

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA AMBIENTAL



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

Facultad de Ingeniería

Influencia de las propiedades hidro-mecánicas de estructuras de suelo reforzado con geosintéticos permeables en el comportamiento y desarrollo del fenómeno de la barrera capilar.

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR EL TÍTULO DE MAGISTER EN
INGENIERÍA

Autor:Juan Carlos Guzmán Martínez

Director:Edwin Fabián García Aristizábal

Co-Director:Carlos Alberto Vega Posada

Medellín, 2021

COLOMBIA

¿Qué necesidad hay de esperanzas si estamos vivos? Vivir es en sí el acto más esperanzado del mundo. Sólo en la muerte no existe la esperanza.
Gonzalo Arango

AGRADECIMIENTOS

Recuerdo el momento de iniciar este documento; aglutinado de energías y disyuntivas. Abarrotado de ganas de aportar en la compresión del suelo, en realidad con curiosidad de adentrarme en las “oscuras aguas” de ese material y la interacción con otros, compuesto por incertidumbres y múltiples interrogantes dado por su condición o naturaleza. Así que, esta pequeña sección esta encaminada a brindar una diminuta retribución a los personajes y momentos que alimentaron esas ganas, anhelos y cuestionamientos plasmados en este documento o legado de mi existencia.

Edwin Fabián García, contribuyente fundamental en la curiosidad y fascinación por esta disciplina llamada Geotecnia. Brindo mi más fiel agradecimiento por ser el soporte, fuente de conocimiento y precursor de una visión practica y eficiente en búsqueda de la compresión y contribución sustentable, gracias por compartir y de paso aportar en la construcción de mi camino. A su vez, al grupo de Investigación-GII y al profesor Carlos Alberto Vega por el apoyo y conocimiento brindado durante este proceso. Adicionalmente, emito los respectivos agradecimientos a los investigadores e instituciones que han aportado en el modelo numérico empleado.

Alba Nury Gallego, la voz tenue y apacible en mis descontrolados interrogantes y deseos de aprender. Convirtiéndose en el mayor referente de la postura equilibrada y convincente. Doy mi gratitud por confiar y dejarse contagiar del simple hecho de estar inconforme y curioso por más del extraordinario y dinámico mundo de las Geociencias. Doy gracias a ella y demás personas que han contribuido en el devenir del semillero de Geología y suelos, convirtiéndose en un refugio gobernado por la duda, el entusiasmo y sobretodo un espacio de aprendizaje integro e interdisciplinar.

A la Universidad de Antioquia, por ser en primera instancia la burbuja en medio de una sociedad carente de percepciones. Agradezco a la sociedad representada como figura de Universidad publica al otorgar las condiciones y recursos durante mis años en la academia.

Al igual de brindarme la oportunidad de contribuir desde la docencia a la sociedad y la academia. Me siento privilegiado por vivenciar y compartir mis aprendizajes, cuestionamientos y pasiones en dicho claustro.

Tal como lo intenta desarrollar el planteamiento argumentativo de esta investigación, quisiera enaltecer a los personajes que me permiten comprender que la vida esta acoplada por múltiples componentes. Empezando por Doña Ester y Jhon Fredy Toro, por su amor fraterno e incondicional. Por los compañeros de Universidad; Mateo, Karen, Maikol, Santiago, Sergio, Benjamín, por recordar constantemente el significado de apoyo, discusión y hermandad.

Finalmente, y sin ganas de escatimar en ningún detalle y dimensión; agradezco a esas místicas noches de concentración y plenitud. A la vida por permitirme conocer esa porción de amor genuino enfrascado en la Sra. Cálad, gracias por vivir en la incertidumbre, sorpresa, en el anhelo y en lo intangible. En conclusión, gracias a cada componente por hacerme estremecer en mi quietud y dinamismo real.

