DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PERFIL DE SUELO PARA FACILITAR EL ESTUDIO DE LA INFILTRACIÓN

OSCAR IVÁN SERNA HERNÁNDEZ

NIDIA YICETH MARÍN CASTRILLÓN

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

TECNOLOGÍA EN SANEAMIENTO AMBIENTAL

BOGOTÁ D.C – 2017

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PERFIL DE SUELO PARA FACILITAR EL ESTUDIO DE LA INFILTRACIÓN

OSCAR IVÁN SERNA HERNÁNDEZ

NIDIA YICETH MARÍN CASTRILLÓN

Trabajo de grado para obtener el título de Tecnólogo en Saneamiento Ambiental.

ASESOR: JORGE ALBERTO VALERO FANDIÑO

INGENIERO CIVIL, MSC.

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

TECNOLOGÍA EN SANEAMIENTO AMBIENTAL

BOGOTÁ D.C – 2017

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN **8**

1 GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADO **9**

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 9
1.1.1 Problema a resolver *9*
1.2 JUSTIFICACIÓN 9
1.3 OBJETIVOS 9
1.3.1 Objetivo general *9*
1.3.2 Objetivos específicos *10*

2 MARCOS DE REFERENCIA **11**

2.1 MARCO TEÓRICO 11
2.1.1 El suelo *11*
2.1.2 Infiltración *14*

3 METODOLOGÍA **17**

3.1 PROCEDIMIENTOS INICIALES 18
3.2 DESARROLLO TÉCNICO 18
3.2.1 Diseño y construcción del simulador de suelos *18*
3.2.2 Montaje para la realización de las pruebas *21*
3.2.3 Costos de elaboración del simulador del suelo *22*
3.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS 22

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS **23**

4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS SUELOS 23
4.2 DETERMINACIÓN DE LOS HIDROGRAMAS DE RESPUESTA ANTE LA TORMENTA DE DISEÑO 25

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES **27**

BIBLIOGRAFÍA **28**

APÉNDICES **31**

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. ESQUEMA DE UNA MUESTRA DE SUELOS, FASES Y SÍMBOLOS. JUÁREZ BADILLO (2005) 12
FIGURA 2. MONTAJE SIMULADOR DE LLUVIA Y SIMULADOR DE SUELOS PARA PRUEBAS CON MUESTRAS DE SUELO 21
FIGURA 3. POROSIDAD DE SUELOS ARENOSOS. FUENTE: (THE COMET PROGRAM, 2006). 24
FIGURA 4. CURVAS DE INFILTRACIÓN PARA LOS TRES TIPOS DE SUELO. AUTORES. 25
FIGURA 5. CURVA DE GRADACIÓN MUESTRA A, SEGÚN ENSAYO PARA DETERMINAR LA GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO, NTC 77-2007. FUENTE: AUTORES 34
FIGURA 6. CURVA DE GRADACIÓN MUESTRA B, SEGÚN ENSAYO PARA DETERMINAR LA GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO, NTC 77-2007. FUENTE: AUTORES 34
FIGURA 7. CURVA DE GRADACIÓN MUESTRA C, SEGÚN ENSAYO PARA DETERMINAR LA GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO, NTC 77-2007. FUENTE: AUTORES 35

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. DENOMINACIÓN DEL SUELO POR TAMAÑO DE PARTÍCULAS. FUENTE: (ORDUZ GÓMEZ J. , 2015).....13
TABLA 2. DIFERENTES PATRONES DE LA FASE DE AIRE EN SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS. ORDUZ GÓMEZ (2012) 16
TABLA 3. METODOLOGÍA 17
TABLA 4. COSTO DE PRODUCCIÓN SIMULADOR DE SUELOS 22
TABLA 5. DETERMINACIÓN DE GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO, MUESTRA A, NTC 77-2007. FUENTE: AUTORES 31
TABLA 6. DETERMINACIÓN DE GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO, MUESTRA B, NTC 77-2007. FUENTE: AUTORES 32
TABLA 7. DETERMINACIÓN DE GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO, MUESTRA C, NTC 77-2007. FUENTE: AUTORES 33
TABLA 8. GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL SUELO Y DEL LLENANTE MINERAL MUESTRA A, B Y C, I.N.V- E 128-13. FUENTE: AUTORES.....36
TABLA 9. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE SUELOS Y ROCAS CON BASE EN LA MASA, MUESTRA A, B Y C, NTC 1495-2013. FUENTE: AUTORES 37
TABLA 10. PERMEABILIDAD DE SUELOS GRANULARES MUESTRA A, I.N.V-E 130-2013 38
TABLA 11. PERMEABILIDAD DE SUELOS GRANULARES MUESTRA B, I.N.V-E 130-2013 39
TABLA 12. PERMEABILIDAD DE SUELOS GRANULARES MUESTRA C, I.N.V-E 130-2013 40
TABLA 13. RESULTADOS MUESTRA A, SIMULADOR DE SUELOS 41
TABLA 14. RESULTADOS MUESTRA B, SIMULADOR DE SUELOS 42
TABLA 15. RESULTADOS MUESTRA C, SIMULADOR DE SUELOS 43

LISTA DE IMÁGENES

IMAGEN 1. SIMULADOR DE SUELOS. AUTORES. 19
IMAGEN 2. BASE Y MECANISMO DE RECOLECCIÓN DE AGUA DEL SIMULADOR. AUTORES. 19
IMAGEN 3. CAJÓN PARA MATERIAL. AUTORES. 20
IMAGEN 4. SIMULADOR DE LLUVIA. DISEÑO: JORGE ALBERTO VALERO. AUTORES. 20

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PERFIL DE SUELO PARA FACILITAR EL ESTUDIO DE LA INFILTRACIÓN

RESUMEN

El presente trabajo de grado tiene como objetivo la creación de un perfil de suelos para la medición de la infiltración de manera didáctica, para el cual se tomaron tres muestras de suelo, en este caso arenas, que previamente fueron sometidas a ensayos para su caracterización. Esto con el fin de visualizar las velocidades de infiltración de modo que se puedan complementar los temas en las clases que así lo requieran de la Universidad Distrital. Tras la elección del diseño del simulador y su construcción, se realizan las pruebas pertinentes con ayuda de un simulador de lluvia. Finalmente se construyen las curvas para cada uno de los tipos de suelo, en las cuales se pueden observar los tiempos y caudales pico obtenidos.

Palabras clave: infiltración – suelo – lluvia – simulador – arena

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A SOIL FLOOR TO FACILITATE THE STUDY OF INFILTRATION

ABSTRACT

The present work of degree has as objective the creation of a profile of soils for the measurement of infiltration in a didactic way, for which three soil samples were taken, in this case sands, which previously were submitted to certain tests for their characterization. This in order to visualize the velocities of infiltration so that they can complement the subjects in the classes that so require it of the Universidad Distrital. After the choice of the design of the simulator and its construction, the relevant tests are carried out with the aid of a rain simulator. Finally, the curves are constructed for each soil type, in which the peak times and flows obtained can be observed.

Keywords: infiltration – soil – rain – simulator – sand

INTRODUCCIÓN

La infiltración es el movimiento del agua de la superficie hacia el interior del suelo, ésta se afecta por la porosidad, textura del suelo, tamaño de las partículas, grado de humedad natural del suelo, presencia de minerales, índice granulométrico, entre otros. (Valverde Conejo, 2000) ; (Maderey Rascón, 2005).

Debido a la difícil comprensión que se tiene durante los procesos de aprendizaje en cuanto a los factores que intervienen en la infiltración en diferentes tipos de suelo, es necesario complementar, demostrando de manera didáctica y perceptible la forma en que varía el fenómeno de infiltración.

La comprensión del proceso de infiltración es importante, porque como estudiantes es indispensable conocer las especificaciones de tal variable, para así determinar las alteraciones producidas y las acciones más efectivas en la prevención de riesgos ambientales. (Instituto Geológico y Minero de España, 2003)

Por lo anterior se elaboró un modelo físico que cuenta con tres (3) diferentes tipos de suelo, en este caso arenas, previamente caracterizados mediante las cuales se espera observar el fenómeno de la infiltración.

Entre los datos relevantes que son objeto de investigación para la caracterización del suelo se encuentran:

-Capacidad de infiltración
-Contenido de humedad
-Determinación granulométrica
-Contenido de finos
-Peso específico

La caracterización se llevó a cabo con base a las Normas Técnicas Colombianas (NTC) y las normas del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS).

El propósito es la aprehensión de los conocimientos básicos de la infiltración por parte de los estudiantes que así lo necesiten en su formación académica, esperando que se logre comprender de manera dinámica con ayuda del simulador, cómo es el comportamiento del agua en diferentes suelos previamente caracterizados, siendo así más evidente el proceso.

1 GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADO

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1 Problema a resolver

Para la formación de tecnólogos y profesionales ambientales es necesaria la comprensión de temas relevantes como los procesos que están inmersos dentro del ciclo hidrológico, que es esencial para el manejo eficiente del agua de lluvia y el agua del suelo (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2005), y así prevenir y mitigar alteraciones desfavorables que puedan afectar el recurso hídrico.

Uno de los procesos que está inmerso dentro de dicho ciclo es la infiltración. Dentro de este proceso se presentan diversas variables que lo afectan de manera notoria (Valverde Conejo, 2000), estas variables no son comprendidas a cabalidad teóricamente, por lo cual, como estudiantes se evidencia la necesidad de crear alternativas de aprendizaje de forma didáctica y práctica que permita interpretar el proceso, creando así un prototipo que simule la infiltración en diferentes suelos previamente clasificados, pretendiendo explicar los factores que afectan el proceso beneficiando a los futuros alumnos, que evidenciarán el proceso de forma dinámica y concreta.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto se enfoca en la demostración de manera didáctica y perceptible en que varía el fenómeno de infiltración en diferentes suelos, en este caso de arenas, (teniendo en cuenta su tamaño), que ya han sido sometidos a pruebas de laboratorio para la obtención de una caracterización completa, esto con el fin de tener una mejor comprensión por parte del estudiante, en cuanto a qué variables afectan la infiltración y cómo es ésta en diferentes muestras de arena.

Cabe mencionar que con el presente estudio se hace entrega a la universidad del prototipo elaborado, el simulador de suelos, como forma de aporte al aprendizaje de los futuros estudiantes de la Universidad Distrital, del cual se beneficiará la comunidad en general que para su formación profesional así lo requiera.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Diseñar y construir un perfil de suelo para facilitar el estudio de la infiltración.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica de los diferentes modelos que existen para el estudio de la infiltración.

- Desarrollar diferentes propuestas de diseño de diferentes tipos de prototipos para el análisis de la infiltración.

- Construir el prototipo finalmente seleccionado para el estudio de la infiltración.

- Ejecutar pruebas con el prototipo construido.

