

Análisis de la capacidad de infiltración de suelos naturales, en función de su grado de compactación, pendiente, intensidad de lluvia y altura de caída de lluvia mediante el empleo de un simulador de lluvia

Analysis of the infiltration capacity of natural soils, considering their compaction rate, slope, rainfall intensity and rainfall drop height using a rainfall simulator

Andrés H. Fernández-Barrera¹  <https://orcid.org/0000-0002-1194-4053>

Luis López Quijada^{1*}  <https://orcid.org/0000-0001-8664-8104>

Nicolás Estévez Peralta¹  <https://orcid.org/0009-0009-5315-375X>

Benjamín Garrido Pedreros¹  <https://orcid.org/0009-0009-6314-8620>

Eyber A. Garnica Trujillo¹  <https://orcid.org/0009-0006-6710-3495>

Recibido 7 de abril de 2025, aceptado 19 de Octubre de 2025

Received: April 7, 2025 Accepted: October 19, 2025

RESUMEN

Este estudio examina la influencia de diversos factores en la capacidad de infiltración de suelos naturales, a través de ensayos realizados con un simulador de lluvia modificado. Se evaluaron parámetros como la intensidad de lluvia, los ángulos de inclinación longitudinal y transversal, la altura de caída y la densidad del suelo. Los objetivos principales incluyen la caracterización de los suelos, la realización de ensayos de infiltración y el análisis de datos para identificar el impacto de cada variable. El estudio comenzó con una revisión del estado del arte, abarcando el uso histórico de infiltrómetros y simuladores de lluvia, junto con investigaciones previas sobre escorrentía superficial e infiltración. La metodología incluyó la selección de suelos, el diseño experimental, calibraciones y preparación de muestras. Finalmente, los datos fueron analizados mediante el modelo stepwise, demostrando que tanto la intensidad de lluvia como la densidad del suelo influyen significativamente en la capacidad de infiltración y la retención de agua.

Palabras clave: Infiltración de suelos, simulador de lluvia, intensidad de lluvia, densidad del suelo, modelo stepwise.

ABSTRACT

The present study examines the consequences of various factors on the infiltration capacity of natural soils employing a modified rainfall simulator. Parameters such as rainfall intensity, longitudinal and transverse slope angles, drop height, and soil density were assessed. The main objectives include soil characterization, infiltration tests, and data analysis to identify the impact of each variable. The study began with a state-of-the-art review, encompassing the historical use of infiltrometers and rainfall simulators, as well as previous research on surface runoff and infiltration. The methodology included soil selection, experimental design, calibrations, and sample preparation. Finally, the data were analyzed using the stepwise model, demonstrating that both rainfall intensity and soil density significantly affect infiltration capacity and water retention.

Keywords: Soil infiltration, rainfall simulator, rainfall intensity, soil density, stepwise model.

¹ Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Escuela de Ingeniería de Construcción y Transporte. Valparaíso, Chile.
Email: andres.fernandez@pucv.cl; luis.lopez@pucv.cl; nicolas.estevez.p@mail.pucv.cl; benjagarrido.730@gmail.com; eyber.garnica@ucb.edu.bo
Autor de correspondencia: eyber.garnica@ucb.edu.bo

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las zonas urbanas y las obras que se realizan en ellas han generado un gran impacto en las superficies y cuencas naturales, produciendo mayores áreas de impermeabilidad y acumulaciones de agua debido a la escorrentía superficial [1], [2]. Para abordar estos problemas, es crucial estudiar tanto la infiltración de los suelos como su escorrentía superficial [3]. Estos procesos, aunque relacionados, son diferentes en sus resultados la infiltración del agua superficial en los suelos alcanza las napas subterráneas, mientras que la escorrentía superficial describe el flujo de agua sobre la superficie sin penetrar en capas inferiores del suelo. Ambos son fundamentales para el ciclo hidrológico y se ven influenciados por diversos factores, como la permeabilidad del suelo, la intensidad y duración de la lluvia, la topografía y la cobertura vegetal.

En el ámbito de la construcción, estos factores son de gran importancia, ya que pueden provocar daños en obras de infraestructura y edificaciones. La baja infiltración puede ocasionar cargas internas no deseadas o pérdida de material fino, mientras que la escorrentía superficial puede generar problemas durante la construcción, especialmente en áreas con suelos poco permeables o pendientes pronunciadas. Es esencial planificar adecuadamente la gestión del agua durante la construcción, considerando los factores mencionados y las necesidades de la infraestructura. Esto puede implicar la construcción de sistemas de drenaje adecuados, el uso de materiales permeables y la conservación de la vegetación existente para mejorar la infiltración del suelo y reducir la escorrentía superficial [4].

La presente investigación tiene como objetivo estudiar el comportamiento de diferentes suelos frente a la presencia de agua de lluvia, y analizar la relevancia de diferentes factores en su infiltración y escorrentía superficial. Para ello, se utilizará un simulador de lluvia, donde se colocarán muestras de suelos naturales extraídos de la capa superior del terreno, sin superar los 15 cm de profundidad. Estos suelos se estudiarán bajo diferentes variables para determinar su incidencia en el comportamiento del suelo.

ESTADO DEL ARTE

Para crear un entorno artificial para la investigación de las precipitaciones, los simuladores de lluvia han sido una herramienta de investigación ampliamente utilizada. Los simuladores de lluvia se pueden clasificar principalmente en dos categorías, presurizados y no presurizados. Los simuladores presurizados utilizan boquillas para iniciar el flujo, estas se giran hacia arriba para crear un arco de agua de modo que las gotas puedan alcanzar velocidad cero antes de ganar velocidad nuevamente. Otra forma es utilizar formadores de gotas en lugar de boquillas como hilos de lana empapados, capilares de vidrio, tubo de goma de silicona o goteros ajustables para permitir que las gotas se impulsen utilizando la gravedad.

En [5] utilizaron un simulador portátil de tipo goteo y utilizaron un tamaño de gota mediano grande para compensar la reducción en la velocidad de la gota. Por su parte, [6] utilizaron un análisis de imágenes digitales para obtener el tamaño de los pellets con mayor precisión. Dividieron los pellets analizados por tamiz en siete clases de tamaño. Posteriormente, [7] trabajaron en la actualización de un simulador de lluvia portátil para que los datos de distribución del tamaño de las gotas de los simuladores se asemejen más a los eventos de lluvia natural. Ese mismo año Abudi, Carmi y Berliner [8] recolectaron lluvia en bidones de plástico y utilizaron el coeficiente de Christiansen para estimar la uniformidad de la aplicación de la lluvia.

Para las primeras técnicas de medición de gotas de lluvia que eran manuales, se destaca el método de pellets de harina de Bentley [9] y los métodos fotográficos de Abudi *et al.* [8]. Posteriormente Chowdhury, Islam, Shahriful, Shahrir y Alam [10] determinaron que la intensidad y distribución de la lluvia tiene un gran efecto en la erosión del suelo. Desarrollaron y calibraron una bandeja de acero perforada portátil para simular la lluvia artificial que puede usarse para investigar la erosión del suelo bajo una lluvia determinada. El rendimiento del simulador se comparó con los simuladores de bandeja y de tipo goteo disponibles, así como con la lluvia natural. Con base en parámetros como la distribución del tamaño de las gotas de lluvia, la tasa de acumulación de lluvia, la variabilidad espacial de la lluvia y la velocidad de las gotas se comprobó que el simulador funciona satisfactoriamente.