ÍNDICE

RESUMEN	7
ABSTRACT	10
I. INTRODUCCIÓN	13
1.1. Planteamiento de la investigación	13
1.2. Objetivos de la investigación	21
1.2.1. General	21
1.2.2. Específicos	21
II. MARCO TEÓRICO	23
2.1. Marco conceptual	23
2.2. Antecedentes: Estructuras de suelo reforzado con geosintético (GRS)	26
III. METODOLOGÍA	32
3.1. Modelo constitutivo	33
3.2. Estructura metodológica	41
3.3. Validación	42
3.3.1. Modelo experimental	43
3.4. Análisis de influencia	48
3.4.1. Material base	48
3.4.2. Análisis paramétrico	49
3.4.3. Análisis estadístico	49
3.5. Desempeño de la ruptura capilar	54
IV. RESULTADOS	56
4.1. Validación	56
4.2. Análisis de influencia	67
4.2.1. Material base	67
4.2.2. Análisis paramétrico	73
4.2.3. Análisis estadístico	102
4.3. Desempeño de la ruptura capilar	111

CAPÍTULO . ÍNDICE

V. CONCLUSIONES	116
5.1. Conclusiones	116
5.2. Futuros análisis	120
REFERENCIAS	140
Anexos	141
A. Prueba F	142

Índice de tablas

1.1. Implementación del modelo Toulmin según las categorías. Adaptado de [1].	20
2.1. Características de modelos constitutivos considerando la interacción entre el suelo y el ambiente. Reproducido de [2].	25
2.2. Clasificación de modelos clase III según la primer variable constitutiva. Reproducido de [2].	26
3.1. Descripción Modelo 3. Modificado de [3]	46
3.2. Clasificación de pruebas no paramétricas según variable dependiente. Modificado de [4].	52
4.1. Parametros hidro-mecánicos del suelo (DL clay)	69
4.2. Parámetros básicos del Geosintético (NT)	70
4.3. Diseño factorial con sus respectivos niveles	74
4.4. Tiempo y succión de ruptura en los distintos niveles de e_0	78
4.5. Estadísticos de tendencia central para la presión de poros (Pw) y grado de saturación (Sr) para cada factor y sus respectivos niveles.	106
4.6. Prueba de homocedasticidad mediante la prueba de Barlett	108
4.7. Análisis de varianza para presión de poros (Pw) mediante la prueba H	109
4.8. Análisis de varianza para el grado de saturación (Sr) mediante la prueba H	110
4.9. Succión de ruptura estimada y observada según función de conductividad y modelo numérico, respectivamente.	114
1.1. Análisis de varianza para presión de poros (Pw) mediante la prueba F	150
1.2. Análisis de varianza para el grado de saturación (Sr) mediante la prueba F	151

Índice de figuras

1.1. Esquema del modelo argumentativo de Toulmin. Modificado de [5].	16
2.1. Costo de varios sistemas de contención. Modificado de [6].	27
3.1. Esquema modelo COMVI.	33
3.2. Diagrama metodológico	42
3.3. Modelo experimental y elementos empleados. Reproducido de [3].	44
3.4. Modelo esquemático y localización de los sensores. Reproducido de [3].	45
3.5. Distribución temporal del contenido volumétrico registrado en el Modelo 3. Reproducido de [3].	47
3.6. Fallas locales presentadas en el Modelo 3 [3].	47
4.1. Condiciones de frontera implementada en elementos finitos según asignación del material.	57
4.2. Discretización malla y condiciones de drenaje.	58
4.3. Curva de retención de agua del suelo y el geotextil.	60
4.4. Funciones de conductividad de agua del suelo y el geotextil.	61
4.5. Distribución temporal del contenido volumétrico de agua registrado por M2 y M4.	62
4.6. Distribución temporal de la presión de poros con la registrada por P2 y P4.	63
4.7. Comparación de resultados experimentales y numéricos por debajo y por encima de las capas de refuerzo	65
4.8. Distribución del grado de saturación en talud reforzado con geotextil no tejido	71
4.9. Distribución de presión de poros para el geotextil (409) y elementos de suelo ubicados por encima (412) y por debajo (405) de la segunda capa de refuerzo: (a) Durante todo el tiempo de simulación; (b) Intervalo de tiempo correspon- diente a la ruptura de la barrera capilar.	73
4.10. Distribución temporal del grado de saturación (S_r) para el elemento 405 bajo los distintos niveles de e_0	76
4.11. Distribución temporal de la presión de poros (P_w) para el elemento 405 bajo los distintos niveles de e_0	77