2 MARCOS DE REFERENCIA

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 El suelo

Para la buena comprensión de la infiltración en el suelo, es necesario saber de antemano qué es y de dónde proviene el suelo. Y para ello, es importante nombrar al científico Vasily Vasilievich Dokuchaev, padre de la ciencia del suelo. (CRC Press. Taylor & Francis Group an Informa business, 2011).

A través de su trabajo resumió que el suelo está formado por la interacción compleja de cinco (5) factores naturales: el clima, en el que los elementos que más influyen son la radiación solar: que provee energía para la actividad biológica; la dinámica atmosférica: que establece un cambio hidrotérmico constante; las rocas madre, que influyen en la composición, diversas propiedades y la velocidad e intensidad de los procesos que allí se dan; el relieve, que influye en la distribución y la cantidad de agua que penetra en el suelo; el factor biológico, ya que la acción microbiana hace que la materia orgánica sea asimilable para la capa vegetativa a través del suelo y por su parte, ellas producen humus; y la edad o tiempo de formación, ya que la roca madre forma suelo después de un tiempo prolongado de la acción del proceso formador. (Hernández Jimenez, Ascanio García, Morales Díaz , Bojórquez Serrano, García Calderón, & García Paredes, 2006).

En trabajos posteriores, Williams agregó un sexto factor, la actividad productiva humana que muestra más procesos de degradación que de formación de suelos. (Hernández Jimenez, Ascanio García, Morales Díaz , Bojórquez Serrano, García Calderón, & García Paredes, 2006).

El resultado de la interacción de los diferentes factores con diversas relaciones es una gran diversidad de tipos de suelos. No obstante, es importante resaltar que el hombre es ajeno a la génesis del suelo (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005). Considerando lo anterior y teniendo en cuenta que existen múltiples autores con diferentes definiciones de lo que es el suelo y para fines del presente proyecto se considera pertinente la definición de Juárez Badillo "…*representa todo tipo de material terroso; que se ablande o desintegre por acción de la intemperie*…" (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005)

Los suelos, por lo general, poseen varias capas que son llamadas horizontes a poca o mucha profundidad, estos horizontes están formados de agregados naturales llamados "peds", que son asociaciones de mineral y partículas orgánicas (CRC Press. Taylor & Francis Group an Informa business, 2011). Generalmente sus propiedades cambian en dirección vertical, ya que el suelo tiene perfil (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005), que expone la disposición determinada de las capas (Thompson & Troeh, 2002), típicamente un perfil de suelo está compuesto por horizontes tal que, la primera capa es más rica en materia orgánica y es de un tono más oscuro que las capas inferiores, sus partículas son grumosas, granulares o laminares (Gliessman, 2002), esta es llamada horizonte A, suelo superficial u horizonte orgánico

(Thompson & Troeh, 2002); el horizonte medio suele ser rico en arcilla y es de color más claro, llamado horizonte B o suelo profundo, generalmente su estructura está formada en bloques y el horizonte C usualmente constituye a la roca madre, que puede ser delgado o no existir (Thompson & Troeh, 2002). La profundidad, las características y diferencia entre un horizonte y otro se debe a los efectos combinados de sus propiedades (color, contenido de materia orgánica, características físico-químicas), cobertura vegetal y clima (Gliessman, 2002).

Cualquier muestra de suelo está compuesta por tres (3) fases principales que pueden variar en magnitud de acuerdo a diferentes condiciones: climáticas, erosivas, de origen, entre otras. Dichas fases son la fase sólida, líquida y gaseosa. Estas fases pueden ser calculadas por medios volumétricos, gravimétricos y másicos. (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005). La Figura 1 nos muestra una representación de las fases y su simbología.

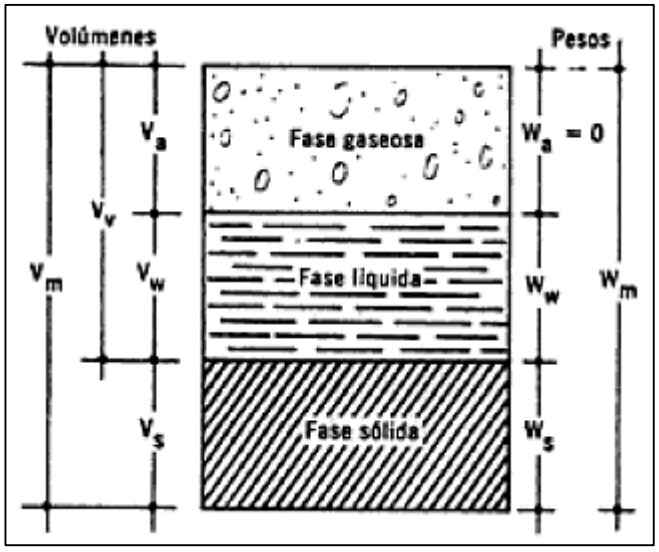


Figura 1. Esquema de una muestra de suelos, fases y símbolos. Juárez Badillo (2005)

Por la gran cantidad de suelos presentes en la naturaleza, se han desarrollado varios métodos de clasificación y cada uno tiene un campo de aplicación según su uso y necesidad (Crespo Villalaz, 2004). La clasificación debe servir para normar el criterio del técnico respecto al suelo que se trate, previamente a un conocimiento profundo de las propiedades del mismo (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005).

Existen varias clasificaciones utilizadas en cada país y las principales son la clasificación de los suelos según el tamaño de sus partículas o mejor conocido como granulometría, la Clasificación de la Asociación Americana de Funcionarios de Caminos Públicos (American Association State Highway Officials), el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.), entre otros. (Crespo Villalaz, 2004).

Para el presente proyecto el método usado fue la clasificación según el tamaño de partículas (granulometría), ésta ofrece un método sencillo para clasificar los suelos, basta dividir un suelo en fracciones granulométricas para clasificarlo (Rico Rodríguez & Del Castillo, 2005).

Generalmente, el tamaño de las partículas da el nombre a los suelos y asocia a algunas propiedades del mismo (Orduz Gómez J. , 2015).

En la Tabla 1, se muestra el tamaño para identificación de suelos, en la cual, la secuencia va de abajo hacia arriba según INV E-102-13 (Norma de ensayo INVÍAS 102 del 2013)

Tabla 1. Denominación del suelo por tamaño de partículas. Fuente: (Orduz Gómez J. , 2015)

Tamaño	Descripción	Subtamaño
Fragmento	Partículas de roca con tamaño mayor a 12" (300mm)	N.A
Guijarro	Partículas de roca comprendida entre 12" y 3" (300mm - 75mm)	N.A
Grava	Partículas de roca/suelo comprendida entre el tamiz de 3" y N°4 (75mm - 4,75mm)	**Gruesa**, entre el tamiz de 3" y 3/4" (75mm - 19mm)
		Fina, entre el tamiz de 3/4" y N°4 (19mm - 4,75mm)
Arena	Partículas de roca/suelo comprendida entre el tamiz N°4 y N°200 (4,75mm - 0,075mm)	**Gruesa**, entre el tamiz N°4 y N°10 (4,75mm - 2,00 mm)
		Media, entre el tamiz N°10 y N°40 (2,00mm - 0,425mm)
		Fina, entre el tamiz N°40 y N°200 (0,425mm - 0,075mm)
Limo	Partículas de suelo comprendida entre el tamiz N°200 y N°270 (0,075mm - 0,005mm)	N.A
Arcilla	Partículas de suelo comprendida entre 0,005mm y 0,001mm	N.A
Coloide	Partículas de suelo menor a 0,001mm	N.A

Para que un suelo tenga una denominación debe tener ciertas cantidades de fracción principal. Así, si un suelo posee una predominancia del 50% o más de un tamaño de partículas se denominará arena, limo o arcilla; para ser grava o arena los tamaños debe predominar en más del 50% de su masa total. Cuando hay fracciones menores que destaquen del principal, se puede describir como *gravoso, arenoso,* etc.; y si hay fracción complementaria, es decir, un tercer material que destaque pero que sea menor al suelo secundario se debe nombrar: *con fragmentos de*…, *con presencia de*…, entre otros. (Orduz Gómez J. , 2015).

Para propósitos del presente trabajo de grado, el simulador de suelos contiene muestras de arena. Las arenas son áridas y están formadas por fragmentos de rocas o minerales. Se clasifican por sus tamaños en arena fina, arena gruesa y media (Graux, 1975) y estas partículas de suelo están comprendidas entre el tamiz N° 200 y N° 4 (0,075mm - 4,75mm).

La caracterización de los suelos es un tema importante, ya que permite conocer su comportamiento, la información se obtiene de ensayos *in situ* (en campo) o ensayos de laboratorio, estos últimos fueron los usados en este trabajo. Estos ensayos deben alterar lo menos

posible el medio natural para que la información obtenida sea fiable (Rodríguez Pons-Esparver, 2001). Hay diferentes ensayos a los que se someten los suelos y existen también diversas normativas que indican los parámetros a seguir para su realización. Y como ya se había dicho anteriormente, la normativa empleada en este trabajo son las Normas Técnicas Colombianas (NTC) y las normas del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS) vigentes.

Entre los ensayos para la caracterización del suelo se encuentran el contenido de humedad, que según la NTC 1495 mide el contenido de agua en suelos, rocas y materiales similares con base en la masa (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC, 2013). Las condiciones de humedad se clasifican en seca, húmeda y saturada. Se dice que un suelo es seco cuando hay ausencia de humedad, es polvorosa y seca al tacto. Húmeda, cuando se ve y se siente húmeda pero sin agua y saturada cuando el agua es visible. (Instituto Nacional de Vías INVÍAS, 2013).

El ensayo de contenido de finos que determina por lavado el material más fino, que es el que pasa por el tamiz de 75µm (malla N° 200), como los limos y arcillas, con la NTC 78. Esta norma junto con la NTC 77 de determinación granulométrica se complementan (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC, 1995). La determinación granulométrica se realiza para determinar la distribución de los tamaños de las partículas de agregados finos y gruesos por medio del tamizado en el laboratorio, los datos de esta norma son útiles en relación a la porosidad. (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC, 2007).

Normalmente, el valor de porosidad en las arenas es del 30% al 40%, o sea, el suelo arenoso retiene el agua con menos fuerza. (Valverde Conejo, 2000). La textura del suelo, por su parte, se refiere al porcentaje en peso de las tres fracciones minerales: arena, limo y arcilla y éstas se definen según el tamaño de las partículas (Thompson & Troeh, 2002). Por ejemplo las arenas se subdividen en grupos con partículas de menor tamaño, que se muestran en la Tabla 1.