METODOLOGÍA Y PRUEBAS DE LABORATORIO

Infiltrómetro con simulador de lluvia

Para llevar a cabo este estudio, se empleó un simulador de lluvia con características similares utilizado en la investigación de [15] y la Figura 1 muestra el modelo utilizado.

Para los fines de este análisis de suelo, se realizaron modificaciones en la configuración del infiltrómetro, manteniendo su esencia. Entre los cambios realizados se encuentra la modificación de las cámaras de recolección de agua filtrada, de tener forma rectangular a forma cuadrada y sumando a una cantidad de 36 unidades, distribuidas a lo largo y ancho de la parte inferior del infiltrómetro.

Esto simplifico el análisis de la distribución de la infiltración del suelo. Además, el modelo utilizado incluye cuatro recolectores ubicados en cada lado del marco de la muestra, que recogen el agua superficial del suelo durante el ensayo. El marco de la muestra se aumentó sus dimensiones pasando de 1 m x 1 m a 1,2 m x 1,2 m, con una altura de muestra de 10 cm. Se incrementaron las líneas de lluvia de cinco a doce filas de tuberías de PVC con dispensadores regulables por goteo cada 5 cm a lo largo del mismo, lo que aumentó las zonas de goteo.

El simulador de lluvia también cuenta con una altura de caída de agua regulable, con un rango de movilidad de 30 cm a 100 cm. Se cambiaron los bastidores de ajuste de pendiente por gatos hidráulicos en cada esquina de la bandeja de apoyo de la muestra, lo que

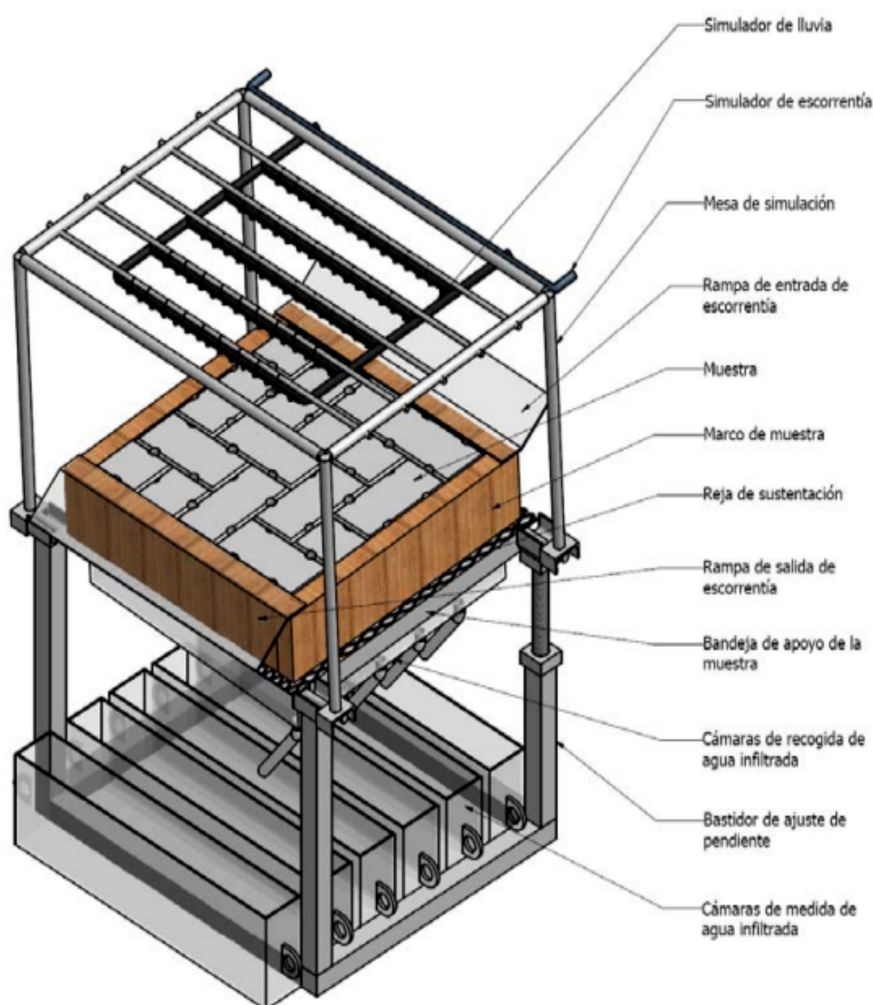


Figura 1. Modelo de simulador de lluvia utilizado en el estudio de [2].

aumentó considerablemente el volumen máximo de muestra a utilizar. El caudal de entrada al simulador de lluvia es variable y regulable, con dos entradas de agua en esquinas opuestas para garantizar un riego homogéneo durante los ensayos.

Selección del material para ensayo

Para los ensayos se recolectaron muestra de la región de Valparaíso y la región Metropolitana, obteniéndose un total de siete muestras, siendo tres procedentes de la región de Viña del mar y cuatro de la región Metropolitana. A estas muestras se le realizaron ensayos acordes a lo estipulado en la normativa chilena y su clasificación internacional, para determinar las características de las muestras de los ensayos.

Las normativas que se usaron para la selección de suelo fueron:

- NCH 1517/1, Límites de consistencia: Determinación del límite líquido.
- NCH 1517/2, Límites de consistencia: Determinación del límite plástico.
- NCH 165, Áridos para mortero y hormigones: Tamizado y determinación de la granulometría.

También se clasificaron los suelos según la normativa internacional, mediante Sistema Unificado de Clasificación de Suelos USCS.

Se establecieron criterios específicos basados en los límites de consistencia y el comportamiento del suelo frente a la presencia de agua y es crucial considerar este aspecto, ya que un suelo con un comportamiento inadecuado puede impedir la infiltración del agua, resultando únicamente en escorrentía superficial. Otro criterio relevante fue la presencia de finos en el suelo, especialmente un alto contenido de suelos limosos, los cuales, al ser muy finos, pueden generar problemas de nula infiltración.

Inicialmente, se realizó un análisis visual y manual de las muestras para descartar aquellas que no cumplieran con los requisitos. Posteriormente, se llevaron a cabo análisis y clasificaciones para siete suelos, identificados como:

- Suelo A: Ubicado en 14 Asientos, Viña del Mar, Valparaíso. Coordenadas: 33°00'02.1"S 71°32'44.3"W.

- Suelo B: Ubicado en 19 Norte, Viña del Mar, Valparaíso. Coordenadas: 33°00'09.7"S 71°32'47.8"W.
- Suelo C: Ubicado en 5 Oriente, Viña del Mar, Valparaíso. Coordenadas: 33°00'52.9"S 71°32'31.0"W.
- Suelo D: Ubicado en Av. Departamental, Cerrillos, región Metropolitana. Coordenadas: 33°29'02.1"S 70°41'39.8"W.
- Suelo E: Ubicado en Calle. Gral. San Martín, Cerro San Ignacio, región Metropolitana. Coordenadas: 33°21'10.4"S 70°41'31.8"W.
- Suelo F: Ubicado en Ruta 68 km9, Pudahuel, región Metropolitana. Coordenadas: 33°26'34.6"S 70°47'29.2"W.
- Suelo G: Ubicado en Av. Departamental, Cerrillos, región Metropolitana. Coordenadas: 33°29'09.2"S 70°41'22.6"W.

