16	0	75,3	173,1	75,3	248,4	43,5	1,00	0,549	1,219	1,81	1,26
13	0	93,47	62,39	93,5	155,86	0	93,5	174,7	93,5	268,2	53,5	1,00	0,600	1,498	1,72	1,12
14	0	96,51	59,36	96,5	155,86	0	96,5	166,2	96,5	262,7	58,1	1,00	0,619	1,626	1,69	1,07
15	0	88,98	60,64	89,0	149,63	0	89,0	169,8	89,0	258,8	52,4	1,00	0,595	1,467	1,73	1,13
16	0	63,40	61,29	63,4	124,69	0	63,4	171,6	63,4	235,0	36,9	1,00	0,508	1,035	1,88	1,38
17	0	67,13	73,14	67,1	140,28	0	67,1	204,8	67,1	271,9	32,8	1,00	0,479	0,918	1,94	1,46
18	0	86,58	69,29	86,6	155,86	0	86,6	194,0	86,6	280,6	44,6	1,00	0,555	1,250	1,80	1,24
19	0	88,54	67,32	88,5	155,86	0	88,5	188,5	88,5	277,0	47,0	1,00	0,568	1,315	1,78	1,21
20	0	61,54	94,32	61,5	155,86	0	61,5	264,1	61,5	325,6	23,3	1,00	0,395	0,652	2,09	1,69
21	0	84,72	71,14	84,7	155,86	0	84,7	199,2	84,7	283,9	42,5	1,00	0,544	1,191	1,82	1,28
22	0	70,79	78,54	70,8	149,32	0	70,8	219,9	70,8	290,7	32,2	1,00	0,474	0,901	1,95	1,47
23	0	94,33	61,54	94,3	155,86	0	94,3	172,3	94,3	266,6	54,7	1,00	0,605	1,533	1,71	1,11
24	0	86,34	63,29	86,3	149,63	0	86,3	177,2	86,3	263,5	48,7	1,00	0,577	1,364	1,76	1,18
25	0	79,39	51,54	79,4	130,92	0	79,4	144,3	79,4	223,7	55,0	1,00	0,606	1,540	1,71	1,10
26	0	89,19	57,32	89,2	146,51	0	89,2	160,5	89,2	249,7	55,6	1,00	0,609	1,556	1,70	1,10
27	0	89,96	62,79	90,0	152,75	0	90,0	175,8	90,0	265,8	51,2	1,00	0,589	1,433	1,74	1,15
28	0	91,06	64,79	91,1	155,85	0	91,1	181,4	91,1	272,5	50,2	1,00	0,584	1,406	1,75	1,16
29	0	75,13	86,96	75,1	162,10	0	75,1	243,5	75,1	318,6	30,9	1,00	0,464	0,864	1,97	1,50
30	0	75,21	90,00	75,2	165,21	0	75,2	252,0	75,2	327,2	29,8	1,00	0,455	0,836	1,98	1,53
Promedio	0	80,37	66,76	80,4	147,12	0	80,4	186,9	80,37	267,3	44,2	1,00	0,546	1,237	1,82	1,27

Fuente: Autor(es)

En la tabla 11 se observan los diferentes promedios de volúmenes tales como Va:

0,0 cm³; Vw: 80,37 cm³; Vs: 66,76 cm³; Vv: 80,4 cm³; Vt:147,12 cm³; por otra parte se puede observar los promedio de los pesos tales como Wa: 0 gr. ; Ww: 80,4 gr. ; Ws: 186,9 gr. ; Wv: 80,37 gr.; Wt: 267,3; y por último se pueden observar los valores de relaciones volumétricas y gravimétricas tales como W%: 44,2 % ; Sr: 1,00 ; n: 0,546 ; e:1,237; γ_d : 1,27 gr/cm³; γ_m : 1,82 gr/cm³.

La finalidad principal de hallar la tabla de las relaciones volumétricas y gravimétricas fue primordialmente conocer los valores de porosidad (n) en las arenas seleccionadas para todas las muestras, para posteriormente reemplazar esos valores en la fórmula teórica de Terzaghi.

6.2.1. Análisis de las constantes de Allen Hazen, Terzaghi y Schlichter para la arena de la Trituradora INGESAN.

El análisis realizado a continuación explica cómo fueron calculadas las constantes de las ecuaciones de Allen Hazen, Terzaghi y Schlichter teniendo como base un valor real de (K) hallado en laboratorio, para posteriormente hacer un análisis y comparación respecto a las constantes propuestas teóricas de los anteriormente nombrados.

En la tabla 12 muestra las diferentes constantes obtenidas para las ecuaciones de Allen Hazen, Schlichter y Terzaghi, con base a las constantes obtenidas en el laboratorio, para la Trituradora INGESAN.