La capacidad de infiltración, esta variable se aplica al ensayo de permeabilidad de suelos granulares de la INV E-130-13 y se realiza con el fin de determinar el coeficiente de permeabilidad de suelos granulares a cabeza constante, es decir, debe haber una continuidad de flujo de agua sin cambios en el volumen del suelo durante el ensayo y los vacíos del suelo saturados con agua y sin burbujas de aire y sólo debe hacerse a suelos que no contengan más de 10% de partículas que pasen por el tamiz N° 200 (Instituto Nacional de Vías INVÍAS, 2013).

El peso específico por su parte, con la INV E-128-13 se utiliza para determinar la gravedad específica de suelos y del llenante mineral por medio de un picnómetro. En este ensayo hay una relación entre la masa de un cierto volumen de sólidos a una temperatura y la masa del mismo volumen pero de agua sin gas y a la misma temperatura (Instituto Nacional de Vías INVÍAS, 2013).

2.1.2 Infiltración

Como los suelos están compuestos por la unión de partículas, éstos dejan espacios llamados huecos intersticiales, que están llenos de aire, agua o vapor de agua. Los suelos pueden retener agua de formas diferentes, pueden contener agua sólida, viscosa o libre. Hay agua que

por consecuencia de las uniones moleculares entre ella y los granos de suelo está fija, por lo cual se le llama agua sólida, también se puede encontrar un agua intermedia más o menos libre, llamada agua viscosa y el agua libre fluye normalmente entre los huecos intersticiales (Reunión de ingenieros, 1975).

Después de la precipitación, el agua puede: infiltrarse, escurrirse o estancarse sobre la superficie. Y la capacidad de infiltración y la topografía indican qué camino tomará el agua (Tschinkel H. M., 1965). La infiltración es la entrada del agua en el suelo.

Cuando se habla de capacidad de infiltración, se refiere a la velocidad máxima a la que el agua penetra la superficie del suelo (Tschinkel H. M., 1964), y cuando se menciona la tasa de infiltración se refiere al volumen de agua que entra en un área de sección transversal específica por unidad de tiempo. (Wetland Soils. Genesis, Hidrology, Landscapes, and Classification, 2000).

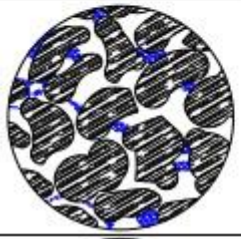
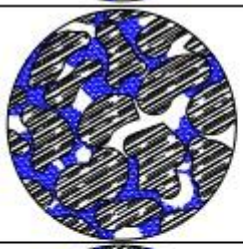
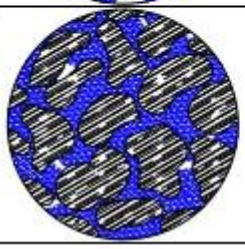
En el momento de la infiltración, la fase gaseosa, anteriormente descrita, empieza a ser desplazada y la fase líquida ocupa su espacio (Orduz Gómez J. O., 2012), como indica la Tabla 2.

Al considerar la fase de suelo en el ciclo hidrológico, interesa la velocidad y la cantidad de infiltración en el suelo a través de la superficie, la percolación hacia abajo desde la superficie de la capa freática, la humedad del suelo en los depósitos y la tasa y la cantidad de agotamiento de almacenamiento en el suelo, ya sea por evaporación en la superficie del suelo o por la transpiración a través de las plantas. La infiltración es probablemente el más importante de estos procesos, ya que controla el grado en que la precipitación total se hace efectiva y entra a la cuenca (Rees, 1973). Por lo cual la infiltración es importante determinante en la disponibilidad de agua.

Hay un gran número de variables que afectan la infiltración; entre ellas, la cobertura vegetal, la textura del suelo, la densidad aparente, la humedad y por supuesto la actividad humana. Probablemente el factor más importante que afecta la infiltración es la abundancia de poros en el suelo, estos dejan o no pasar el agua a las partes más profundas del perfil del suelo (Whitford, 2002). La porosidad afecta la permeabilidad, es decir, el movimiento interno del agua en el suelo, la infiltración, la aireación y la capacidad de retención de agua del suelo. (Thompson & Troeh, 2002).

Y así como existen diferentes variables que afectan la infiltración, hay diversas formas de medirla. No existe un procedimiento estándar para medir la infiltración en campo, ya que se depende de las características físicas del suelo, disponibilidad de equipos, servicios y materiales apropiados. Los métodos para medirla en condiciones de campo se basan en la inundación y estancamiento de agua en la superficie, entrada y salida de agua por surcos y zanjas y aplicación de agua por medio de la aspersión. Entre ellos se encuentran los cilindros infiltrómetros o anillos concéntricos, que son unos de los más usados para el estudio de la velocidad de infiltración en los suelos (Gurovich, 1985). Este consiste en dos anillos metálicos que se clavan al suelo y luego se inundan con agua y en cuanto ésta se va infiltrando se toman medidas de volumen y tiempo, generalmente se hace hasta que la velocidad de infiltración empieza a ser constante (De Santa Olalla Mañas, López Fuster, & Calera Belmonte, 2005).

Tabla 2. Diferentes patrones de la fase de aire en suelos parcialmente saturados. Orduz Gómez (2012)

Fase o etapa		Descripción
A		**Fase completamente continua.** El agua sólo existe en pequeños vacíos. El agua contenida no está necesariamente interconectada. Las fases de aire son continuas en el suelo y se encuentran conectadas con la atmósfera.
B		**Fase parcialmente continua.** El agua ocupa gradualmente todos los pequeños poros y espacios, con relaciones hidráulicas establecidas en algunos sitios. El aire se acumula en los grandes vacíos y todavía se conecta con la atmósfera.
C		**Fase internamente continua.** El agua ha comenzado a acumularse en grandes volúmenes y sella los espacios de la frontera del suelo. El aire atrapado no se encuentra conectado con la atmósfera, pero dentro de la masa de suelo todavía hay sitios donde se encuentra interconectado.
D		**Fase completamente sellada.** El agua contiene burbujas de aire ocluidas, en toda la masa de suelo. El aire sólo aparece en forma de burbujas ocluidas en el agua y se mueven con ella.

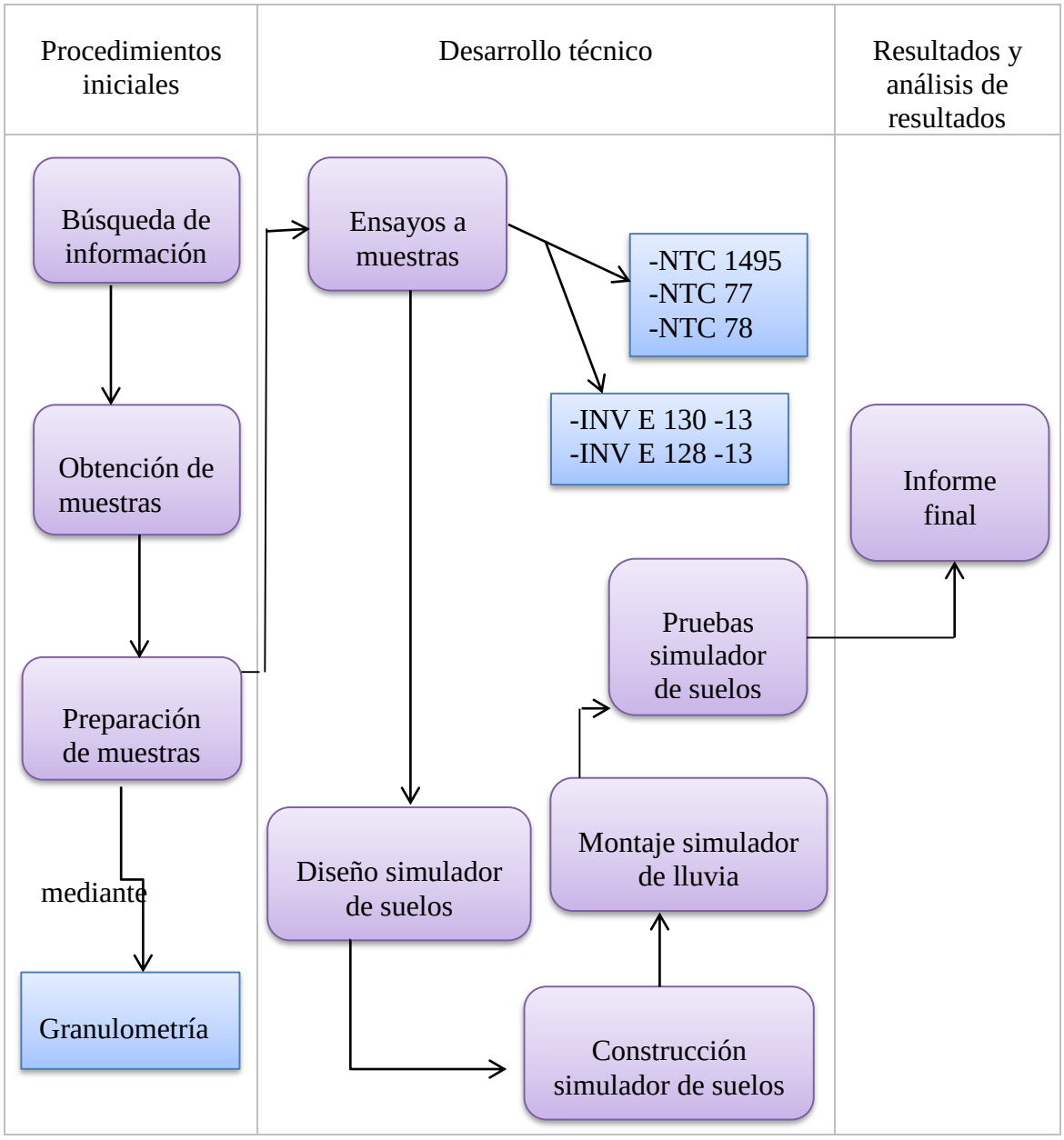
Otro método para la medición de la lluvia es un dispositivo que simula gotas de lluvia en parcelas de superficie variable (0,1 a 1m^2 o de 1 a 40m2), permitiendo estudiar la infiltración con condiciones parecidas a las naturales, así como la escorrentía superficial. (Porta Casanellas & López-Acevedo Reguerín, 2005). En tal dispositivo, se controla la cantidad de lluvia con pluviómetros y se calcula la escorrentía suponiendo evapotranspiración nula y la infiltración se calcula por diferencia (Pulido Bosch, 2014).

Para la medición de la infiltración en suelos en el laboratorio se hace por el método de ensayo de permeabilidad de suelos granulares a cabeza constante según la INV E-130-13, ensayo en el cual se tiene un tanque de cabeza constante con filtro por donde se suministra el agua y se remueve el aire; luego, está el dispositivo para saturar y evacuar especímenes, el cual es cilíndrico y metálico, allí se pone la muestra representativa de suelo con un filtro arriba y debajo de la muestra y en la salida de agua hay una probeta para medir el volumen que sale del dispositivo en cierto tiempo. Lo que indica este método es que, cierto material estando saturado permite el paso de cierta cantidad de agua a una presión constante (Instituto Nacional de Vías INVÍAS, 2013).