Para el procedimiento de la clasificación de los suelos se realizaron las siguientes actividades para la granulometría y para la obtención del índice de plasticidad según la normativa Nch 165 y la Nch 1517 respectivamente.

Clasificación mediante granulometría

El procedimiento utilizado para realizar la granulometría es la siguiente:

- Extracción de muestra de suelos de 500 gr. para suelos arenosos y con gravas y 700 gr. para suelos con mucha presencia de finos.
- Lavado de la muestra, para eliminar parte del material bajo malla #200 y su posterior secado.
- Tamizado de la muestra por los tamices, 1 1/2", 1", 3/4, 3/8, #4, #10, #40, #200.
- Pesaje de la retención de la muestra en los distintos tamices.
- Obtención del porcentaje que pasa de cada uno de los tamices Índice de plasticidad:
- Extracción de muestra de 100 gr. bajo malla #40.
- La muestra se satura durante 24 h.
- Se realiza el ensayo correspondiente para el límite líquido y el límite plástico según normativa.
- Pesaje de las muestras de los ensayos con su correspondiente humedad [11].
- Secado durante 24 h. de las muestras junto con su correspondiente pesaje.
- Obtención del peso de humedad de cada suelo [11].

Una vez obtenidos estos parámetros se clasificaron los suelos los cuales se pueden apreciar en la Tabla 1 y Tabla 2.

La selección de los suelos se realizó considerando el comportamiento frente al agua y la representatividad. Se evitaron las arcillas y los suelos finos. Así, el suelo A no se consideró debido que, al ser una arena arcillosa, tendría una baja infiltración debido a su componente arcilloso, mismo criterio usado en el suelo D que se

evitó por ser un suelo fino y por tanto tendría una baja infiltración. Al contrario, el suelo G tiene una cantidad importante de suelo granular que generaría una infiltración alta. Así quedan los suelos B, C, E y F y de estos, los suelos que no tienen plasticidad son los B, C y F. De estos suelos se debe elegir uno de cada ciudad. Entre los suelos B y C, el suelo es B pobremente graduado lo que establece que tendrá una mayor infiltración, mientras que el C es bien graduado y la infiltración será moderada, motivo por el cual se

Tabla 1. Granulometría y clasificación USCS de la región de Valparaíso.

Suelo A		Suelo B		Suelo C	
Tamiz	% pasa	Tamiz	% pasa	Tamiz	% pasa
3/4	100	3/4	98	3/4	96
3/8	100	3/8	92	3/8	89
4	97	4	82	4	80
10	89	10	67	10	62
40	73	40	35	40	28
200	40	200	6	200	8
> 200		> 200		> 200	
Clasificación		Clasificación		Clasificación	
USCS	SC	USCS	SP - SM	USCS	SW- SM
Limite		Limite	NP	Limite	NP
IP	14	Coeficientes		Coeficientes	
LP	8,4	CC	14,33	CC	14,33
LL	22,4	CU	0,87	CU	0,87

Tabla 2. Granulometría y clasificación USCS de la región Metropolitana.

Suelo d		Suelo E		Suelo F		Suelo G	
Tamiz	% pasa	Tamiz	% pasa	Tamiz	% pasa	Tamiz	% pasa
3/4	100	3/4	100	3/4	100	1 1/2	100
3/8	100	3/8	100	3/8	99	1	95
4	98	4	90	4	95	3/4	89
10	92	10	67	10	76	3/8	73
40	76	40	26	40	45	4	59
200	51	200	14	200	21	10	48
> 200		> 200		> 200		40	28
						200	14
Clasificación		Clasificación		Clasificación		Clasificación	
USCS	ML	USCS	SM	USCS	SM	USCS	SP- SM
Limite		Limite		Limite	NP	Limite	NP
IP	11,5	IP	3			CC	60,7
LP	25	LP	21			CU	0,8
LL	36,5	LL	24				

elige el C para el manejo del caudal. De esta manera, como se elige 1 por ciudad, se seleccionaron los suelos C y F, pertenecientes a 5 Oriente de Viña del Mar y Pudahuel en Santiago, respectivamente.

Parámetros de ensayo

En el análisis de infiltración mediante el uso del infiltrómetro con simulador de lluvia, es crucial regular varios de sus parámetros para garantizar la uniformidad en la medición de los resultados de infiltración [16]. Estos parámetros incluyen la pendiente tanto longitudinal como transversal, el grado de compactación, la altura de caída de la lluvia y la intensidad.

Pendiente de caída

Para la variación de pendiente se dispones de cuatro gatos hidráulicos ubicados en los cuatros esquinas de la bandeja de contención del suelo. Las gatas hidráulicas permiten generar una variación de altura de hasta 10 cm. en cada una de las esquinas, lo que permite una inclinación total de 9%, tanto para la zona transversal, como para la zona longitudinal.

Altura de caída de lluvia

La altura de caída está determinada por la distancia del punto de gotero hasta la superficie del suelo a ensayar, la variación de esta se puede regular en las cuatro equinas de la máquina en la cual se apoya el sistema de goteo, logrando una altura de caída de 30 cm hasta los 100 cm.

Intensidad de caudal

Para la entrada de agua al sistema de simulación de lluvia se dispones de un grifo con apretura regulable, por lo que se determinó el caudal de salida del grifo con un cuarto, media y apertura por lo que se aplicó la fórmula de caudal, ecuación (1):

$$Q = \frac{V}{\tau} \left(\frac{1}{\text{min}} \right) \quad (1)$$

De lo cual se obtuvo un caudal de 3,6 (l/min), 9,57 (l/min) y 20,9 (l/min), para un cuarto, media y total apertura respectivamente, siendo las dos primeras la utilizadas para los ensayos.

Grado de compactación

El ensayo contempla dos estados de compactación de la muestra de suelo: la densidad compactada seca (DCS) y la densidad aparente seca (DAS). Para la DCS y la DAS, se realizaron tres mediciones de densidad en laboratorio conforme a la normativa Nch 1534/2 [11]. Además, se tomaron dos mediciones en infiltrómetro para determinar la densidad real, considerando la masa total incorporada en el volumen conocido del cajón de la muestra. Los valores de densidad obtenidos se detallan en la Tabla 3.

Diseño de experimento

Para analizar el comportamiento de la capacidad de infiltración de suelo, se debe observar la interacción de cada uno de los parámetros anteriormente mencionados, para esto es necesario el uso de un diseño factorial fraccionado 2^{k-p} , debido a que este método permite ver como cada factor influye en los demás sin importar el número de variables y estos al ser más de tres factores se puede realizar el análisis de una forma más eficiente. El diseño factorial fraccionado utilizado es de 2^{k-2} , dando un total de 8 ensayo a realizar como se observa en la Tabla 4.