CAPÍTULO . ÍNDICE DE FIGURAS

4.12. Distribución temporal del grado de saturación (Sr) para el elemento 405 bajo los distintos niveles de OCR	80
4.13. Distribución temporal de la presión de poros (Pw) para el elemento 405 bajo los distintos niveles de OCR	81
4.14. Distribución temporal del grado de saturación (Sr) para el elemento 405 bajo los distintos niveles de G_0	83
4.15. Distribución temporal de la presión de poros (Pw) para el elemento 405 bajo los distintos niveles de G_0	84
4.16. Distribución temporal del grado de saturación (Sr) para el elemento 405 bajo los distintos niveles de λ	86
4.17. Distribución temporal de la presión de poros (Pw) para el elemento 405 bajo los distintos niveles de λ	87
4.18. Distribución temporal del grado de saturación (Sr) para el elemento 405 bajo los distintos niveles de k_r	89
4.19. Distribución temporal de la presión de poros (Pw) para el elemento 405 bajo los distintos niveles de k_r	91
4.20. Distribución temporal del grado de saturación (Sr) para el elemento 405 bajo el elemento 405 bajo los distintos niveles de ψ_i	93
4.21. Distribución temporal de la presión de poros (Pw) para el elemento 405 bajo los distintos niveles de ψ_i	94
4.22. Distribución temporal del grado de saturación (Sr) para el elemento 405 bajo los distintos niveles de α	96
4.23. Distribución temporal de la presión de poros (Pw) para el elemento 405 bajo los distintos niveles de α	97
4.24. Distribución temporal del grado de saturación (Sr) para el elemento 405 bajo los distintos niveles de n	98
4.25. Distribución temporal de la presión de poros (Pw) para el elemento 405 bajo los distintos niveles de n	99
4.26. Matriz de correlación con histogramas de las variables respuesta.	103
4.27. Análisis de componentes principales con la contribución de cada variable.	104
4.28. Funciones de conductividad hidráulica del suelo y el geotextil con distintos valores de n	112
4.29. Funciones de conductividad hidráulica del suelo y el geotextil con distintos valores de α	113
1.1. Boxplot para los niveles de e_0	142
1.2. Boxplot para los niveles de OCR	143
1.3. Boxplot para los niveles de G_0	144
1.4. Boxplot para los niveles de λ	145
1.5. Boxplot para los niveles de k_r	146

CAPÍTULO . ÍNDICE DE FIGURAS

1.6. Boxplot para los niveles de ψ_i	147
1.7. Digramas de dispersión y sus respectivas medias para los niveles de ψ_i	148
1.8. Boxplot para los niveles de n	149
1.9. Boxplot para los niveles de α	150
1.10. Residuos del modelo ANOVA mediante la prueba F	151

RESUMEN

Los geosintéticos se han convertido en una alternativa sustentable en términos ambientales y económicos, al emplearse como material de construcción en problemas geotécnicos. Una de las principales aplicaciones ha sido en la construcción de estructuras de suelo reforzado. La estabilidad y funcionalidad de estas estructuras dependen, en parte, de las condiciones de flujo y drenaje que se generen en la interfaz de los materiales empleados, al considerar que la interacción de distintos materiales durante el proceso de infiltración bajo condiciones parcialmente saturadas puede generar la presencia de mecanismos de retención de agua, tal como el fenómeno de barrera capilar, el cual desarrolla una frontera hidráulica y por consiguiente un flujo preferente alrededor de la interfaz suelo-geotextil. Por lo tanto, el estudio del desempeño de las estructuras de suelo reforzados con geotextiles permeables requiere considerar la presencia y desarrollo de la barrera capilar bajo distintas condiciones y materiales empleados.