3 METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el proyecto de grado, se establecieron tres etapas principales que agrupan una serie de actividades que se pueden observar en la Tabla 3, estas etapas son: procedimientos iniciales, en la cual se hace toda la preparación para el buen desarrollo del proyecto; desarrollo técnico, en la cual se realizan todas las actividades de diseño, construcción y pruebas, por último, la etapa de resultados y análisis que finaliza con la redacción del presente documento; cada una de las actividades es profundizada con detenimiento más adelante.

Tabla 3. Metodología



3.1 PROCEDIMIENTOS INICIALES

En esta etapa se realizó una búsqueda de información para la aclaración de conceptos básicos relacionados con el proyecto. La búsqueda se centró en libros con relación a los suelos y por supuesto referente a la infiltración y factores que influyen en ella para así obtener las muestras de suelos adecuadas y conocer qué tipo de ensayos se debían practicar a dichas muestras y qué normas vigentes eran necesarias para obtener resultados precisos.

3.2 DESARROLLO TÉCNICO

Gracias a la bibliografía encontrada, se realizó la caracterización de las muestras mediante la ejecución de ensayos de laboratorio de acuerdo a las normas NTC e INVÍAS, que se enuncian en la Tabla 3. Las muestras se obtuvieron por granulometría, obteniendo: muestra A con una abertura de tamiz entre 0,84mm y 2,0mm (clasificada como media), muestra B entre 0,425mm y 0,84mm (fina) y la muestra C entre 0,25mm y 0,425mm (fina). Cabe resaltar que para fines del presente proyecto y para evitar posibles confusiones la muestra A es llamada arena gruesa, B media y C fina.

En este punto, se realizó el diseño del simulador de suelo y de lluvia a usar en este trabajo de grado, labores que se analizan con detalle en el siguiente numeral.

Para obtener el caudal de referencia se realizaron pruebas de control donde se usó el simulador de lluvia y el simulador de suelos sin ningún tipo de muestra. En total fueron cinco (5) pruebas; los datos resultantes fueron promediados para así obtener un dato preciso.

Además, los tres tipos de suelo fueron localizados bajo el simulador de lluvia para evaluar su respuesta ante tormentas artificiales. Debido a que durante la ejecución de las pruebas no se contaba con un sistema de recirculación de agua, no fue posible evaluar la respuesta de otras combinaciones de suelo debido al consumo excesivo de agua.

3.2.1 Diseño y construcción del simulador de suelos

Para el diseño del simulador se tuvo en cuenta que fuera sencillo, práctico, resistente, que su material permitiera la visibilidad de la muestra de suelo y del fenómeno en cuestión, que tuviera un filtro que permitiera que el agua traspasara pero la muestra de suelo no, la posibilidad de que las muestras de suelo se pudieran intercalar y que claramente cumpliera con su objetivo de mostrar didácticamente el proceso de infiltración.

El simulador se construyó con acrílico transparente con dimensiones 30x30cm y una altura de 10cm, con tres cajones, cada uno de 3cm de alto. El filtro se hizo con tela dacrón seda de color blanco (ver Imagen 1).



Imagen 1. Simulador de suelos. Autores.

En la Imagen 2, se puede ver la forma de recolección de agua del simulador, que está hecha de plástico vinil (cristal) y tiene forma cóncava, con un agujero en medio en donde hay una conexión con una manguera y una llave de paso para la salida de agua.

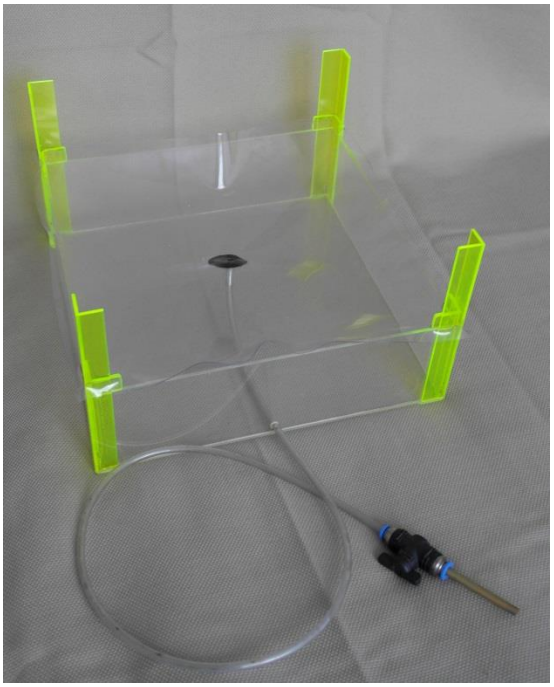


Imagen 2. Base y mecanismo de recolección de agua del simulador. Autores.

En la Imagen 3, se observa uno de los cajones del simulador de suelos, este tiene unos refuerzos en forma de cruz de acrílico transparente para evitar que al poner la muestra de suelo sobre la tela o malla se deforme; con el fin de sostener tanto la tela como los refuerzos, los cajones constan de tornillos.

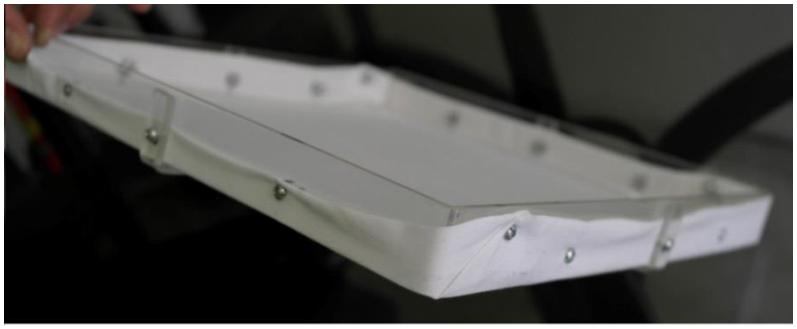


Imagen 3. Cajón para material. Autores.

Para realizar las pruebas al simulador, fue necesario construir un simulador de lluvia que se puede ver en la Imagen 4. Este fue construido con un balde con agujeros adherido a una cubeta, los agujeros son para permitir que el agua siempre esté a la misma altura y se genere una misma presión y por ende, igual caudal. El agua que rebosa es evacuada mediante una manguera. Finalmente, el dispositivo está provisto de una regadera que está conectada directamente al balde por donde sale el agua que simula a la lluvia.



Imagen 4. Simulador de lluvia. Diseño: Jorge Alberto Valero. Autores.

3.2.2 Montaje para la realización de las pruebas

El montaje completo del simulador de suelos y el simulador de lluvia se indica en la Figura 2, donde también se ven las alturas de cada uno.

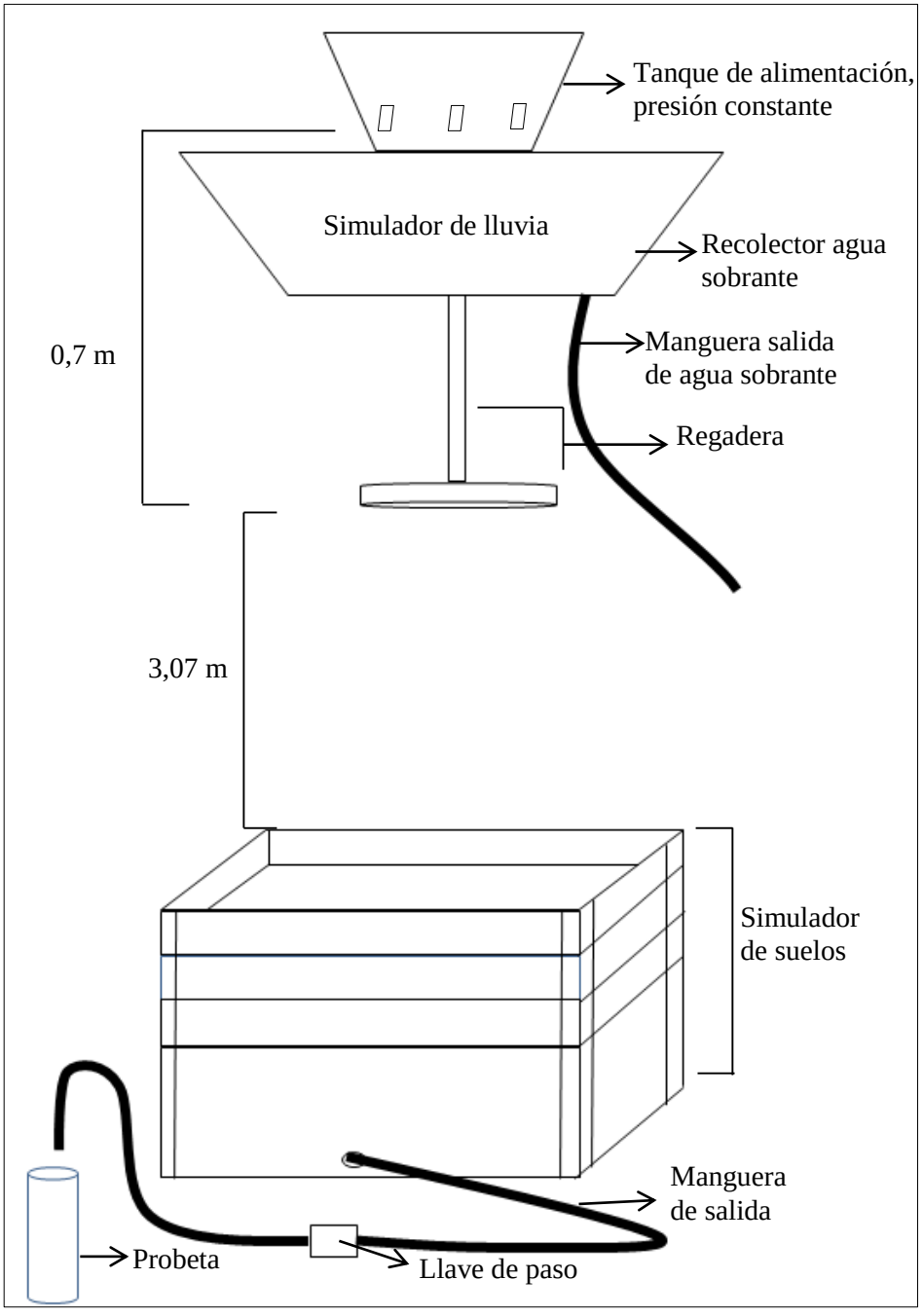


Figura 2. Montaje simulador de lluvia y simulador de suelos para pruebas con muestras de suelo

3.2.3 Costos de elaboración del simulador del suelo

En la Tabla 4, se aprecia el análisis de precios unitarios del perfil de suelos intercambiables. Se aprecia que el costo total del modelo fue de 207 400 pesos.