Lo beneficios que presenta este análisis, es que de muy pocos ensayos se puede obtener mucha información y en el caso que no se obtengan resultados relevantes, se pueden aumentar el número de ensayos con diferentes variables o abordar el análisis desde otro punto de vista, introduciendo nuevas variables o combinaciones sin llegar a la redundancia de datos.

Calibración

Antes de realizar cualquier ensayo, es crucial asegurarse de que la máquina esté funcionando

Tabla 3. Determinación de densidad de laboratorio e infiltrómetro.

	Laboratorio				Densidad real (Infiltrómetro)			
	Suelo 1 (Viña del mar)		Suelo 2 (Santiago)		Suelo 1 (Viña del mar)		Suelo 2 (Santiago)	
	Suelto	Compacto	Suelto	Compacto	Suelto	Compacto	Suelto	Compacto
Densidad en gr/cc	1,59	1,71	1,73	2,01	1,62	1,75	1,76	2,08

Tabla 4. Valor de parámetros de ensayo.

Factor	Unidad	Suelo 1 (Viña del mar)		Suelo 2 (Santiago)	
		–	+	–	+
Densidad	cm ³	1,59	1,71	1,73	2,01
Altura	cm	50	100	50	100
Pend-Trans.	%	2	5	2	5
Pend. Lo	%	2	5	2	5
Intensidad	l/min	3,6	9,57	3,6	9,57

de manera óptima [3], [12]. Por lo tanto, se debe realizar un ensayo solo con el sistema de simulador de lluvia para verificar su correcto funcionamiento. Este proceso implica colocar las bandejas en la parte inferior del simulador de lluvia y ajustar el flujo de agua de cada uno de los goteros. Después de regular los goteros, se deja el sistema funcionando durante 10 min, exactamente el mismo tiempo que dura un

ensayo, y luego se registra el contenido de cada una de las bandejas especificado en la Tabla 5 y Tabla 6.

Como se puede apreciar, tanto para el ensayo realizado con y sin pendiente se obtiene una distribución homogénea en la zona de riego, considerando que la zona central tiene mayor número de goteros que los bordes. También se puede apreciar

Tabla 5. Registro de calibración de simulador de lluvia. Volumen acumulado en litros por bandeja. Ensayo sin geotextil, sin pendiente.

		Intensidad (l/min)	Altura Lluvia (cm)	Pendiente Longitudinal	Pendiente Transversal	Densidad
		9,47	50	0	0	–
	1	2	3	4	5	6
A	1,433	2,311	1,859	1,931	1,716	0,041
B	2,181	3,926	3,771	3,383	2,856	0,179
C	3,359	4,150	3,659	3,024	4,044	0,311
D	3,251	4,404	3,942	3,878	3,218	0,132
E	2,457	3,939	3,012	3,438	3,183	0,156
F	0,952	1,962	1,943	1,924	1,576	0,081

Tabla 6. Registro de calibración de simulador de lluvia. Volumen acumulado en litros por bandeja. Ensayo sin geotextil, con pendiente.

		Intensidad (l/min)	Altura Lluvia (cm)	Pendiente Longitudinal	Pendiente Transversal	Densidad
		9,47	50	2%	2%	–
	1	2	3	4	5	6
A	1,279	1,879	1,395	1,481	1,279	0,028
B	1,552	4,266	4,208	4,088	2,562	0,207
C	2,405	3,596	3,839	3,729	3,166	0,117
D	2,425	3,436	3,810	4,067	3,358	0,350
E	3,533	4,190	3,859	4,281	4,278	0,156
F	1,197	2,318	2,204	2,570	2,275	0,204

que en la columna 6 hay bajas concentraciones de agua al interior de las bandejas, esto se debe a que en estas zonas no se encuentran goteros y el agua que se encuentra en su interior es producido por la salpicadura de las gotas de los goteros cercanos.

Preparación de la muestra de ensayo

Una vez obtenidos los suelos que cumplan los parámetros para ser ensayado, se debe preparar el infiltrómetro para proceder con los ensayos correspondientes, pasos los cuales son los siguientes:

Colocación del geotextil procurando ocupar toda la superficie enrejada, para así evitar posibles fugas de material o agua, en caso de tener un material con alto contenido de fino el geotextil debe ser colocado después del marco para que este se acomode a las paredes del marco evitando de esta forma la filtración de material particulado fino por medio de las paredes laterales.

Acomodar el marco de contención por sobre el geotextil de tal forma que este se encuentre centrado en relación con la rejilla central.

Ajuste del nivel de inclinación para el ensayo deseado, este se debe realizar en este punto para evitar inconveniencias que surgen por el peso del suelo.

Colocación del suelo por sobre el geotextil, procurando tener una caída de material a una altura no mayor de 10 cm. por lo que se recomienda el uso de un cono de Abraham invertido para facilitar el llenado. En caso de ser necesario el material se debe compactar en dos capas de 5 cm. de altura con un pisón de 4,5 kg. procurando homogeneidad en el proceso.

Una vez incorporado el material suficiente se debe enrazar la superficie procurando no ejercer mucha fuerza, la cual puede llegar a alterar la superficie, ya sea compactando o soltando el material de la superficie, también se debe retirar el material excedente que se tenga después del enrase.

Por último, se debe de disponer el sistema de riego sobre el suelo, procurando que se estas se encuentren alineada en la parte más alta del suelo, de tal forma que agua pueda fluir hacia la zona más baja por medio de la gravedad, para efectos de estos ensayos el sistema de riego ha sido colocado a 5 cm de cada bode a partir de la equina correspondiente de A1, la cual se puede apreciar en la Figura 2.

En relación con las bandejas recolectoras de agua deben de tener una disposición transversal y longitudinal, de tal forma que estas abarquen en toda la superficie de la maquina simuladora de lluvia.

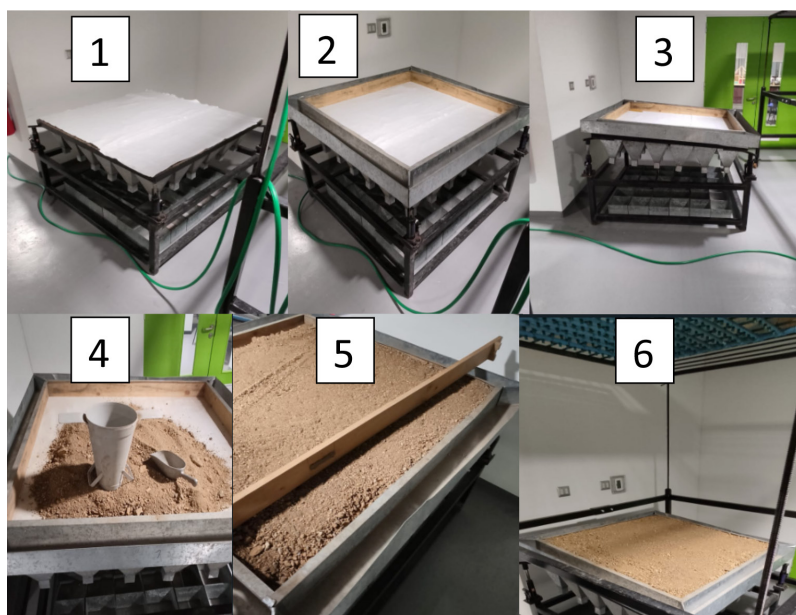


Figura 2. Secuencia de imágenes correspondientes al proceso de preparación del material para ser ensayado.