Mediante un análisis numérico se evaluó el desempeño de la barrera capilar bajo la interacción de distintos materiales caracterizados por sus propiedades hidro-mecánicas, con el propósito de determinar la influencia de estas propiedades en el desarrollo y eficiencia de la barrera capilar durante el proceso de infiltración. Se implementó un modelo numérico acoplado de infiltración-deformación basado en la teoría de medios porosos. Inicialmente, se valida la capacidad del modelo para representar el proceso de infiltración y el fenómeno de la barrera capilar mediante la comparación de resultados experimentales en terraplenes reforzados con geosintéticos. Posteriormente, se realiza un análisis de influencia que consta de un análisis paramétrico,

análisis estadístico y análisis de la ruptura de la barrera capilar a partir de las variaciones en las propiedades hidro-mecánicas y condiciones presentadas por los materiales a interactuar.

Con base en los resultados, se muestra que tanto las propiedades hidráulicas como mecánicas de los materiales tienen influencia en la presencia, desarrollo y desempeño de la barrera capilar. En términos generales, la respuesta al proceso de infiltración dado por el elemento ubicado por debajo de la interfaz suelo-geotextil presenta un comportamiento súbito en el flujo de filtración posterior a la ruptura de la barrera capilar, reflejado por el incremento en las variables respuesta, tales como, el grado de saturación y desarrollo de presiones de poros. Las principales variaciones en el desempeño se obtuvieron con los parámetros dados por la relación de vacíos e_0 , succión inicial ψ_i y el parámetro de ajuste relacionado con la pendiente de la curva de retención de agua n . De manera que la variabilidad de estos factores puede jugar un papel importante en el desempeño del fenómeno hidráulico. Igualmente, la influencia del proceso de compactación fue evaluado mediante las variaciones en los parámetros hidro-mecánicos, tales como; la relación de vacíos inicial e_0 , modulo de rigidez G_0 y relación de anisotropía de la permeabilidad k_r , al considerar que el proceso de compactación puede afectar la respuesta hidráulica en la interfaz suelo-geotextil.

Con el uso de modelos de inferencia estadística se logró determinar que los efectos inducidos por las propiedades hidro-mecánicas presentan diferencias estadísticamente significativas, consistente con lo observado en el análisis paramétrico. Resaltando la implementación del enfoque no paramétrico como alternativa viable en la determinación de diferencias estadísticas para variables de flujo en medios porosos. Los resultados de la prueba de Kruskal Wallis indican que las diferencias identificadas entre los grupos de los factores presenta mayor sensibilidad en términos de la presión de poros (Pw) en comparación con el grado de saturación (Sr). Finalmente, se desarrolló un análisis sobre el desempeño de la ruptura capilar considerando la interacción

con distintos materiales de refuerzo. Los resultados muestra una mayor permanencia de la barrera capilar con las variaciones en el parámetro n en comparación con los tiempos de ruptura obtenidos con el parámetro α , acorde con la tendencia en el comportamiento descrito previamente sobre la influencia de los parámetros de ajuste de la curva de retención de agua en el fenómeno.

A partir de los diferentes análisis empleados en la presente investigación se pudo determinar la influencia de las propiedades hidro-mecánicas en la eficiencia de la barrera capilar. Tomando relevancia en la selección de los materiales a emplear, al igual que establecer las condiciones propicias y susceptibilidad para el desarrollo del fenómeno. La evaluación de la barrera capilar mediante un modelo acoplado de infiltración-deformación pretende aportar en la implementación e incorporación del enfoque acoplado hidro-mecánico y la mecánica de suelos no-saturados en la Ingeniería practica.

ABSTRACT

Geosynthetics have become a sustainable alternative in environmental and economic issues, being used as a building material in geotechnical problems. One of the main applications has been in the construction of reinforced soil structures. The stability and functionality of these structures depend, in part, on the flow and drainage conditions generated at the interface of the materials used, considering that the interaction of different materials during the infiltration process under partially saturated conditions may lead to the presence of water retention mechanisms, such as the capillary barrier phenomenon, which generates a hydraulic boundary and a preferential flow around the soil-geotextile interface. Therefore, the study of the performance of soil structures reinforced with permeable geotextiles requires considering the presence and development of the capillary barrier under different conditions and materials used.