Tabla 4. Costo de producción simulador de suelos

Descripción	Unidad	Cantidad	Valor unitario ($)	Valor total ($)
Base acrílico transparente ** (30*30*10cm)	Und	1	50.000	50.000
Cinturones de acrílico* * (30*30*3cm)	Und	3	10.000	30.000
Ángulos esquineros (2*2*20cm)	Und	4	7.000	28.000
Tornillos con tuercas	Und	48	200	9.600
Tela dacrón seda	m	2	7.000	14.000
Plástico vinil (cristal) calibre 40	m	2	9.500	19.000
Manguera (D1,75cm)	m	2	5.800	11.600
Llave de paso	Und	1	22.000	22.000
Pegante acrílico cloruro de metileno	Und	1	6.000	6.000
Silicona Pattex 300mL	Und	1	12.900	12.900
Tijeras	Und	1	1.500	1.500
Bisturí	Und	1	1.600	1.600
Jeringa 10mL	Und	1	1.200	1.200
			Valor total	**207.400**

**El acrílico utilizado fue de 3mm

3.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Finalmente, en esta etapa, se redactó el presente informe que contiene los resultados obtenidos de las pruebas realizadas tanto de los ensayos de laboratorio de las muestras de suelo, como de las pruebas con el simulador de suelos y el simulador de lluvia de las cuales se darán detalle en el capítulo 4.

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS SUELOS

Dentro de los ensayos realizados a las muestras de arena se tiene que para la determinación granulométrica de la muestra A, según la Tabla 5 (ver apéndices), los tamaños de las partículas se encuentran distribuidos entre los tamices N°10 y N°20, lo que se puede apreciar en la Figura 5 (ver apéndices) que muestra la abertura del tamiz y el porcentaje del material que pasa o retiene, es decir, el 100% del material pasa a través de una abertura de 2mm, abertura que tiene el tamiz N°10. También se observa que el total del material es retenido sobre el tamiz N°20 cuya abertura es de 0,84mm. Por lo cual, la muestra de arena A tiene un tamaño de partículas entre 2mm y 0,84mm.

Por su parte, la muestra B de acuerdo a la Tabla 6 y la Figura 6 el tamaño de sus partículas está entre el tamiz N°20 y N°40, con aberturas de 0,84mm y 0,425mm respectivamente. En esta muestra el 99,5% del material fue retenido por el tamiz N°40, el 0,5% restante corresponde a material más fino que el tamiz N°200, que tiene una abertura de 0,075mm, lo que quiere decir que el 0,5% del material podría ser material limoso o arena más fina.

En la Tabla 7 y la Figura 7 de la muestra C, el 100% del material pasa el tamiz N°40 con una abertura de 0,425mm, el 99,5% del material es retenido por el tamiz N°60 de abertura 0,25mm, el 0,5% restante corresponde a material más fino que el tamiz N°200, que tiene una abertura de 0,075mm, lo que quiere decir que el 0,5% del material podría ser material limoso o arena más fina. Por lo tanto, la muestra de arena A clasifica como arena media y las muestras B y C como arenas finas, según la Tabla 1. Para fines del presente trabajo, la arena A es denominada como arena gruesa, la arena B como arena media y la arena C como arena fina, esto para indicar que las muestras tienen diferentes tamaños de partículas.

En las tablas mencionadas anteriormente se encuentran datos del contenido de humedad de cada muestra, que son un valor complementario para el ensayo, ya que las muestras usadas en los ensayos de determinación granulométrica, primero fueron usadas para el ensayo de contenido de humedad natural. El contenido de humedad natural se realizó con muestras secas al horno a temperaturas de 105° +/- 5°C y a masa constante. Los resultados de este ensayo se pueden observar en la Tabla 9, estos indican, junto con la granulometría, que a mayor tamaño de partícula, mayor el contenido de humedad, cabe resaltar que dicho contenido de humedad se debe a que una muestra seca puede absorber humedad del ambiente, llamada agua higroscópica. A mayor tamaño de partícula, mayor porosidad y área superficial capaz de absorber más cantidad de agua del aire (Thompson & Troeh, 2002).

En la Tabla 8 se encuentran los resultados de gravedad específica, que indican la relación de la masa contenida en un volumen, y la masa en agua del mismo volumen a una temperatura dada, estos resultados están sujetos al tipo de suelo y su origen (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005). En dicha tabla se observa que la gravedad específica es mayor en cuanto la

arena es más gruesa, ya que la relación de vacíos en las partículas de arena gruesa es menor que la relación de las partículas de la arena fina, teniendo en cuenta que estos valores son de una partícula promedio del total de la muestra (Orson W. & Vaughn E., 2003). En el peso unitario las partículas con mayor tamaño, aunque tienen mayor espacio entre partículas, la densidad es mayor que las partículas con menor tamaño, esto debido a que las partículas más grandes tienen mayor masa en determinado volumen y pocos poros, y para el mismo volumen con partículas de menor tamaño hay menos cantidad de masa porque hay mayor cantidad de poros entre partículas, como se puede apreciar en la Figura 3.



Figura 3. Porosidad de suelos arenosos. Fuente: (The COMET Program, 2006).

Teniendo en cuenta lo anterior, la porosidad creada entre partículas de la arena gruesa son de mayor tamaño que las porosidades de la arena fina, lo que permite el paso de agua infiltrada y drene más rápidamente. La arena fina por tener un espacio poroso menor tiene tasas de infiltración más bajas. (The COMET Program, 2006). Lo cual se constata en los resultados de las pruebas de permeabilidad, ya que esta también arroja el peso unitario, donde las partículas de mayor tamaño son más densas y su capacidad permeable es mayor.

Los resultados de permeabilidad se observan en Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 12 (ver apéndices), las cuales muestran la velocidad de filtración o la velocidad media de avance del agua en la dirección del flujo, que es una línea sinuosa o irregular.

La permeabilidad de la muestra A (Tabla 10), es de 5,73 E -02 cm/s, a una temperatura de 20°C, es decir, en 1 segundo el agua recorre 0,0573cm, que corresponde a la muestra de arena más gruesa, al comparar este resultado con las muestras B y C, 3,19 E -02 cm/s y 2,46 E -02 cm/s, respectivamente, se obtiene que el recorrido de agua se hace más lento cuando la muestra de arena se hace más fina, esto debido a que hay una correlación entre la granulometría de un material y su permeabilidad (ver Figura 3). En los suelos de arena gruesa, los poros entre partículas son de mayor tamaño y por ello su permeabilidad también es mayor; en arenas de menor tamaño, claramente los poros son más pequeños y su permeabilidad más lenta (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005).

Los resultados de las pruebas realizadas con el simulador de suelos están relacionadas en la Tabla 13 (ver apéndices) para la muestra A, arena más gruesa; Tabla 14 para la muestra B, arena media y Tabla 15 para la muestra C de arena fina. Tablas en las cuales se presentan el tiempo y el caudal hallado cuando los materiales fueron sometidos a las pruebas con el simulador de lluvia y de suelos en el montaje descrito en la Figura 2.

4.2 DETERMINACIÓN DE LOS HIDROGRAMAS DE RESPUESTA ANTE LA TORMENTA DE DISEÑO

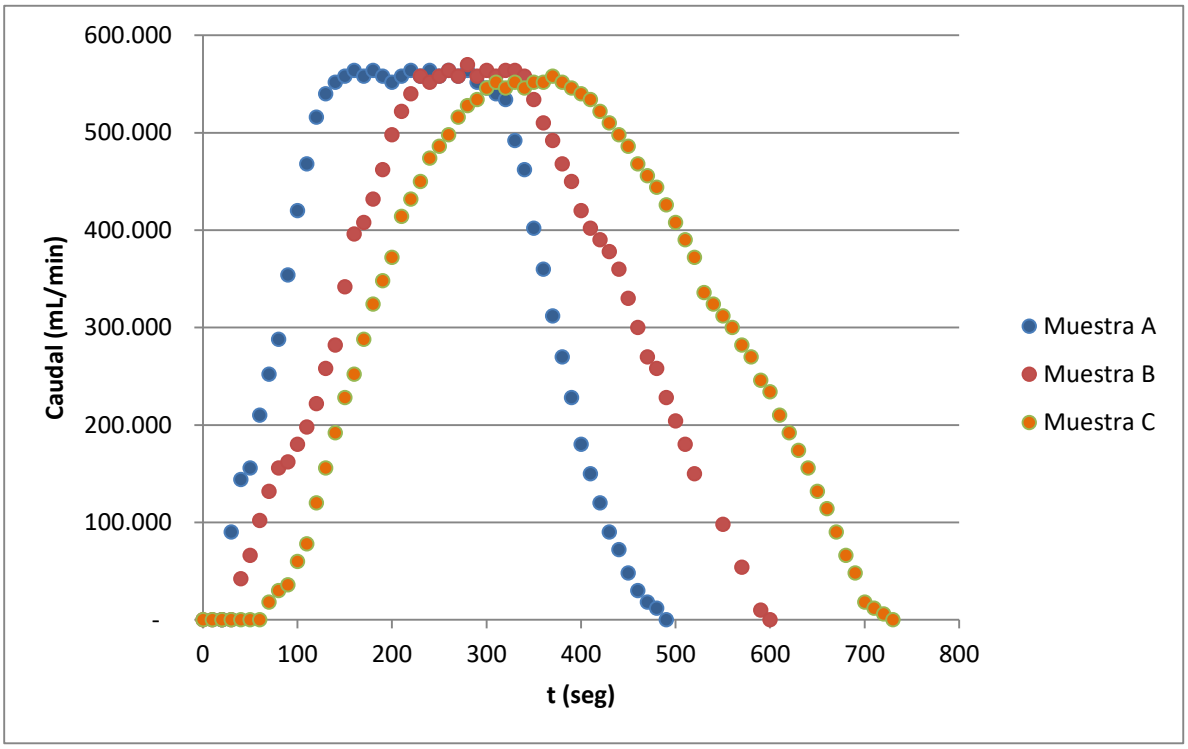


Figura 4. Curvas de infiltración para los tres tipos de suelo. Autores.

El caudal promedio de la lluvia fue de 559mL/min según las pruebas de control realizadas. De acuerdo a las tablas anteriormente referenciadas, se obtienen las curvas de infiltración que se observan en la Figura 4.

Para la muestra A, de arena más gruesa, el caudal máximo de 556mL/min se alcanza a los 140 segundos después de iniciar la lluvia. Dicho caudal se conserva durante 180 segundos hasta llegar un tiempo de 320 segundos, momento en el cual se suspendió la lluvia. Finalmente se observa que el caudal es igual a 0mL/min a los 490 segundos.

En la muestra B, correspondiente a la arena media, el tiempo de concentración es de 230 segundos después de iniciada la lluvia, con un caudal pico de 560mL/min que se mantiene por 110 segundos, llegando a un tiempo de 340 segundos donde fue suspendida la lluvia, y éste llega a 0 mL/min a los 600 segundos.