Ejecución del ensayo

A grandes rasgos el ensayo contempla de tres etapas, riego, escurrimiento y pesaje de las muestras. En la etapa de riego, la muestra debe ser ensayada 10 min a partir de la primera gota que se presente en el sistema, la lluvia se debe generar de forma homogénea y forma continua, evitando cortar el suministro de agua, debido a que si se produce esto la muestra de ensayo proporcionara datos con errores.

Una vez transcurridos los diez minutos de riego se pasa a la etapa de escurrimiento, etapa en la cual se debe esperar 10 min para que el agua restante pueda escurrir por la superficie y pueda llegar a las bandejas recolectoras, tanto de la parte inferior como las ubicadas en los costados del marco de contención de suelo.

La última etapa es la de pesaje, la cual consta de la medición de la masa de agua presente en las treinta y seis bandejas recolectoras ubicadas en la parte inferior, junto con la medición del agua acumulada en las cuatro bandejas laterales.

Gestión de la muestra después del ensayo

Una vez el suelo haya sido ensayado, este debe ser secado para eliminar toda la humedad presente en este, debido a que la presencia de humedad en el suelo puede afectar la escorrentía de superficial en periodos cortos de análisis [13], por el suelo debe ser secado en un horno, junto con lo anterior también se debe limpiar el geotextil, debido a que parte del material se queda pegado en la superficie de este, material el cual se encuentra húmedo y si no es removido puede afectar a los resultados de los ensayos.

Junto con lo anterior se debe pesar la cantidad de agua que se deposita en las bandejas, tanto en las que se encuentran bajo el suelo, la cuales determina el comportamiento de la infiltración y distribución del agua a través del suelo, como las bandejas laterales, en donde se puede apreciar el volumen de agua que escurre superficialmente durante el ensayo. Estos volúmenes de agua deben ser registrados y puestos en el orden para que sea más fácil su análisis y comportamiento con otros suelos.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para el estudio de los diferentes resultados obtenidos se realizará un diseño factorial fraccionario, esto con el fin de estudiar la influencia de cada variable aplicada. Este método es una técnica utilizada en el diseño experimental para investigar el efecto de múltiples variables en un sistema o proceso, de una manera eficiente y económica. Las variables consideradas para este estudio fueron:

- El grado de compactación del suelo.
- Intensidad de la lluvia.
- Pendiente longitudinal de la superficie.
- Pendiente transversal de la superficie.
- Altura de caída de la lluvia.

El diseño factorial fraccionado utilizado fue de tipo 2^{5-2} , lo que implicó la realización de ocho ensayos en total. En la Tabla 7 se presentan las variables, intensidades y combinaciones codificadas utilizadas en este diseño, mientras que la Tabla 8 muestra los valores reales de cada variable para los suelos ensayados.

Tabla 7. Variables, intensidades y combinatorias codificadas del método factorial fraccionado.

	Codificada				
	Intensidad	Altura Lluvia	Pendiente Longitudinal	Pendiente Transversal	Densidad
1	-1	-1	-1	1	1
2	1	1	-1	1	-1
3	1	1	1	1	1
4	1	-1	-1	-1	-1
5	1	-1	1	-1	1
6	-1	1	-1	-1	1
7	-1	1	1	-1	-1
8	-1	-1	1	1	-1

Tabla 8. Variables reales de cada suelo ensayado.

Variables reales suelo 1 (Viña del mar)					Variables reales suelo 2 (Santiago)				
Intensidad l/min	Altura Lluvia (cm)	Pendiente Longitudinal %	Pendiente Transversal. %	Densidad gr/cc	Intensidad l/min	Altura Lluvia (cm)	Pendiente Longitudinal %	Pendiente Transversal. %	Densidad gr/cc
3,6	90	2	5	1,71	3,6	50	2	5	2,01
9,47	100	2	5	1,59	9,47	100	2	5	1,73
9,47	100	5	5	1,71	9,47	100	5	5	2,01
9,47	50	2	2	1,59	9,47	50	2	2	1,73
9,47	50	5	2	1,71	9,47	50	5	2	2,01
3,6	100	2	2	1,71	3,6	ICO	2	2	2,01
3,6	100	5	2	1,59	3,6	ICO	5	2	1,73
3,6	50	5	5	1,59	3,6	50	5	5	1,73

Para la intensidad de lluvia, se emplearon dos caudales: 3,6 (l/min) y 9,47 (l/min), con el objetivo de variar las intensidades de las precipitaciones. Estos caudales fueron calibrados previamente para garantizar una incorporación homogénea y constante del agua en cada ensayo.

En cuanto a las pendientes transversal y longitudinal, se estableció una pendiente máxima de 5% y una mínima de 2%, limitadas por las capacidades de las gatas hidráulicas. No se consideró una pendiente igual a cero, pues se esperaba una infiltración uniforme sobre los tarros en este caso.

La compactación del suelo [11] se evaluó en dos condiciones: suelto y compactado con un pisón. No se buscó alcanzar una compactación específica, sino establecer un método y calcular el porcentaje de compactación posteriormente. Esto se realizó para evitar alteraciones en la muestra ensayada.

En cuanto a la altura de caída de la lluvia, se utilizaron dos alturas: 50 cm. y 100 cm, limitadas por las capacidades del simulador de lluvia. Esta variable permitió investigar cómo afecta el impacto de la lluvia desde diferentes alturas en el proceso de infiltración.

Finalmente, se fijó un tiempo de experimento de 10 min, determinado por la capacidad de los contenedores utilizados.

Esquemas de resultados de volúmenes de agua

A continuación, se presenta la representación gráfica de los resultados obtenidos en los ensayos realizados a cada uno de los suelos, en los cuales se ve representado el volumen de agua recolectada en los 36 recipientes. Estos se encuentran agrupados según su intensidad de lluvia y ordenados de tal forma que se pueda apreciar el orden de las pendientes, aumentando transversalmente hacia la derecha y aumentando longitudinalmente hacia abajo.

De igual forma, se deja registro en las Tablas 9-20, que resumen la información de los litros perdidos, escurridos superficialmente, recolectados en las bandejas inferiores y el volumen de agua absorbida por el suelo ensayado, detallado para cada uno de los suelos. Un análisis más completo de los volúmenes totales se presenta en la Tabla 21 para suelo 1 y Tabla 22 para el suelo 2, donde se integran los resultados de todos los ensayos realizados. Cabe mencionar que solo se destaca el área comprendida entre las casillas A-E y 1-5, ya que esta área es la más representativa del comportamiento de la infiltración del suelo, dado que en estas zonas se generan el goteo y en las zonas externas se pueden producir alteraciones por la caída de agua debido a las paredes del cajón del suelo.

A continuación se tiene ensayos ordenados con intensidad baja, donde el valor mínimo es “0,0” y valor máximo es “1,240”.

Tabla 9. Registro de infiltración de suelo 1. Ensayo número 1.