Tabla 12. COMPARACIÓN DE LAS CONSTANTES PERMEABILIDAD- Trituradora INGESAN

Ensayo N°	Volumen (Q) (cm ³)	Area (A) (cm ²)	Cabeza (h) (cm)	Altura (L) (cm)	Temp. (°C)	n (Lab.)	K (Lab.)	C (Allen.)	C (Schli.)	C1 (Terza.)	Co (Terza.)
1	895	31,17	62,0	4,20	23,0	0,525	0,0101	20,04	38,46	20,04	78,03
2	891	31,17	63,0	4,50	23,0	0,638	0,0106	21,05	36,62	21,05	41,32
3	993	31,17	64,0	5,00	23,0	0,543	0,0129	25,65	30,06	25,65	89,17
4	514	31,17	63,0	4,20	23,0	0,513	0,0057	11,33	68,07	11,33	47,86
5	733	31,17	62,0	4,20	23,0	0,472	0,0082	16,42	46,94	16,42	91,80
6	669	31,17	61,5	4,50	23,0	0,584	0,0081	16,19	47,62	16,19	43,78
7	556	31,17	62,0	4,80	23,0	0,520	0,0071	14,23	54,20	14,23	57,43
8	783	31,17	62,0	4,50	23,0	0,570	0,0094	18,79	41,04	18,79	55,38
9	829	31,17	61,0	5,30	23,0	0,573	0,0119	23,81	32,38	23,81	68,87
10	798	31,17	62,0	4,50	23,0	0,510	0,0096	19,14	40,28	19,14	82,31
11	702	31,17	61,0	4,30	23,0	0,564	0,0082	16,36	47,12	16,36	49,92
12	825	31,17	62,0	4,40	23,0	0,549	0,0097	19,36	39,82	19,36	64,75
13	773	31,17	63,0	5,00	23,0	0,600	0,0102	20,27	38,03	20,27	49,92
14	883	31,17	63,0	5,00	23,0	0,619	0,0116	23,17	33,28	23,17	50,87
15	743	31,17	62,0	4,80	23,0	0,595	0,0095	19,01	40,56	19,01	48,21
16	891	31,17	61,0	4,00	23,0	0,508	0,0097	19,33	39,89	19,33	84,03
17	667	31,17	62,0	4,50	23,0	0,479	0,0080	16,01	48,17	16,01	85,34
18	759	31,17	62,0	5,00	23,0	0,555	0,0102	20,25	38,08	20,25	65,15
19	483	31,17	63,5	5,00	23,0	0,568	0,0063	12,58	61,30	12,58	37,45
20	554	31,17	63,0	5,00	23,0	0,395	0,0073	14,53	53,05	14,53	148,25
21	801	31,17	64,0	5,00	24,5	0,544	0,0100	19,36	39,83	19,36	67,09
22	834	31,17	64,2	4,50	24,5	0,474	0,0088	17,00	45,35	17,00	93,58
23	710	31,17	63,0	5,00	24,5	0,605	0,0090	17,44	44,21	17,44	41,56
24	610	31,17	64,0	4,80	24,5	0,577	0,0073	14,16	54,46	14,16	39,92
25	764	31,17	63,0	4,20	24,0	0,606	0,0083	16,10	47,88	16,10	38,11
26	710	31,17	63,0	4,70	24,0	0,609	0,0086	16,75	46,02	16,75	39,10
27	876	31,17	62,0	4,90	24,0	0,589	0,0112	21,90	35,20	21,90	57,49
28	677	31,17	65,0	5,00	24,0	0,584	0,0084	16,47	46,82	16,47	44,44
29	739	31,17	65,0	5,20	24,5	0,464	0,0095	18,30	42,12	18,30	108,66
30	673	31,17	65,0	5,30	24,0	0,455	0,0089	17,36	44,42	17,36	109,45
Promedio	744	31,17	62,8	4,71	23,4	0,546	0,0092	18,08	44,04	18,079	65,97

Fuente: Autor(es)

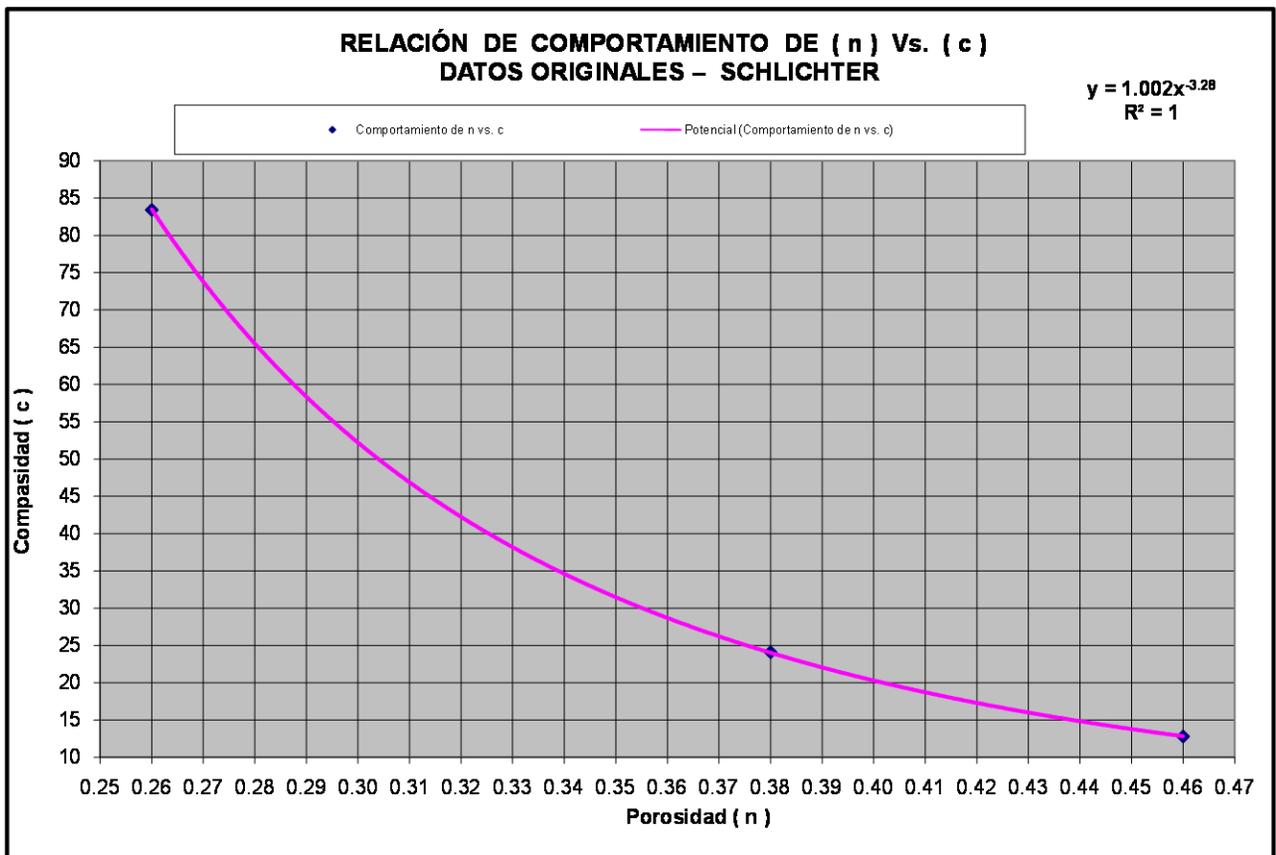
En la tabla 12 se puede apreciar que para las arenas de la Trituradora INGESAN las constantes promedio obtenidas a partir del coeficiente de permeabilidad hallado en el laboratorio son las siguientes: constante de permeabilidad de Allen Hazen C= 18,08; para Schlichter C= 44,04; para Terzaghi C1= 18,079 y para la constante Co= 65,97.