Por su parte, en la muestra C de arena fina, el caudal se estabiliza a los 288 segundos con un caudal de 547mL/min. Se mantuvo el caudal por 110 segundos, teniendo 390 segundos al suspender la lluvia y tardó 730 segundos en llegar a 0 mL/min.

Hay que tener en cuenta que los datos de caudales pico presentan pequeñas variaciones que se deben a su operación, ya que el simulador de suelos no es un equipo calibrado ni patentado. Dado que en teoría por tener el mismo caudal de lluvia y las mismas alturas, el caudal pico debe ser el mismo para cada una de las pruebas.

Al comparar las curvas de infiltración de cada una de las muestras de las arenas, se observa que la muestra C que corresponde a la arena fina, tarda más tiempo en empezar a producir caudal y también tarda más en llegar a 0 mL/min después de acabar la lluvia. Por el contrario, cuando la partícula es mayor, estos tiempos disminuyen; lo cual confirma los resultados de las pruebas realizadas en el laboratorio y la revisión bibliográfica, que dice que la infiltración va directamente relacionada con la curva granulométrica (tamaño de grano) y la permeabilidad, porque entre mayor el tamaño del grano, mayor es la infiltración y así mismo el tamaño poroso creado entre las partículas, el cual permite el paso del agua más fácilmente.

Es probable que la muestra A tenga mayor capacidad de infiltración gracias a que por el tamaño de partícula, mayor a la de las otras muestras, tenga más retención de agua higroscópica, por lo cual se presenta una rápida saturación, tomando en cuenta que al inicio de la prueba las muestras estaban secas al aire, con cierto contenido de humedad higroscópica más alto, en cuanto el tamaño de partícula es mayor, como se ha dicho anteriormente.

También se observa que hay una relación con los resultados de la gravedad específica de cada una de las muestras y su infiltración ya que la muestra A presenta una mayor densidad, esto quiere decir que las partículas al tener un mayor tamaño presentan poca porosidad de sus partículas, pero las porosidades creadas entre sí, son las que permiten el paso del agua. Mientras que la muestra se hace más fina, su densidad es menor, debido a que se requieren varias partículas finas para llegar a completar un volumen de una partícula más gruesa, por obvias razones las porosidades creadas entre las partículas finas son más pequeñas y por ende, el paso del agua será más lento. (The COMET Program, 2006).

Por lo tanto, la infiltración de cada una de las muestras en orden descendente es A, con alta capacidad de infiltración, B con una capacidad de infiltración media y C con una capacidad de infiltración baja, teniendo en cuenta que se toma como referencia materiales arenosos con tres (3) diferentes tamaños de partículas.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El diseño y construcción del prototipo de simulador de suelos cumple con los requisitos propuestos, ya que los resultados arrojados por el simulador, son comparables con los resultados realizados en el laboratorio, dando como producto esperado, similitudes del comportamiento del agua, cuando esta se infiltra en diferentes muestras, lo que facilita el estudio de la infiltración.

El simulador facilita la observación del fenómeno de infiltración de forma didáctica, desde que la lluvia penetra la superficie del suelo, empieza a humedecerse y posteriormente se satura, hasta que su caudal empieza a estabilizarse, lo que es totalmente evidenciable con el simulador, gracias a los materiales del cual está construido y de su fácil manejo.

El diseño seleccionado para el prototipo del simulador de suelos, en conjunto con el simulador de lluvia, además de facilitar el estudio de la infiltración, permite reproducir de manera similar, lo que ocurre en un terreno con alta capacidad permeable durante periodos lluviosos, teniendo en cuenta que la mayoría el líquido es infiltrado, poco es retenido o almacenado y no se produce escorrentía.

Teniendo en cuenta los diferentes modelos existentes para el estudio de la infiltración, se puede decir que el simulador de suelos ofrece diferentes características tales como: la capacidad de utilizar diferentes tipos de muestras, realizar combinaciones con diferentes perfiles de suelos, tomar fácilmente las mediciones, y la capacidad de realizar pruebas in situ y en laboratorio, dando la oportunidad de observar el fenómeno, que facilita el aprendizaje y estudio del movimiento del agua a través del suelo.

Se sugiere que los resultados obtenidos, no se deben de usar para fines de diseño de construcción o planes de mitigación, ya que son netamente didácticos.

Para posteriores proyectos se recomienda usar un sistema de recirculación del agua, ya que éste fue un impedimento para el tiempo y cantidad de pruebas.

Se propone también que en otros estudios se adicionen más muestras de suelo para la comparación de resultados y así obtener los datos de infiltración del conjunto de suelos existentes.

También, por su sencillo y práctico diseño y teniendo en cuenta que los materiales usados son de fácil acceso, el simulador puede fabricarse o adaptarse con fines de mejorar el estudio de la infiltración.

BIBLIOGRAFÍA

Maderey Rascón, E. (2005). *Geografía para el siglo XXI: Principios de Hidrogeografía Estudio del Ciclo Hidrológico.* México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Wetland Soils. Genesis, Hidrology, Landscapes, and Classification. (2000). Boca Ratón, Estados Unidos: Taylor & Francis Group, LLC.

CRC Press. Taylor & Francis Group an Informa business. (2011). *Hand Book of Soil Sciences Resource Management and Enviromental Impacts* (Segunda ed.). (P. Ming Huang, Y. Li, & M. Summer , Edits.) Boca Ratón, Estados Unidos.

Crespo Villalaz, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones* (Quinta ed.). Mexico D.F.: Limusa S.A. de C.V. Grupo Noriega editores.

De Santa Olalla Mañas, F. M., López Fuster, P., & Calera Belmonte, A. (2005). *Agua y agronomía.* Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa.

Gliessman, S. (2002). *Agroecología: Procesos Ecológicos en Agricultura Sostenible* (Primera ed.). (R. Cohen, A. González Jácome, & J. J. Jiménez Osornio, Trads.) Turrialba, Costa Rica: CATIE.

Graux, D. (1975). *Fundamentos de mecánica del suelo, proyecto de muros y cimentaciones* (Segunda ed.). Barcelona: Editores técnicos asociados S.A.

Gurovich, L. A. (1985). *Fundamentos y diseño de sistemas de riego* (Primera ed.). (T. Saraví, Ed.) San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.

Hernández Jimenez, A., Ascanio García, M. O., Morales Díaz , M., Bojórquez Serrano, J. I., García Calderón, N. E., & García Paredes, J. D. (2006). *El suelo: Fundamentos sobre su formación, los cambios globales y su manejo* (Primera ed.). Tepic, México: Universidad Autónoma de Nayarit.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. (10 de 05 de 1995). NTC 78. Bogotá D.C., Colombia.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. (12 de 10 de 2007). NTC 77. Bogotá D.C., Colombia.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. (17 de 04 de 2013). NTC 1495. Bogotá D.C, Colombia.

Instituto Geológico y Minero de España. (2003). *La depuración de aguas residuales urbanas de pequeñas poblaciones mediante infiltración directa en el terreno. Serie: Hidrogeología y aguas subterráneas N° 4.* (L. Moreno, Ed.) Madrid, España: Instituto Geológico y Minero de España.

Instituto Nacional de Vías INVÍAS. (2013). *Instituto Nacional de Vías INVÍAS.* Recuperado el 10 de 05 de 2015, de http://www.invias.gov.co/

Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (2005). *Mecánica de Suelos. Fundamentos de la mecánica de suelos.* (Vol. I). México: Limusa. Noriega Editores.

Orduz Gómez, J. (Octubre de 2015). Descripción de muestras de suelo y rocas para propósitos de ingeniería, guía para la descripción visual en laboratorio y campo, para propósitos de ingeniería. Bogotá, Colombia.

Orduz Gómez, J. O. (2012). Deslizamientos superficiales inducidos por infiltración. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2005). *Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. El significado de la porosidad del suelo.* Roma, Italia: Orgaización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

Orson W., I., & Vaughn E., H. (2003). *Principio y aplicaciones del riego* (Segunda ed.). España: Reverté. S.A.

Porta Casanellas, J., & López-Acevedo Reguerín, M. (2005). *Agenda de campo de suelos. Infromación de suelos para la agricultura y el medio ambiente.* Cataluña, España: Edidciones Mundi Prensa.

Pulido Bosch, A. (2014). *Nociones de hidrogeología para ambientólogos.* Almería, España: Editorial Universidad de Almería.

Rees, N. E. (1973). *Arthropod and Nematode Parasites, Parasitoids and Predators of Acrididae in America North of Mexico.* Washington, D.C., Estados Unidos: Agricultural Research Service.

Reunión de ingenieros. (1975). *Mecánica de suelos.* Barcelona, España: Editores técnicos asociados S.A.

Rico Rodríguez, A., & Del Castillo, H. (2005). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres, carreteras, ferrocarriles y aeropiestas* (Vol. I). México D.F.: Limusa S.A. de C.V. Grupo Noriega editores.

Rodríguez Pons-Esparver, R. (2001). *Metodología de estimación automática de parámetros de suelos arenosos en ensayos presiométricos.* Madrid, España: Instituto Geológico y Minero de España.

Sewell, A., Johson , M., & Ledesma-Vasquez, J. (2007). *Scielo.* Recuperado el 15 de Octubre de 2016, de Scielo: http://www.scielo.org.mx

The COMET Program. (2006). *COMET. MetEd.* (U. C. Research, Ed.) Recuperado el 15 de 10 de 2016, de https://www.meted.ucar.edu

Thompson, L. M., & Troeh, F. R. (2002). *Los suelos y su fertilidad* (Cuarta ed.). España: Editorial Reverté S.A.

Thompson, L., & Troeh, F. (2002). *Los Suelos y su Fertilidad* (Cuarta ed.). Barcelona, España: Editorial Reverté S.A.

Tschinkel, H. M. (1964). *Curso de Manejo de Cuencas Hidrográficas.* (U. D. Caldas, Ed.) Bogotá, Colombia: Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA.

Tschinkel, H. M. (1965). *Programa de Recursos para el Desarrollo. Apuntes Curso de Hidrología.* Turrialba, Costa Rica: Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA. Centro de Enseñanza e Investigación.

Valverde Conejo, J. C. (2000). *Riego y Drenaje.* San José, Costa Rica: Editorial Universidad Estatal a Distancia.

Whitford, W. G. (2002). *Ecology of Desert Systems.* Nuevo Mexico, Estados Unidos: Academis Press.

APÉNDICES

Tabla 5. Determinación de granulometría por tamizado, muestra A, NTC 77-2007. Fuente: Autores

MUESTRA: A

DESCRIPCIÓN: Arena media de color gris amarillento. Estructura homogénea, seca, no plástica.