		Intensidad (l/min)	Altura Lluvia (cm)	Pendiente Longitudinal	Pendiente Transversal	Densidad
		3,6	50	2	5	1,71
	1	2	3	4	5	6
A	0,088	0,084	0,047	0,003	0,044	0,007
B	0,206	0,582	0,214	0,065	0,112	0,003
C	0,333	0,357	0,173	0,091	0,064	0,002
D	0,409	0,415	0,386	0,394	0,357	0,031
E	0,070	0,580	0,615	0,726	0,681	0,128
F	0,017	0,129	0,559	0,872	0,561	0,338

Tabla 10. Registro de infiltración de suelo 1. Ensayo número 6.

		Intensidad (l/min)	Altura Lluvia (cm)	Pendiente Longitudinal	Pendiente Transversal	Densidad
		3,6	100	2	2	1,71
	1	2	3	4	5	6
A	0,086	0,127	0,138	0,109	0,094	0,074
B	0,090	0,212	0,323	0,184	0,431	0,206
C	0,054	0,102	0,307	0,250	0,267	0,126
D	0,050	0,339	0,405	0,295	0,431	0,121
E	0,209	0,329	0,427	0,258	0,522	0,173
F	0,163	0,506	0,587	0,322	0,395	0,125

Tabla 11. Registro de infiltración de suelo 1. Ensayo número 7.

		Intensidad (l/min)	Altura Lluvia (cm)	Pendiente Longitudinal	Pendiente Transversal	Densidad
		3,6	100	5	2	1,59
	1	2	3	4	5	6
A	0,038	0,041	0,144	0,108	0,034	0,044
B	0,010	0,123	0,122	0,326	0,282	0,088
C	0,107	0,380	0,194	0,299	0,164	0,137
D	0,239	0,117	0,482	0,223	0,087	0,248
E	0,132	0,262	0,159	0,147	0,294	0,303
F	0,416	0,763	0,895	0,872	0,835	0,726

Tabla 12. Registro de infiltración de suelo 1. Ensayo número 8.

		Intensidad (l/min)	Altura Lluvia (cm)	Pendiente Longitudinal	Pendiente Transversal	Densidad
		3,6	50	5	5	1,59
	1	2	3	4	5	6
A	0,149	0,164	0,107	0,016	0,036	0,000
B	0,020	0,682	0,067	0,033	0,126	0,003
C	0,003	0,513	0,119	0,518	1,091	0,014
D	0,186	0,012	0,073	0,161	0,701	0,110
E	0,242	0,124	0,231	0,222	1,240	0,003
F	0,036	0,129	0,436	0,087	0,006	0,029

A continuación se tiene ensayos ordenados con intensidad alta, donde el valor mínimo es “0,0” y valor máximo es “3,078”.

Tabla 13. Registro de infiltración de suelo 1. Ensayo número 2.

		Ensayo número 2				
		Intensidad (l/min)	Altura Lluvia (cm)	Pendiente Longitudinal	Pendiente Transversal	Densidad
		9,47	100	2	5	1,59
	1	2	3	4	5	6
A	0,652	0,548	0,590	1,102	0,450	0,530
B	1,005	1,303	2,305	2,134	1,737	0,950
C	1,808	1,291	1,275	2,237	1,519	2,516
D	2,264	1,283	1,728	1,597	2,092	2,457
E	1,523	1,158	2,180	2,635	2,560	3,293
F	1,536	2,333	2,698	3,767	2,507	3,141

Tabla 14. Registro de infiltración de suelo 1. Ensayo número 3.

		Intensidad (l/min)	Altura Lluvia (cm)	Pendiente Longitudinal	Pendiente Transversal	Densidad
		9,47	100	5	5	1,71
	1	2	3	4	5	6
A	0,047	0,156	0,305	0,168	0,217	0,247
B	0,476	0,475	0,901	1,233	0,666	1,914
C	0,473	0,592	0,746	1,874	1,117	2,995
D	1,050	0,150	0,711	1,207	1,249	2,756
E	1,127	0,469	0,858	1,804	1,835	2,054
F	0,909	1,867	2,906	2,701	2,999	4,723

Tabla 15. Registro de infiltración de suelo 1. Ensayo número 4.

		Intensidad (l/min)	Altura Lluvia (cm)	Pendiente Longitudinal	Pendiente Transversal	Densidad
		9,47	50	2	2	1,59
	1	2	3	4	5	6
A	0,222	0,999	1,112	0,647	0,552	0,191
B	0,823	1,843	1,127	1,362	0,602	0,552
C	1,525	1,321	2,090	3,078	2,136	1,135
D	1,548	2,235	1,209	2,863	0,749	2,136
E	1,640	2,706	1,229	1,849	1,716	1,754
F	2,534	4,108	4,792	4,701	4,927	1,815

Tabla 16. Registro de infiltración de suelo 1. Ensayo número 5.

		Intensidad (l/min)	Altura Lluvia (cm)	Pendiente Longitudinal	Pendiente Transversal	Densidad
		9,47	50	5	2	1,71
	1	2	3	4	5	6
A	0,477	0,601	0,184	0,200	0,128	0,174
B	1,038	1,176	0,309	0,459	0,679	0,020
C	1,326	1,640	0,203	0,456	1,210	0,213
D	0,618	2,273	2,500	1,550	1,076	0,495
E	1,331	2,373	1,170	1,378	1,388	0,806
F	1,810	2,718	5,442	5,355	6,518	7,289

A continuación se tiene ensayos ordenados con intensidad baja, donde el valor mínimo es “0,0” y valor máximo es “2,607”.

Tabla 17. Registro de infiltración de suelo 2. Ensayo número 1.

		Intensidad (l/min)	Altura Lluvia (cm)	Pendiente Longitudinal	Pendiente Transversal	Densidad
		3,6	50	2	5	2,01
	1	2	3	4	5	6
A	0,030	0,055	0,066	0,018	0,002	0,349
B	0,017	0,123	0,049	0,001	0,004	0,434
C	0,023	0,008	0,008	0,001	0,002	0,601
D	0,057	0,008	0,002	0,002	0,221	0,637
E	0,128	0,019	0,002	0,135	0,134	0,726
F	0,130	0,093	0,263	0,357	0,242	1,653

Tabla 18. Registro de infiltración de suelo 2. Ensayo número 6.

		Intensidad (l/min)	Altura Lluvia (cm)	Pendiente Longitudinal	Pendiente Transversal	Densidad
		3,6	100	2	2	2,01
	1	2	3	4	5	6
A	0,014	0,001	0,032	0,020	0,076	0,071
B	0,003	0,037	0,058	0,099	0,083	0,289
C	0,030	0,049	0,011	0,031	0,050	0,392
D	0,074	0,016	0,013	0,002	0,017	0,305
E	0,096	0,038	0,023	0,098	0,282	0,261
F	0,181	0,302	0,335	0,281	0,568	0,654

Tabla 19. Registro de infiltración de suelo 2. Ensayo número 7.