Análisis de la constante obtenida en la fórmula de Schlichter

Para la fórmula de Schlichter se optó por dar un valor promedio ya que no se encontró una correlación ni tendencia de ningún tipo entre la porosidad (n) y las constantes encontradas en los 30 ensayos. Por esta razón se utiliza el valor promedio de la constante de los ensayos realizados.

La figura 13 muestra la correlación que hizo Schlichter para calcular las respectivas constantes a usar dependiendo de los tipos de arena.

Figura 13. Relación de comportamiento de la Porosidad (n) Vs Compacidad (c).
Datos originales–Schlichter.



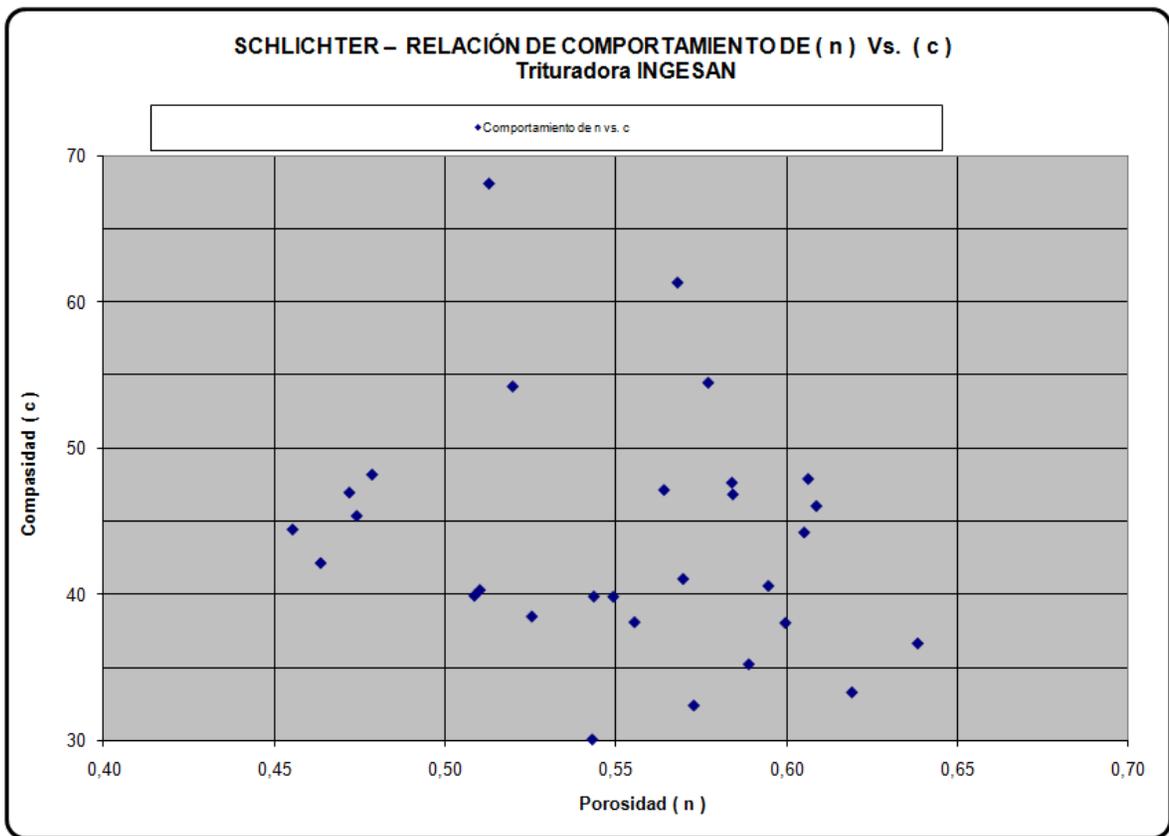
Fuente: Autor(es)

La figura 13 es la obtenida a partir de los datos de los cálculos de las constantes de Schlichter Vs la porosidad, para la arena de la Trituradora INGESAN con una

correlación $R^2=1$ según la fórmula $y = 1,0023x^{-3,283}$, y está calculada con los valores:

n	C Schlichter
0,26	83,4
0,38	24,1
0,46	12,8

Figura 14. . Relación de comportamiento de la Porosidad (n) Vs Compacidad (c).
Datos Trituradora INGESAN S.A.



Fuente: Auto(res)

En la figura 14 se observa que en la arena de la Trituradora INGESAN no existe ninguna correlación o tendencia entre la porosidad (n) y las constantes calculadas con base a las constantes obtenidas en el laboratorio.