OBSERVACION Pasa No.10 - Retiene No. 20

Peso total de la muestra seca (g)	353,9	Suma pesos retenidos (g)	354,0
Peso muestra lavado sobre tamiz 200	354,0	Error%	0,00

TAMIZ	PESO RETENIDO (g)	PESO RETENIDO CORREGIDO (g)	%RETENIDO	%PASA
-	-	-	-	
3"				
2"				
1 1/2"				
1"				
3/4"				
1/2"				
3/8"				
N 4				
N10	0,0	0,0	0,0	100,0
N20	354,0	354,0	100,0	0,0
N40	0,0	0,0	0,0	0,0
N60	0,0	0,0	0,0	0,0
N100	0,0	0,0	0,0	0,0
N200	0,0	0,0	0,0	0,0
FONDO	0,0	0,0	0,0	-
	354,0	354,0		

CONTENIDO DE HUMEDAD	
Recipiente	1
P_1 (g)	403,2
P_2 (g)	392,3
P_3 (g)	38,4
Humedad (%)	**3,1%**

GRAVA (%)	0,0
ARENA (%)	100,0
FINOS (%)	0,0
Clasifica	**SP**

P1= Peso del recipiente mas muestra húmeda P2 = Peso del recipiente mas muestra seca P3 = Peso del recipiente

Tabla 6. Determinación de granulometría por tamizado, muestra B, NTC 77-2007. Fuente: Autores

MUESTRA: B

DESCRIPCIÓN: Arena fina de color gris amarillento. Estructura homogénea, seca, no plástica.

OBSERVACION Pasa No.20 - Retiene No. 40

Peso total de la muestra seca (g)	360,9	Suma pesos retenidos (g	359,3
Peso muestra lavado sobre tamiz 200	359,3	Error%	0,00

TAMIZ	PESO RETENIDO (g)	PESO RETENIDO CORREGIDO (g)	%RETENIDO	%PASA
-				
3"				
2"				
1 1/2"				
1"				
3/4"				
1/2"				
3/8"				
N 4				
N10				
N20	0,0	0,0	0,0	100,0
N40	359,3	359,3	99,5	0,5
N60	0,0	0,0	0,0	0,5
N100	0,0	0,0	0,0	0,5
N200	0,0	0,0	0,0	0,5
FONDO	0,0	0,0	0,5	-
	359,3	359,3		

CONTENIDO DE HUMEDAD	
Recipiente	2
P^1 (g)	407,6
P^2 (g)	398,2
P^3 (g)	37,2
Humedad (%)	**2,6%**

GRAVA (%)	0,0
ARENA (%)	99,5
FINOS (%)	0,5
Clasifica	**SP**

P1= Peso del recipiente mas muestra húmeda P2 = Peso del recipiente mas muestra seca P3 = Peso del recipiente

Tabla 7. Determinación de granulometría por tamizado, muestra C, NTC 77-2007. Fuente: Autores

MUESTRA: C

DESCRIPCIÓN: Arena fina de color gris amarillento. Estructura homogénea, seca, no plástica.

OBSERVACION Pasa No. 40 - Retiene No. 60

Peso total de la muestra seca (g)	357,7	Suma pesos retenidos (g)	355,9
Peso muestra lavado sobre tamiz 200	355,9	Error%	0,00

TAMIZ	PESO RETENIDO (g)	PESO RETENIDO CORREGIDO (g)	%RETENIDO	%PASA
-	-	-	-	
3"				
2"				
1 1/2"				
1"				
3/4"				
1/2"				
3/8"				
N 4				
N10				
N20				
N40	0,0	0,0	0,0	100,0
N60	355,9	355,9	99,5	0,5
N100	0,0	0,0	0,0	0,5
N200	0,0	0,0	0,0	0,5
FONDO	0,0	0,0	0,5	-
	355,9	355,9		

CONTENIDO DE HUMEDAD	
Recipiente	3
P^1 (g)	401,4
P^2 (g)	394,2
P^3 (g)	36,6
Humedad (%)	**2,0%**

GRAVA (%)	0,0
ARENA (%)	99,5
FINOS (%)	0,5
Clasifica	**SP**

P1= Peso del recipiente mas muestra húmeda P2 = Peso del recipiente mas muestra seca P3 = Peso del recipiente

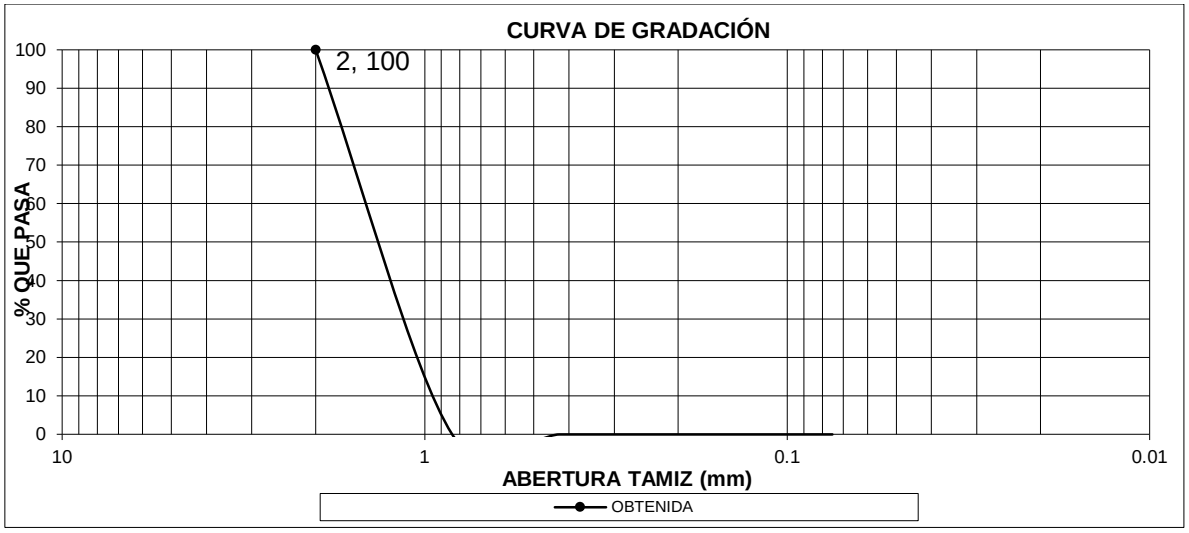


Figura 5. Curva de gradación muestra A, según ensayo para determinar la granulometría por tamizado, NTC 77-2007. Fuente: Autores

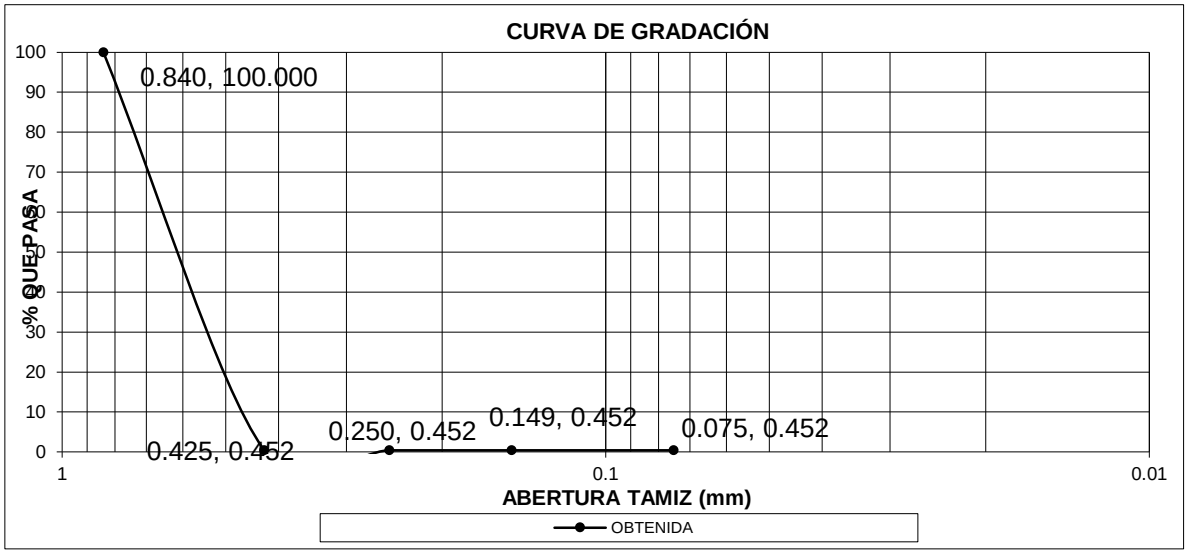


Figura 6. Curva de gradación muestra B, según ensayo para determinar la granulometría por tamizado, NTC 77-2007. Fuente: Autores

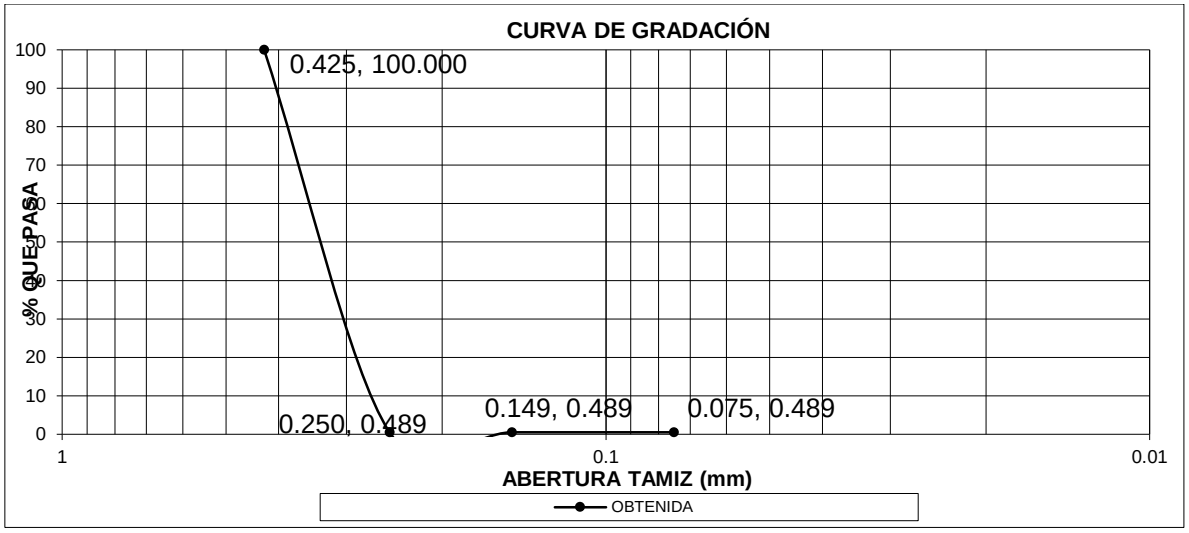


Figura 7. Curva de gradación muestra C, según ensayo para determinar la granulometría por tamizado, NTC 77-2007. Fuente: Autores

Tabla 8. Gravedad específica del suelo y del llenante mineral muestra A, B y C, I.N.V- E 128-13. Fuente: Autores

MUESTRA: A

Arena media de color gris amarillento. Estructura homogénea, seca, no plastica.