		Intensidad (l/min)	Altura Lluvia (cm)	Pendiente Longitudinal	Pendiente Transversal	Densidad
		3,6	100	5	2	1,73
	1	2	3	4	5	6
A	0,008	0,001	0,019	0,060	0,008	0,038
B	0,028	0,068	0,188	0,151	0,238	0,021
C	0,187	0,212	0,143	0,202	0,158	0,341
D	0,299	0,099	0,140	0,091	0,124	0,105
E	0,141	0,189	0,141	0,250	0,448	0,173
F	0,751	0,787	0,725	1,417	1,256	1,979

Tabla 20. Registro de infiltración de suelo 2. Ensayo número 8.

		Intensidad (l/min)	Altura Lluvia (cm)	Pendiente Longitudinal	Pendiente Transversal	Densidad
		3,6	50	5	5	1,73
	1	2	3	4	5	6
A	0,006	0,004	0,009	0,028	0,010	0,047
B	0,008	0,005	0,104	0,073	0,006	0,019
C	0,004	0,176	0,340	0,068	0,018	0,218
D	0,052	0,029	0,161	0,031	0,039	0,180
E	0,057	0,243	0,177	0,092	0,364	0,876
F	0,326	0,727	0,999	1,229	1,719	2,460

Tabla 21. Tabla resumen de volúmenes de agua registrados en el suelo 1.

	Ensayo numero 1 (litros)	Ensayo numero 2 (litros)	Ensayo numero 3 (litros)	Ensayo numero 4 (litros)	Ensayo numero 5 (litros)	Ensayo numero 6 (litros)	Ensayo numero 7 (litros)	Ensayo numero 8 (litros)
Litros perdidos	1,512	5,290	4,617	3,338	4,986	1,684	1,992	2,778
Escurrimiento Sup.	0,000	0,995	19,608	0,000	4,710	0,000	0,000	0,000
Agua en bandejas	9,743	64,703	45,975	65,826	56,584	8,836	9,840	7,686
Agua interior suelo	24,745	23,712	24,500	25,536	28,420	25,480	24,168	25,536
	36,000	94,700	94,700	94,700	94,700	36,000	36,000	36,000

Tabla 22. Tabla resumen de volúmenes de agua registrados en el suelo 2.

	Ensayo numero 1 (litros)	Ensayo numero 2 (litros)	Ensayo numero 3 (litros)	Ensayo numero 4 (litros)	Ensayo numero 5 (litros)	Ensayo numero 6 (litros)	Ensayo numero 7 (litros)	Ensayo numero 8 (litros)
Litros perdidos	1,900	4,083	2,597	8,100	2,418	2,450	1,989	2,014
Escurrimiento Sup.	3,887	16,066	40,994	32,008	27,772	4,755	3,884	3,657
Agua en bandejas	6,598	55,117	26,917	34,912	40,318	4,891	11,185	10,895
Agua interior suelo	23,616	19,434	24,192	19,680	24,192	23,904	18,942	19,434
	36,000	94,700	94,700	94,700	94,700	36,000	36,000	36,000

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para el análisis estadístico [14] de la infiltración se utilizó el software R-estudió mediante el método Stepwise, con el objetivo de encontrar el modelo de combinación ideal para extrapolar y predecir el comportamiento de la infiltración bajo distintas condiciones. A cada uno de los suelos se les realizó un análisis del comportamiento de la infiltración y de la capacidad de almacenamiento del agua en su interior, bajo distintas condiciones.

Análisis estadístico suelo 1

Para el suelo 1, como se puede apreciar en la Tabla 23, si bien se tiene una posible fórmula de tendencia utilizando los cinco parámetros, esta no permite predecir el comportamiento de la infiltración, debido a que ninguno de estos valores es relevante

para su análisis, producto que el valor de $Pr(>|t|)$ o también llamado p-value indica que a menor valor de este, mayor es la fiabilidad del resultado final, por lo que para efectos del análisis de la infiltración se tiene que ninguno de las cinco variables son lo suficientemente relevante para el análisis del comportamiento, o sea un p-value menor a 0,05%, provocando que el modelo no se puede desarrollar.

El análisis de capacidad de almacenamiento (Tabla 24) muestra que solo dos variables son utilizadas: la altura de la lluvia y la intensidad. La intensidad es la más relevante, dado su p-value cercano a cero. Además, el valor estimativo de la intensidad es negativo, lo que indica que es inversamente proporcional al almacenamiento de agua en el suelo. Esto se puede justificar observando la ejecución de los ensayos, ya que al caer el agua con un caudal alto se generan

Tabla 23. Tabla de valores de R-estudios, analizados en función de la capacidad de infiltración del suelo 1.

lm (fórmula + Infiltración+ Almacenamiento del Suelo + Pendiente Longitudinal + Densidad + Pendiente Transversal + Altura lluvia = Resultados Suelo 1				
	Estimate	Std.Error	tvalue	Pn(> t)
(Intercept)	1,977869	0,5235453	3,778	0,0635
Almacenamiento suelo (A)	0,1579028	0,0827888	1,907	0,1967
Pendiente L (pL)	-0,0224246	0,0124965	-1,794	0,2146
Densidad (d)	-0,5479171	0,3122496	-1,755	0,2214
Pendiente T(pT)	-0,0143456	0,0124901	-1,149	0,3696
Altura lluvia (H)	-0,0008088	0,0007503	-1,078	0,39
Signif. Codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0.1 ' ' 1				
$y = A \cdot 0,158 - pL \cdot 0,022 - d \cdot 0,548 - pT \cdot 0,014 - H \cdot 0,001 + 1,978$				

Tabla 24. Tabla de valores de R-estudios, analizados en función de la capacidad de almacenamiento de agua del suelo.

**lm (formula = Alm Suelo ~Intensidad + 'Altura lluvia' = Resultados Suelo 1				
	Estimate	Std.Error	tvalue	Pn(> t)
(Intercept)	0,509087	0,008087	62,954	9,10E-08
Intensidad (I)	-0,225737	0,008087	-27,915	1,10E-06
Alt lluvia (H)	-0,011512	0,008087	-1,424	0,214
Signif. Codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0.1 ' ' 1				
$y = A - I \cdot 0,226 - H \cdot 0,016 + 0,509$				

pequeños surcos donde fluye sin dar tiempo a que el agua penetre en el interior del suelo, demorando su absorción.

Análisis estadístico suelo 2

Los resultados del análisis de infiltración para el suelo 2 (Tabla 25) indican que en el análisis de la infiltración

Tabla 25. Tabla de valores de R-estudios, analizados en función de la capacidad de infiltración del suelo 2.

lm (formula = Infiltración ~ Intensidad = Resultados Suelo 2				
	Estimate	Std. Error	tvalue	Pn(> t)
(Intercept)	0,77875	0,02886	26,985	1,71E-07
Intensidad (I)	-0,10375	0,02886	-3,595	1,14E-02
Signif. Codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0.1 ' ' 1				
$y = -I \cdot 0,104 + 0,779$				

se observa que solo se analiza el comportamiento frente a la variación de la intensidad de la lluvia, siendo su relevancia de una magnitud media, lo que podría generar errores al extrapolar datos a partir de esta información. La relación es inversamente proporcional al disminuir la intensidad, se facilita la infiltración en el suelo debido a que un menor caudal permite la entrada paulatina de agua en su interior.