Análisis de la constante obtenida en la fórmula de Terzaghi

Según la fórmula de Terzaghi es necesario calcular dos (2) constantes C_1 y C_o (una está en función de la otra).

Donde la determinación de C_o según la forma de los agregados.

Arenas de granos redondeados $C_o = 800$

Arenas de granos angulosos $C_o = 460$

Arenas con limos $C_o < 400$

C_1 está en función de la porosidad (n).

En este proyecto de investigación se tomó un valor promedio de todos los C_o obtenidos en los ensayos por tratarse de un mismo suelo. También se tomó un valor promedio de C_1 debido a la similitud en los valores de la porosidad.

Análisis de la constante obtenida en la fórmula de Allen Hazen

En este caso se halló una constante promedio, la cuál fue calculada por medio de las constantes obtenidas en laboratorio (K).

6.2.2 Análisis del ajuste propuesto para disminuir los porcentajes de error en las ecuaciones de Allen Hazen, Terzaghi y Schlichter para la arena del río Tona.

El ajuste realizado para este análisis fue propuesto como mecanismo de disminución del porcentaje de error existente entre la constante de permeabilidad obtenida en el laboratorio con respecto a las constantes teóricas de Hazen, Terzaghi y Schlichter.

Ajuste propuesto para la ecuación de Allen Hazen

Para el ajuste de disminución del factor de error propuesto para la fórmula de Allen

Hazen se hizo lo siguiente:

- Hallar las constantes K de permeabilidad para los 30 ensayos realizados en cada arena seleccionada.
- Utilizar la constante promedio C de los 30 ensayos. Este valor promedio de C se reemplazó en la ecuación ajustada de Hazen para obtener un valor de K ajustado para posteriormente compararlo con el K de permeabilidad obtenido en el laboratorio.
- Calcular el porcentaje de error existente entre el K de laboratorio y el K de ajuste para verificar la viabilidad de la constante hallada.

Ajuste propuesto para la ecuación de Schlichter

Para el ajuste de disminución del factor de error propuesto para la fórmula de Schlichter se hizo lo siguiente:

- Hallar las constantes K de permeabilidad para los 30 ensayos realizados en cada arena seleccionada.
- Utilizar la constante promedio C de los 30 ensayos. Este valor promedio de C se reemplazó en la ecuación ajustada de Schlichter para obtener un valor de K ajustado para posteriormente compararlo con el K de permeabilidad obtenido en el laboratorio.
- Calcular el porcentaje de error existente entre el k de laboratorio y el k de ajuste para verificar la viabilidad de la constante hallada.

Ajuste propuesto para la ecuación de Terzaghi

Para el ajuste de disminución del factor de error propuesto para la fórmula de Terzaghi se hizo lo siguiente:

- Hallar las constantes K de permeabilidad para los 30 ensayos realizados en cada arena seleccionada.
- Utilizar las constantes promedios C_1 y C_0 en las fórmulas propuestas, calculadas en base al K de permeabilidad obtenido en el laboratorio para obtener un valor de K ajustado.
- Calcular el porcentaje de error existente entre el K de laboratorio y el K de ajuste para calcular los errores derivados de dicho ajuste.

6.2.3 Análisis de porcentajes de error para los coeficientes K en las fórmulas de Terzaghi, Schlichter y Allen Hazen para la arena de la Trituradora INGESAN

Después de realizar los ensayos de granulometría, permeabilidad y gravedad específica de sólidos, se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación en las siguientes tablas. Paralelo a esto se calcularon los valores de permeabilidad a partir de las formulas de Terzaghi, Schlichter y Allen Hazen, comparando los errores de estos respecto a los del laboratorio los cuales son los valores reales.

Porcentajes de error Allen Hazen

La tabla 13 muestra los porcentajes de error de los coeficientes de permeabilidad ajustados con respecto a los obtenidos en el laboratorio para la arena de la Trituradora INGESAN.