A numerical analysis evaluated the performance of the capillary barrier under the interaction of different materials characterized by their hydro-mechanical properties to determine the influence of these properties on the development and efficiency of the capillary barrier during the infiltration process. A coupled numerical infiltration-deformation model based on porous media theory was implemented. Initially, the ability of the model to represent the infiltration process and the capillary barrier phenomenon is validated by comparing experimental results in reinforced embankments with geosynthetics. Subsequently, an influence analysis is carried out which consists of parametric analysis, statistical analysis, and analysis of the capillary barrier

rupture from the variations in the hydro-mechanical properties and conditions presented by the materials to interact.

Based on the results, it is shown that both the hydraulic and mechanical properties of the materials influence the presence, development, and performance of the capillary barrier. In general terms, the response of the infiltration process given by the element located below the soil-geotextile interface presents a sudden behavior in the filtration flow after the capillary barrier rupture, reflected by the increase in response variables, such as the degree of saturation and development of pore pressures. The main variations in performance were obtained with the parameters given by the void ratio e_0 , initial suction ψ_i and the adjustment parameter related to the slope of the water retention curve n . Hence the variability of these factors can play an important role in the performance of the hydraulic phenomenon. Similarly, the influence of the compaction process was evaluated by variations in hydro-mechanical parameters, such as; the initial void ratio e_0 , elastic shear modulus G_0 and permeability anisotropy ratio k_r , considering that the compaction process can affect the hydraulic response at the soil-geotextile interface.

With the use of statistical inference models were achieved to determine that the effects induced by hydro-mechanical properties present statistically significant differences, consistent with what was observed in the parametric analysis. Highlighting the implementation of the non-parametric approach as a viable alternative in the determination of statistical differences for flow variables in porous media. The results of the Kruskal Wallis test indicate that the differences identified between factor groups are more sensitive in terms of pore pressure (Pw) compared to saturation (Sr). Finally, an analysis was performed about the performance of capillary rupture considering the interaction with different reinforcing materials. The results show a greater permanence of the capillary barrier with variations in the parameter n compared to the breakout times obtained with the parameter α , according to the tendency in the behavior described above

on the influence of these variables on the phenomenon.

From the different analyses used in this investigation, the influence of hydro-mechanical properties on the efficiency of the capillary barrier could be determined. Taking relevance in the selection of the materials to be used, as well as establishing the propitious conditions and susceptibility for the development of the phenomenon. The evaluation of the capillary barrier phenomenon using a coupled infiltration-model deformation aims to contribute to the implementation and incorporation of the hydro-mechanical coupled approach and the mechanics of unsaturated soils in practical engineering.

Capítulo I

INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento de la investigación

La implementación de los geosintéticos ha revolucionado varios aspectos de la práctica en la Ingeniería civil [6] y se ha considerado como el desarrollo más importante en el siglo XX en esta disciplina [7].

Los geosintéticos se han convertido en una alternativa sustentable en términos ambientales y económicos, al emplearse como material de construcción en problemas geotécnicos. En efecto, el uso de este material se ha incrementado de forma notoria, con aplicaciones en sistemas de refuerzo, barreras, protección, drenaje y control de erosión [8].

Una de las principales aplicaciones ha sido en la Ingeniería de transporte, para la construcción de estructuras de suelo reforzado con geosintéticos (*Geosynthetic Reinforced Soil-GRS*), como alternativa a las estructuras de concreto convencional [9].

Koerner et al. [10] determina que las fallas en las estructuras de suelo reforzado están asociadas principalmente a las propiedades del material de relleno y el sistema de drenaje. De

igual manera, Saidin [11], Holtz [6] resaltan la importancia de proporcionar un adecuado drenaje durante la etapa de diseño y construcción del muro reforzado. Por lo tanto, la estabilidad y funcionalidad de los GRS depende directamente de la eficiencia de los materiales empleados (relleno y refuerzo), en términos del drenaje que le brinden a la estructura.

Varios autores han destacado el desempeño de los geotextiles no tejidos (Geosintéticos permeables) como material de refuerzo y drenaje durante la vida útil de la estructura de suelo [12], [13], [14], [15]. El cual, podría reemplazar el sistema de drenaje convencional de material granular, debido a la facilidad de los geosintéticos en el transporte e instalación [16]. Sin embargo, la interacción de este material permeable y el suelo de relleno bajo condiciones parcialmente saturadas, podrían retardar la disipación de la presión de poros desarrollada durante el proceso de infiltración, generado por el efecto capilar impuesto en la interfaz suelo-geotextil [17].