Como se observa en la Tabla 26, tres variables inciden en el comportamiento en el suelo 2, pero solo dos tienen alta relevancia: la intensidad de entrada y la densidad del suelo. La intensidad es inversamente proporcional, mientras que la densidad es directamente proporcional. Esto indica que, a mayor cantidad de suelo presente en el ensayo, mayor es el agua almacenada, debido al alto contenido de finos en el suelo que facilita la absorción de agua.

CONCLUSIÓN

Como conclusión se tiene, que este proyecto se finalizó cumpliendo con todos los objetivos planteados inicialmente.

Este proyecto se finalizó cumpliendo con todos los objetivos planteados inicialmente. Se logró realizar

el estudio y caracterización de siete suelos, los cuales fueron clasificados y seleccionados por sus diferentes características. Finalmente, los ensayos con simulador de lluvia se realizaron con dos de estos, clasificados según la clasificación USCS como arena bien graduada limosa y arena pobremente graduada limosa.

Respecto a la simulación, se cumplió con la metodología previamente establecida. Se calibró la máquina correctamente, se prepararon las muestras y se ejecutaron los ensayos, siguiendo los cuidados requeridos en cada parte.

Se realizaron análisis estadísticos de las diferentes variables estudiadas, incluyendo la densidad del suelo, la intensidad de lluvia, la altura de caída de lluvia y las pendientes. Utilizando el método stepwise, se determinó la influencia de estos factores en la infiltración y su utilidad para la predicción futura del comportamiento del suelo. Además, se analizó cómo estos factores afectaban el porcentaje de humedad en los suelos.

Los resultados indicaron que factores como la intensidad de lluvia afectan la capacidad de infiltración del agua en el suelo de manera

Tabla 26. Tabla de valores de R-estudios, analizados en función de la capacidad de almacenamiento de agua suelo 2.

lm (Alm Suelo ~ Intensidad + Densidad + 'Pendiente L' = Resultados Suelo 2				
	Estimate	Std. Error	tvalue	Pn(> t)
(Intercept)	0,43755	0,003505	124,847	2,47E-08
Intensidad (I)	-0,195875	0,003505	-55,889	6,14E-07
Densidad (D)	-0,044925	0,003505	12,819	2,13E-04
Pendiente L(pL)	-0,02415	0,003505	-6,891	2,33E-03
Signif. Codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0.1 ' ' 1				
$y = -I \cdot 0,196 - D \cdot 0,045 - pL \cdot 0,024 + 0,348$				

inversamente proporcional. Esto significa que, en suelos naturales, una lluvia de alta intensidad podría disminuir la capacidad de infiltración, aumentando el escurrimiento superficial y potencialmente causando acumulaciones de agua o inundaciones en áreas aledañas. Asimismo, la intensidad de lluvia y la densidad del suelo afectan la capacidad de retención de agua, con la intensidad de lluvia nuevamente mostrando una relación inversamente proporcional. Esto se explica por los surcos generados por el impacto del agua, que crean zonas de mayor flujo y evitan la saturación completa del suelo.

REFERENCIAS

- [1] C. Henríquez, G. Azócar y M. Aguayo, "Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile", *Revista de Geografía Norte Grande*, no. 36, pp. 61-75, 2006, doi: 10.4067/S0718-34022006000200004.
- [2] F.J. Aparicio Mijares, *Fundamentos de Hidrología en Superficie*, 1a ed. Ciudad de México, Mexico: Noriega Editores Limusa, 2001.
- [3] S. Wu, L. Chen, N. Wang, and S. Assouline, "Modeling rainfall-infiltration-runoff processes on sloping surfaces subject to rapidly changing soil properties during seal formation," *Journal of Hydrology*, vol. 619, Art. no. 129318, 2023, doi: 10.1016/j.jhydrol.2023.129318.
- [4] Ministerio de Obras Públicas. Dirección de Viabilidad, Santiago, Chile. *Manual de carreteras*, vol. 3: Instrucciones y criterios de diseño (2018). [En línea]. Disponible en: <https://mc.mop.gob.cl/>
- [5] M.A. Clarke and R.P.D. Walsh, "A portable rainfall simulator for field assessment of splash and slopewash in remote locations," *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 32, no. 13, pp. 2052- 2069, 2007, doi: 10.1002/esp.1526.
- [6] J. Arnaez, T. Lasanta, P. Ruiz-Flaño, and L. Ortigosa, "Factors affecting runoff and erosion under simulated rainfall in Mediterranean vineyards," *Soil and Tillage Research*, vol. 93, no. 2, pp. 324-334, 2007, doi: 10.1016/j.still.2006.05.013.
- [7] T. Iserloh, W. Fister, M. Seeger, H. Willger, and J.B. Ries, "A small portable rainfall simulator for reproducible experiments on soil erosion," *Soil and Tillage Research*, vol. 124, pp. 131-137, 2012, doi: 10.1016/j.still.2012.05.016.
- [8] I. Abudi, G. Carmi, and P. Berliner, "Rainfall simulator for field runoff studies," *Journal of Hydrology*, vol. 454-455, pp. 76-81, 2012, doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.05.056.
- [9] W.A. Bentley, "Studies of raindrops and raindrop phenomena," *Monthly Weather Review*, vol. 32, no. 10, pp. 450-456, 1904, doi: 10.1175/1520-0493(1904)32[450:SO RARD]2.0.CO;2.
- [10] E. Chowdhury, A. Islam, M. Shahrif, S. Shahriar, and T. Alam, "Development and calibration of a portable artificial rainfall simulator for reproducible experiments on soil erosion," *Global Science and Technology Journal*, vol. 6, pp. 47-63, 2018.
- [11] Instituto Nacional de Normalización, *Mecánica de suelos. Relación humedad/densidad. Parte 2: Métodos de compactación con pisón de 4.5 kg y 457 mm de caída*, NCh 1534/2, 2008.
- [12] S. Bahddou, W. Otten, W.R. Whalley, H. Shin, M. El Gharous, and R.J. Rickson, "Changes in soil surface properties under simulated rainfall and the effect of surface roughness on runoff, infiltration, and soil loss," *Geoderma*, vol. 431, Art. no. 116341, pp. 1-12, 2023, doi: 10.1016/j.geoderma.2023.116341.
- [13] T. Blume, E. Zehe, and A. Bronstert, "Rainfall-runoff response, event-based runoff coefficients and hydrograph separation," *Hydrological Sciences Journal*, vol. 52, no. 5, pp. 843-862, 2007, doi: 10.1623/hysj.52.5.843.
- [14] D.C. Montgomery, *Diseño y Análisis de Experimentos*, 2a ed. Ciudad de México, México: Limusa Wiley, 2004.
- [15] L. Sañudo-Fontaneda, J. Rodríguez-Hernández, A. Vega-Zamanillo, and D. Castro-Fresno, "Laboratory analysis of the infiltration capacity of interlocking concrete block pavements in car parks," *Water Science and Technology*, vol. 67, no. 3, pp. 675-681, 2013, doi: 10.2166/wst.2012.614.
- [16] W. Wei, J. Fuyan, Y. Lei, C. Liding, Z. Handan, and Y. Yang, "Effects of surficial condition and rainfall intensity on runoff in a loess hilly area, China," *Journal of Hydrology*, vol. 513, pp. 115-126, 2014, doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.03.022.