Tabla 13. PORCENTAJES DE ERROR ALLEN HAZEN – Trituradora INGESAN

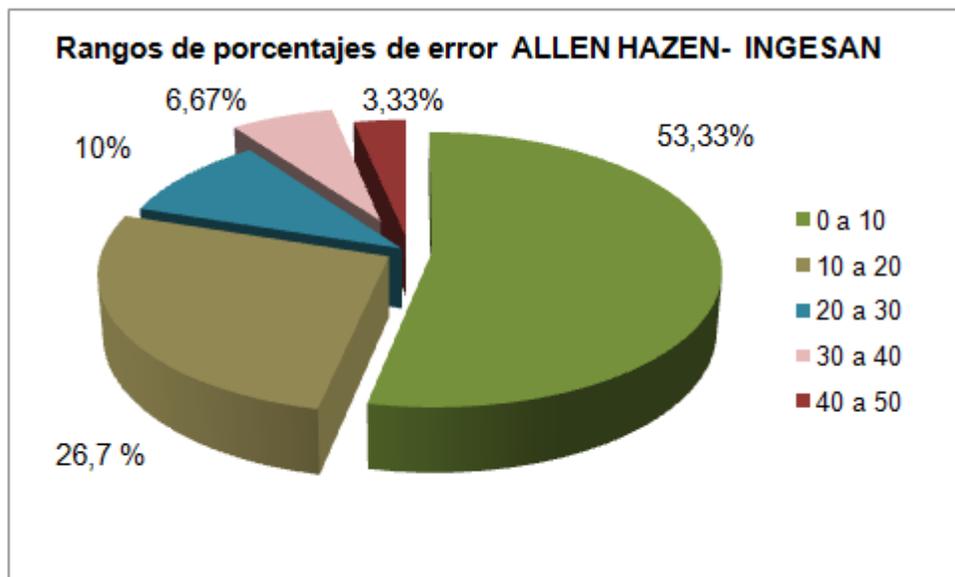
N°	K _{LAB} (cm ² /seg)	K _{AH.ORIGINAL} (cm ² /seg)	ERROR _{AH.ORIGINAL} (%)	K _{AH.AJUSTE} (cm ² /seg)	ERROR _{AH.AJUSTE} (%)	ERROR	RANGOS
1	0,010058012	0,05820764	478,7	0,00907188	9,8	0,5	0-10
2	0,010563902	0,05820764	451,0	0,00907188	14,1	1,2	
3	0,012871746	0,05820764	352,2	0,00907188	29,5	1,7	
4	0,005683468	0,05820764	924,2	0,00907188	59,6	2,5	
5	0,008241162	0,05820764	606,3	0,00907188	10,1	3,3	
6	0,008124516	0,05820764	616,4	0,00907188	11,7	3,5	
7	0,007138125	0,05820764	715,4	0,00907188	27,1	3,6	
8	0,009427504	0,05820764	517,4	0,00907188	3,8	3,8	
9	0,011948748	0,05820764	387,1	0,00907188	24,1	3,8	
10	0,009605155	0,05820764	506,0	0,00907188	5,6	5,2	
11	0,008210153	0,05820764	609,0	0,00907188	10,5	5,8	
12	0,009715559	0,05820764	499,1	0,00907188	6,6	5,8	
13	0,010173744	0,05820764	472,1	0,00907188	10,8	7,3	
14	0,011625724	0,05820764	400,7	0,00907188	22,0	7,6	
15	0,009538912	0,05820764	510,2	0,00907188	4,9	8,9	
16	0,009699368	0,05820764	500,1	0,00907188	6,5	9,0	
17	0,008031896	0,05820764	624,7	0,00907188	12,9	10,6	10-20
18	0,010160521	0,05820764	472,9	0,00907188	10,7	11,1	
19	0,006310972	0,05820764	822,3	0,00907188	43,7	12,1	
20	0,007292829	0,05820764	698,1	0,00907188	24,4	13,1	
21	0,010027135	0,06009206	499,3	0,009365574	6,6	13,1	
22	0,008807463	0,06009206	582,3	0,009365574	6,3	14,8	
23	0,009033280	0,06009206	565,2	0,009365574	3,7	17,5	
24	0,007334133	0,06009206	719,3	0,009365574	27,7	18,4	
25	0,008254954	0,05946392	620,3	0,009267676	12,3	24,8	20-30
26	0,008587572	0,05946392	592,4	0,009267676	7,9	28,6	
27	0,011227605	0,05946392	429,6	0,009267676	17,5	29,4	30-40
28	0,008442168	0,05946392	604,4	0,009267676	9,8	32,2	
29	0,009482272	0,06009206	533,7	0,009365574	1,2	37,5	40-50
30	0,008898421	0,05946392	568,3	0,009267676	4,1	44,6	
PROMEDIO:			562,6	PROMEDIO:	14,9		

Fuente: Autor(es)

En la tabla 13 se muestra un análisis de los resultados obtenidos con respecto a los porcentajes de error. El promedio obtenido del error sin hacer el ajuste fue de 562,6% y con el ajuste es de 14,9%.

Después de hacer el ajuste, se analiza que de los 30 ensayos realizados para esta arena el 53,33% de las muestras tiene porcentajes de error entre 0 y 10. El 26,7% de las muestras tiene un porcentaje de error entre un rango de 10 a 20. El 10% de las muestras tiene un porcentaje de error entre un rango de 20 a 30. El 6,67% de las muestras tiene un porcentaje de error entre un rango de 30 a 40 y el 3,33% tiene un porcentaje de error entre un rango de 40 a 50.

Figura 15. Rangos de porcentajes de error ALLEN HAZEN -INGESAN



Fuente: Autor(es)

Porcentaje de error de Terzaghi

La tabla 14 muestra los porcentajes de error de los coeficientes de permeabilidad ajustados con respecto a los obtenidos en el laboratorio para la arena de la Trituradora INGESAN.