Pasa No.10 - Retiene No. 20

Picnómetro	No		1
Masa del picnómetro + aqua + su	(g)	W^b	700,93
Temperatura del ensayo	°C		24,1
Masa del suelo seco	(g)	W^s	100,00
Masa del picnómetro + aqua	(g)	Wa	661,31
Factor de corrección		K	0,9991
Gravedad Especifica		Gs	**1,655**

MUESTRA: B

Arena fina de color gris amarillento. Estructura homogénea, seca, no plastica.

Pasa No.20 - Retiene No. 40

Picnómetro	No		2
Masa del picnómetro + aqua + su	(g)	W^b	697,80
Temperatura del ensayo	°C		24,8
Masa del suelo seco	(g)	W^s	100,00
Masa del picnómetro + aqua	(g)	Wa	659,15
Factor de corrección		K	0,9989
Gravedad Especifica		Gs	**1,628**

MUESTRA: C -

Arena fina de color gris amarillento. Estructura homogénea, seca, no plastica.

Pasa No.40 - Retiene No. 60

Picnómetro	No		1
Masa del picnómetro + aqua + su	(g)	W^b	698,73
Temperatura del ensayo	°C		25,1
Masa del suelo seco	(g)	W^s	100,01
Masa del picnómetro + aqua	(g)	Wa	661,43
Factor de corrección		K	0,9988
Gravedad Especifica		Gs	**1,593**

Tabla 9. Determinación del contenido de humedad de suelos y rocas con base en la masa, muestra A, B y C, NTC 1495-2013. Fuente: Autores

MUESTRA: A

DESCRIPCIÓN: Arena media de color gris amarillento. Estructura homogénea, seca, no plastica.

OBSERVACION Pasa No.10 - Retiene No. 20

CONTENIDO DE HUMEDAD	
Recipiente No.	1
P_1 (g)	403,24
P_2 (g)	392,27
P_3 (g)	38,42
Humedad (%)	**3,1**

MUESTRA: B

DESCRIPCIÓN: Arena fina de color gris amarillento. Estructura homogénea, seca, no plastica.

OBSERVACION Pasa No.20 - Retiene No. 40

CONTENIDO DE HUMEDAD	
Recipiente No.	2
P_1 (g)	407,56
P_2 (g)	398,17
P_3 (g)	37,24
Humedad (%)	**2,6**

MUESTRA: C

DESCRIPCIÓN: Arena fina de color gris amarillento. Estructura homogénea, seca, no plastica.

OBSERVACION Pasa No.40 - Retiene No. 60

CONTENIDO DE HUMEDAD	
Recipiente No.	3
P_1 (g)	401,37
P_2 (g)	394,21
P_3 (g)	36,56
Humedad (%)	**2,0**

P_1 = Masa del recipiente mas muestra húmeda P_2 = Masa del recipiente mas muestra seca P_3 = Masa del recipiente

Tabla 10. Permeabilidad de suelos granulares muestra A, I.N.V-E 130-2013

MUESTRA: **A**

DESCRIPCION: Arena media de color gris amarillento. Estructura homogénea, seca, no plastica.

OBSERVACION Pasa No.10 - Retiene No. 20

Diámetro de la muestra	5,08	cm
Altura de la muestra	7,59	cm
Area de la muestra	20,27	cm^2
Volumen de la muestra	153,84	cm^3
Masa de la muestra inicial	218,4	g
Masa de la muestra final	249,4	g
Peso unitario total	1,420	g/cm^3
Peso unitario Seco	1,162	g/cm^3

CONTENIDO DE HUMEDAD	INICIAL	FINAL
Recipiente	4	5
P_1 (g)	297,70	290,30
P_2 (g)	289,86	245,10
P_3 (g)	37,10	40,90
Humedad (%)	**3,1**	**22,1**

TIEMPO s	VOLUMEN cm^3	CAUDAL cm^3/s	PERMEABILIDAD cm/s
10	102,00	10,2000000	5,46E-02
10	107,00	10,7000000	5,72E-02
10	103,00	10,3000000	5,51E-02
10	104,00	10,4000000	5,56E-02
10	104,00	10,4000000	5,56E-02
10	103,0	10,3000000	5,51E-02
10	108,0	10,8000000	5,78E-02

Permeabilidad Promedio K(cm/s)	5,59E-02
Temperatura de ensayo $^{\circ}C$	19,3
Altura total de la cabeza de agua (cm)	70
Gradiente hidráulico (i)	9,2
Viscosidad Cinematica a la temperatura de ensayo	0,01036
Viscosidad cinematica a 20 $^{\circ}C$	0,01010
Permeabilidad K a 20 $^{\circ}C$ (cm/s)	**5,73E-02**

Tabla 11. Permeabilidad de suelos granulares muestra B, I.N.V-E 130-2013

MUESTRA: **B**

DESCRIPCION: Arena fina de color gris amarillento. Estructura homogénea, seca, no plastica.

OBSERVACION Pasa No.20 - Retiene No. 40

Diámetro de la muestra	5,08	cm
Altura de la muestra	8,01	cm
Area de la muestra	20,27	cm^2
Volumen de la muestra	162,35	cm^3
Masa de la muestra inicial	228,7	g
Masa de la muestra final	271,4	g
Peso unitario total	1,409	g/cm^3
Peso unitario Seco	1,108	g/cm^3

CONTENIDO DE HUMEDAD	INICIAL	FINAL
Recipiente	6	7
P_1 (g)	269,70	308,30
P_2 (g)	263,74	250,43
P_3 (g)	37,20	36,90
Humedad (%)	**2,6**	**27,1**

TIEMPO s	VOLUMEN cm^3	CAUDAL cm^3/s	PERMEABILIDAD cm/s
19	100,00	5,2631579	2,97E-02
19	100,00	5,2631579	2,97E-02
18	100,00	5,5555556	3,14E-02
18	100,00	5,5555556	3,14E-02
19	100,00	5,2631579	2,97E-02
18	99,0	5,5000000	3,11E-02
17	99,0	5,8235294	3,29E-02
17	100,0	5,8823529	3,32E-02

Permeabilidad Promedio K(cm/s)	3,11E-02
Temperatura de ensayo $^{\circ}C$	19,3
Altura total de la cabeza de agua (cm)	70
Gradiente hidráulico (i)	8,7
Viscosidad Cinematica a la temperatura de ensayo	0,01036
Viscosidad cinematica a 20 $^{\circ}C$	0,01010
Permeabilidad K a 20 $^{\circ}C$ (cm/s)	**3,19E-02**

Tabla 12. Permeabilidad de suelos granulares muestra C, I.N.V-E 130-2013

MUESTRA: **C**

DESCRIPCION: Arena fina de color gris amarillento. Estructura homogénea, seca, no plastica.

OBSERVACION Pasa No.40 - Retiene No. 60

Diámetro de la muestra	5,08	cm
Altura de la muestra	7,31	cm
Area de la muestra	20,27	cm^2
Volumen de la muestra	148,16	cm^3
Masa de la muestra inicial	205,7	g
Masa de la muestra final	239,2	g
Peso unitario total	1,388	g/cm^3
Peso unitario Seco	1,076	g/cm^3

CONTENIDO DE HUMEDAD	INICIAL	FINAL
Recipiente	8	9
P_1 (g)	405,20	277,10
P_2 (g)	397,90	223,28
P_3 (g)	86,00	37,90
Humedad (%)	**2,3**	**29,0**

TIEMPO s	VOLUMEN cm^3	CAUDAL cm^3/s	PERMEABILIDAD cm/s
22	100,00	4,5454545	2,34E-02
21	100,00	4,7619048	2,45E-02
23	100,00	4,3478261	2,24E-02
22	99,00	4,5000000	2,32E-02
21	100,00	4,7619048	2,45E-02
20	99,0	4,9500000	2,55E-02
21	100,0	4,7619048	2,45E-02
22	101,0	4,5909091	2,37E-02

Permeabilidad Promedio K(cm/s)	2,40E-02
Temperatura de ensayo °C	19,0
Altura total de la cabeza de agua (cm)	70
Gradiente hidráulico (i)	9,6
Viscosidad Cinematica a la temperatura de ensayo	0,01036
Viscosidad cinematica a 20 °C	0,01010
Permeabilidad K a 20 °C (cm/s)	**2,46E-02**

Tabla 13. Resultados muestra A, simulador de suelos

Tiempo (s)	Caudal (mL/min)
0	0
10	0
20	0
30	90
40	144
50	156
60	210
70	252
80	288
90	354
100	420
110	468
120	516
130	540
140	552
150	558
160	564
170	558
180	564
190	558
200	552
210	558
220	564
230	558
240	564

Tiempo (s)	Caudal (mL/min)
250	558
260	564
270	558
280	564
290	552
300	546
310	540
320	534
330	492
340	462
350	402
360	360
370	312
380	270
390	228
400	180
410	150
420	120
430	90
440	72
450	48
460	30
470	18
480	12
490	0

Tabla 14. Resultados muestra B, simulador de suelos

Tiempo (s)	Caudal (mL/min)
0	0
10	0
20	0
30	0
40	42
50	66
60	102
70	132
80	156
90	162
100	180
110	198
120	222
130	258
140	282
150	342
160	396
170	408
180	432
190	462
200	498
210	522
220	540
230	558
240	552
250	558
260	564
270	558
280	570

Tiempo (s)	Caudal (mL/min)
290	558
300	564
310	558
320	564
330	564
340	558
350	534
360	510
370	492
380	468
390	450
400	420
410	402
420	390
430	378
440	360
450	330
460	300
470	270
480	258
490	228
500	204
510	180
520	150
550	98
570	54
590	10
600	0

Tabla 15. Resultados muestra C, simulador de suelos

Tiempo (s)	Caudal (mL/min)
0	0
10	0
20	0
30	0
40	0
50	0
60	0
70	18
80	30
90	36
100	60
110	78
120	120
130	156
140	192
150	228
160	252
170	288
180	324
190	348
200	372
210	414
220	432
230	450
240	474
250	486
260	498
270	516
280	528
290	534
300	546
310	552
320	546
330	552
340	546
350	552
360	552
370	558
380	552
390	546
400	540
410	534
420	522
430	510
440	498
450	486
460	468
470	456
480	444
490	426
500	408
510	390
520	372
530	336
540	324
550	312
560	300
570	282
580	270
590	246
600	234
610	210
620	192
630	174
640	156
650	132
660	114
670	90
680	66
690	48
700	18
710	12
720	6
730	0