Tabla 14 PORCENTAJES DE ERROR TERZAGHI – Trituradora INGESAN

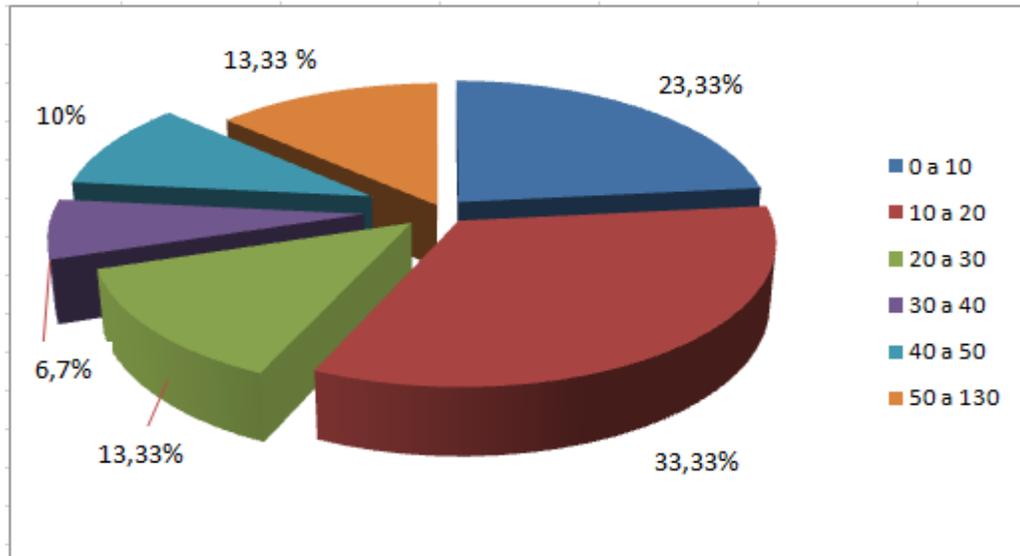
Nº	K _{LAB} (cm ² /seg)	K _{T,ORIGINAL} (cm ² /seg)	ERROR _{T,ORIGINAL} (%)	K _{T,AJUSTE} (cm ² /seg)	ERROR _{T,AJUSTE} (%)	ERROR	RANGOS
1	0,010058012	0,103117951	925,2	0,008503906	15,5	1,8	0-10
2	0,010563902	0,204506879	1835,9	0,016865223	59,6	2,7	
3	0,012871746	0,115476587	797,1	0,009523095	26,0	2,9	
4	0,005683468	0,095008891	1571,7	0,00783517	37,9	4,5	
5	0,008241162	0,07181666	771,4	0,005922559	28,1	6,6	
6	0,008124516	0,14846309	1727,3	0,012243418	50,7	7,7	
7	0,007138125	0,099441925	1293,1	0,008200752	14,9	9,6	
8	0,009427504	0,136190249	1344,6	0,011231304	19,1	10,6	
9	0,011948748	0,138803601	1061,7	0,011446821	4,2	11,2	10-20
10	0,009605155	0,093356632	871,9	0,007698912	19,8	11,9	
11	0,008210153	0,131584001	1502,7	0,010851437	32,2	13,2	
12	0,009715559	0,120039722	1135,5	0,009899406	1,9	13,2	
13	0,010173744	0,163045833	1502,6	0,013446024	32,2	14,2	
14	0,011625724	0,182827824	1472,6	0,0150774	29,7	14,4	
15	0,009538912	0,158292996	1559,4	0,013054068	36,9	14,4	
16	0,009699368	0,092337734	852,0	0,007614886	21,5	15,9	
17	0,008031896	0,075293199	837,4	0,006209261	22,7	18,6	20-30
18	0,010160521	0,12476075	1127,9	0,010288739	1,3	21,7	
19	0,006310972	0,134821604	2036,3	0,011118435	76,2	24,3	
20	0,007292829	0,039355311	439,6	0,003245544	55,5	27,6	
21	0,010027135	0,119559654	1092,4	0,009859816	1,7	29,8	
22	0,008807463	0,075292716	754,9	0,006209221	29,5	30,3	30-40
23	0,009033280	0,173885204	1824,9	0,014339922	58,7	34,6	
24	0,007334133	0,146990943	1904,2	0,012122013	65,3	40,6	40-50
25	0,008254954	0,173267026	1998,9	0,014288943	73,1	40,9	
26	0,008587572	0,175717265	1946,2	0,014491008	68,7	49,5	50-130
27	0,011227605	0,156250708	1291,7	0,012885645	14,8	62,1	
28	0,008442168	0,151962553	1700,0	0,012532011	48,4	70,2	
29	0,009482272	0,069813549	636,3	0,005757367	39,3	74,9	
30	0,008898421	0,065042166	630,9	0,005363881	39,7	122,2	
PROMEDIO:			1281,6	PROMEDIO:		34,2	

Fuente: Autor(es)

En la tabla 14 se muestra un análisis de los resultados obtenidos con respecto a los porcentajes de error. El promedio obtenido del error sin hacer el ajuste fue de 1281,6% y con el ajuste es de 34,2%.

Después de hacer el ajuste, se analiza que de los 30 ensayos realizados para esta arena el 23,33% de las muestras tiene porcentajes de error entre 0 y 10. El 33,33% de las muestras tiene un porcentaje de error entre un rango de 10 a 20. El 13,33% de las muestras tiene un porcentaje de error entre un rango de 20 a 30. El 6,67% de las muestras tiene un porcentaje de error entre un rango de 30 a 40. El 10% de las muestras tiene un porcentaje de error entre un rango de 40 a 50 y el 13,33% de las muestras tiene un porcentaje de error entre un rango de 50 a 130.

Figura 16. Rangos de porcentajes de error TERZAGHI -INGESAN



Fuente: Autor(es)

Porcentaje de error de Schlichter

La tabla 15 muestra los porcentajes de error de los coeficientes de permeabilidad ajustados con respecto a los obtenidos en el laboratorio para la arena de la Trituradora INGESAN.

Tabla 15. PORCENTAJES DE ERROR SCHLICHTER- Trituradora INGESAN

N°	K _{LAB} (cm ² /seg)	K _{T.Original} (cm ² /seg)	ERROR _{T.Original} (%)	K _{T.AJUSTE} (cm ² /seg)	ERROR _{T.AJUSTE} (%)	ERROR	RANGOS
1	0,010058012	0,046646534	363,8	0,008784259	12,7	0,8	0-10
2	0,010563902	0,088481055	737,6	0,008784259	16,8	0,9	
3	0,012871746	0,052020592	304,1	0,008784259	31,8	0,9	
4	0,005683468	0,043087457	658,1	0,008784259	54,6	1,2	
5	0,008241162	0,032793528	297,9	0,008784259	6,6	1,4	
6	0,008124516	0,066019436	712,6	0,008784259	8,1	2,0	
7	0,007138125	0,045036149	530,9	0,008784259	23,1	3,1	
8	0,009427504	0,060873752	545,7	0,008784259	6,8	3,1	
9	0,011948748	0,061975915	418,7	0,008784259	26,5	5,0	
10	0,009605155	0,042359368	341,0	0,008784259	8,5	5,8	
11	0,008210153	0,058922797	617,7	0,008784259	7,0	6,2	
12	0,009715559	0,053988171	455,7	0,008784259	9,6	7,7	
13	0,010173744	0,072030751	608,0	0,008784259	13,7	7,7	
14	0,011625724	0,079999791	588,1	0,008784259	24,4	9,6	
15	0,009538912	0,070084066	634,7	0,008784259	7,9	10,0	
16	0,009699368	0,041909913	332,1	0,008784259	9,4	11,3	10--20
17	0,008031896	0,034345257	327,6	0,008784259	9,4	11,3	
18	0,010160521	0,056013811	451,3	0,008784259	13,5	11,8	
19	0,006310972	0,060295168	855,4	0,008784259	39,2	13,3	
20	0,007292829	0,018265579	150,5	0,008784259	20,5	14,3	
21	0,010027135	0,053853633	437,1	0,009068642	9,6	14,5	
22	0,008807463	0,034369217	290,2	0,009068642	3,0	15,3	
23	0,009033280	0,07662498	748,3	0,009068642	0,4	15,4	
24	0,007334133	0,065534322	793,6	0,009068642	23,6	15,4	
25	0,008254954	0,07630982	824,4	0,008973848	8,7	25,3	
26	0,008587572	0,077299804	800,1	0,008973848	4,5	26,7	
27	0,011227605	0,06934604	517,6	0,008973848	20,1	28,8	
28	0,008442168	0,067567136	700,4	0,008973848	6,3	31,2	30-50
29	0,009482272	0,031920441	236,6	0,009068642	4,4	34,0	
30	0,008898421	0,029777827	234,6	0,008973848	0,8	40,9	
PROMEDIO:			517,1	PROMEDIO:	14,4		

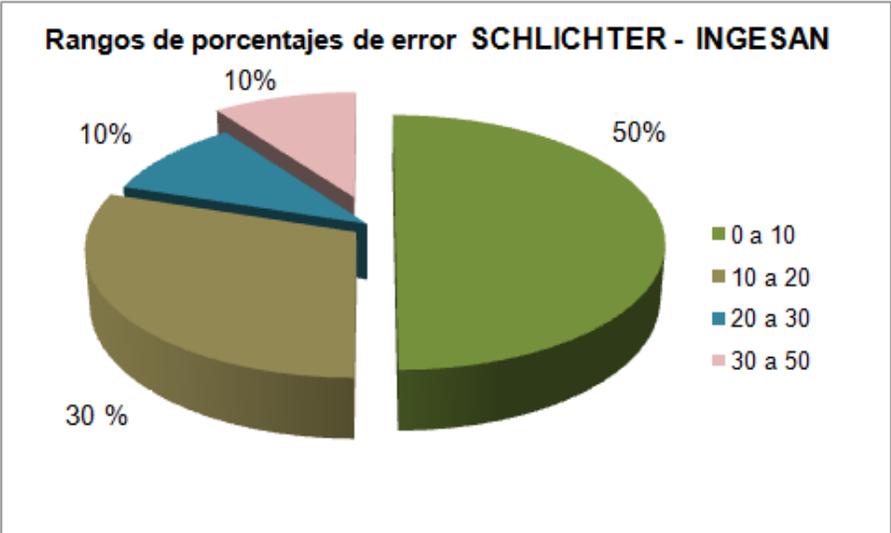
Fuente: Autor(es)

En la tabla 15 se muestra un análisis de los resultados obtenidos con respecto a los porcentajes de error. El promedio obtenido del error sin hacer el ajuste fue de 517,1% y con el ajuste es de 14,4%.

Después de hacer el ajuste, se analiza que de los 30 ensayos realizados para esta arena el 50% de las muestras tiene porcentajes de error entre 0 y 10. El 30% de las muestras tiene un porcentaje de error entre un rango de 10 a 20. El 10% de las

muestras tiene un porcentaje de error entre un rango de 20 a 30 y el 10% de las muestras tiene un porcentaje de error entre un rango de 30 a 50.

Figura 17. Rangos de porcentajes de error SCHLICHTER -INGESAN



Fuente: Autor(es)

7. CONCLUSIONES

- Se determinó que el óptimo desarrollo del ensayo de permeabilidad de cabeza constante, jugaron factores ambientales tales como: temperatura, caudal del agua, características de la muestra de suelo en estudio; y otros factores externos como cantidad agregada en el permeámetro, altura del cono de agua, porosidad del papel filtro, apisonamiento de la muestra y ajuste óptimo del equipo para evitar cualquier entrada del aire; fueron elementos de peso en el desarrollo de cada uno de los ensayos realizados en el laboratorio.
- De acuerdo a las granulometrías de las muestras estudiadas se determinó una clasificación para el Río Tona como SP (Arena Limosa mal graduada, arenas con grava con pocos finos o sin ellos) y para la Trituradora INGESAN como SW (Arena bien graduada, arenas con gravas, con poco o nada de finos) de acuerdo a la clasificación unificada de los suelos.
- Según los resultados de las muestras estudiadas, estos demostraron que el menor valor promedio del peso específico relativo (G_s), lo obtuvo el Río Tona ($G_s=2.75$) mientras que valor promedio del peso específico relativo (G_s) la Trituradora INGESAN correspondieron a ($G_s=2.80$).
- Después de realizar los ajustes en las ecuaciones de ALLEN HAZEN, TERZAGHI y SCHLICHTER se pudo concluir que el menor valor del porcentaje promedio la obtuvo el método de SCHLICHTER en cada una de las muestras de la investigación (Río Tona (19.9%) y INGESAN (14.4%)).
- Todos los ajustes realizados en cada una de las muestras del proyecto para ALLEN HAZEN, TERZAGHI y SCHLICHTER, demostraron un menor rango de error en las arenas de la Trituradora INGESAN.

- Las constantes obtenidas en esta investigación permitieron que las ecuaciones de Terzaghi, Schlichter y Allen Hazen sean aplicables a las arenas del río Tona y de la Trituradora INGESAN con errores promedios entre el 19% y el 39% y entre el 14% y el 35% respectivamente.
- La ecuación de Schlichter original mostraba una relación inversa entre la compacidad (c) y la porosidad (n). En esta investigación no se observó esa tendencia, por lo tanto se halló una constante única para cada arena.
- Las ecuaciones para el cálculo del coeficiente de permeabilidad basadas en el D₁₀, brindaron una aproximación preliminar de la de dicho coeficiente sin llegar a remplazar o sustituir la importancia del ensayo de permeabilidad pero si son de mucha utilidad para estimar dicho valor, previo a un estudio mas detallado.
- Los valores del coeficiente de permeabilidad obtenidos en el laboratorio fueron del orden de $\cdot 10^{-3}$ cm/seg, que son valores típicos de arenas mal gradadas y limpias.
- Las constantes obtenidas son válidas para las arenas de la Trituradora INGESAN con relación de vacíos entre (45 y 65%) y para las arenas del Río Tona con relación de vacíos entre (40 y 70%).

8. OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

- Con el fin de evitar pérdidas de material, se debe destinar un área demarcada y/o zonificada para el almacenamiento de muestras que se van a utilizar para el desarrollo de las diferentes tesis.
- Los materiales granulares se compactan mucho mejor por vibración, por eso se sugiere reemplazar el compactado manual por un vibrado mecánico y de esta forma probablemente se obtendrán relaciones de vacío menores y resultados más exactos.
- Se recomienda al momento de seleccionar el material, hacer un cuarteo para obtener una muestra representativa ya que si se toma para un ensayo la parte superior de la muestra y en otro ensayo la parte inferior probablemente podrían dar diferentes granulometrías y permeabilidades.
- Es necesario tener en buen estado los tamices debido a que algunos están en mal estado o presentan enmendaduras en sus sellos.
- Es necesario disponer de otro permeámetro de cabeza constante debido a que para su utilización era muy complejo debido al uso por parte del laboratorio de la universidad y de algunas otras pruebas de estudiantes de tesis que estaban realizando dichos ensayos, los cuales atrasó el desarrollo de los mismos.
- Con el fin de evitar pérdidas de material, se debería tener en el laboratorio bandejas para secado de mayor volumen ya que con las bandejas actuales se corre el riesgo de perder material al pasarlo del matraz a dicha bandeja.
- Para evitar alteraciones de las muestras es necesario adquirir un equipo toma muestras Bishop con el fin de conservar sus propiedades In- Situ para que los resultados que se analicen sean cercanos a la realidad.

- En los ensayos de permeabilidad que fueron realizados en el permeámetro de cabeza constante, al compactar las arenas se observa que la compacidad que se hace en el terreno no es la misma en el laboratorio y por lo tanto los valores del coeficiente de permeabilidad obtenido en los ensayos solamente dan órdenes de magnitud mas no da resultados exactos.

BIBLIOGRAFÍA.

- BERRY, Meter L. y REID, David. Mecánica de Suelos, Traducción de la primera edición en inglés de AN INTRODUCTION TO SOIL MECHANICS. Bogotá D.C. Editorial McGRAW-HILL.
ISBN: 958 – 600 – 172 – 5

- BOWLES, Joseph. Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil. Traducción de la segunda edición en inglés. Segunda edición. México D.F. Limusa Noriega Editores, 1990.

- BRAJA M. Das, Principios de Ingeniería de Cimentaciones, Editorial THOMSON, 4ª Edición, MÉXICO, 2001.

- CRESPO VILLALAZ, Carlos. Mecánica de Suelos y Cimentaciones. Quinta edición. Bogotá D.C. Limusa Noriega Editores. México, 2007.
ISBN: 968 – 18 – 3165 – 9

- JUAREZ BADILLO, Eulalio y RICO RODRÍGUEZ, Alfonso. Mecánica de Suelos: Fundamentos de la mecánica de suelos TOMO I. Tercera edición. México D.F. Limusa Noriega Editores, México, 2000.
ISBN: 968 – 18 – 0069 – 9

- MARIN BERNAL, Rodrigo. Normas de Ensayo para Carreteras TOMO I. Bogotá D.C. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 1998.
ISBN: 958 – 8060 – 00 – 1

- WHITLOW, Roy. Fundamentos de Mecánica de Suelos, Traducción autorizada de la segunda edición de la obra BASIC SOIL MECHANICS. Segunda edición. México D.F. Compañía Editorial Continental 1994.
ISBN: 968 – 26 – 1239 – X

- POLANCO HURTADO, Margarita. Mecánica de Suelos. Universidad del Cauca.1996.

ANEXOS

ANEXO A Registro fotográfico

ANEXO B. Resultados de ENSAYOS DE GRANULOMETRÍA
RÍO TONA – Trituradora INGESAN

ANEXO C. CALIBRACIÓN DE MATRAZ

ANEXO D. Resultados de ENSAYOS DE PESO ESPECÍFICO RELATIVO
RÍO TONA – Trituradora INGESAN

ANEXO E. Resultados de ENSAYO DE PERMEABILIDAD

ANEXO F. NORMAS DE INVIAS I.N.V. E – 123
ENSAYOS GRANULOMÉTRICOS

ANEXO G NORMAS DE INVIAS I.N.V. E – 128
ENSAYOS DE PESO ESPECÍFICO RELATIVO

ANEXO H NORMAS DE INVIAS I.N.V. E – 130
ENSAYOS DE PERMEABILIDADES