Se han reportado efectos adversos por la presencia de la barrera capilar en estructuras de suelo, a causa de la deficiencia hidráulica observada entre las capas del suelo y el geotextil, lo cual puede generar superficies de falla debido a la acumulación de agua por encima del material de refuerzo [18], [19], [20]. Por otra parte, la frontera capilar y el flujo preferente alrededor de la interfaz suelo-geosintético se ha empleado como técnica de estabilización, con el fin de proteger y reducir la lluvia de infiltración dentro de la estructura de suelo, conservando la estabilidad de la misma durante eventos de lluvia [21].

Investigaciones experimentales y numéricas han evaluado la influencia de los materiales empleados en el desempeño de la barrera capilar como frontera hidráulica. Yang et al. [22] empleó columnas de suelo reforzadas para evaluar el flujo de infiltración. Los resultados muestran que se requiere una relación de 2 o 3 ordenes de magnitud entre los coeficientes de permeabilidad saturada en el suelo fino y granular para generar el efecto capilar. Rahardjo et al. [23] mediante

un estudio paramétrico define las propiedades que controlan la presencia de la barrera capilar, correspondientes a la relación entre los valores de entrada de agua de los materiales, el valor de entrada de agua de la capa granular y el coeficiente de permeabilidad saturada del material fino-granular.

Chinkulkijniwat et al. [24] establece que la respuesta hidráulica en la zona de refuerzo está gobernada principalmente por la curva de retención de agua y la relación entre la conductividad hidráulica saturada entre el suelo y el geocompuesto. Albino et al. [25] presenta una investigación numérica mediante SEEP/W, con el fin de detallar el comportamiento hidráulico en la interfaz suelo-geosintético exhibido en laboratorio por un muro reforzado. Los resultados permiten evidenciar la presencia y el efecto de la barrera capilar, además se destaca la influencia de la heterogeneidad en la porosidad sobre la respuesta de infiltración en suelos compactados.

Acorde a lo mencionado anteriormente, se evidencia la dependencia e influencia de las propiedades hidráulicas de los materiales en el desarrollo de la barrera capilar. No obstante, el enfoque y las metodologías empleadas han evaluado el proceso de infiltración y el desarrollo de presiones de poros de forma independiente con el análisis de estabilidad (equilibrio límite o análisis de deformaciones). Sin considerar el acoplamiento entre el proceso de infiltración y el cambio de volumen durante el evento de lluvia.

Fredlund [26] resalta la necesidad de incorporar los análisis acoplados de infiltración y deformación en los problemas concernientes a la Ingeniería de suelos parcialmente saturados. Debido a que los cambios en los esfuerzos y las deformaciones afectan el proceso de infiltración, al modificar las propiedades hidráulicas del suelo, tales como, la porosidad y la permeabilidad [27].

Por lo tanto, la presente investigación propone evaluar el desempeño de las estructuras de suelo reforzado con geosintéticos permeables mediante un enfoque acoplado de infiltración-

deformación, con el fin de aportar en el conocimiento sobre la influencia de las propiedades hidro-mecánicas en el desarrollo y eficiencia de la barrera capilar como frontera hidráulica durante el proceso de infiltración.

Con el propósito de soportar las premisas y conclusiones que se puedan derivar de la presente investigación se propone implementar el modelo argumentativo de Toulmin [28]. Esto con el propósito de describir la línea argumental y considerar las incertidumbres asociadas al fenómeno estudiado.

El modelo de Toulmin [28] propone una estructura argumentativa basada en la racionalidad y lógica aplicado a cualquier tipo de argumentación, disciplina, disertación o debate [1]. Según Toulmin el proceso de argumentar involucra un conjunto de pasos o categorías relacionadas que permiten inferir conclusiones a partir de observaciones o evidencias específicas [29]. En la Figura 1.1 se presenta el esquema del modelo argumentativo de Toulmin basado en los términos afines definidos para cada categorías y la estructura propuesta.

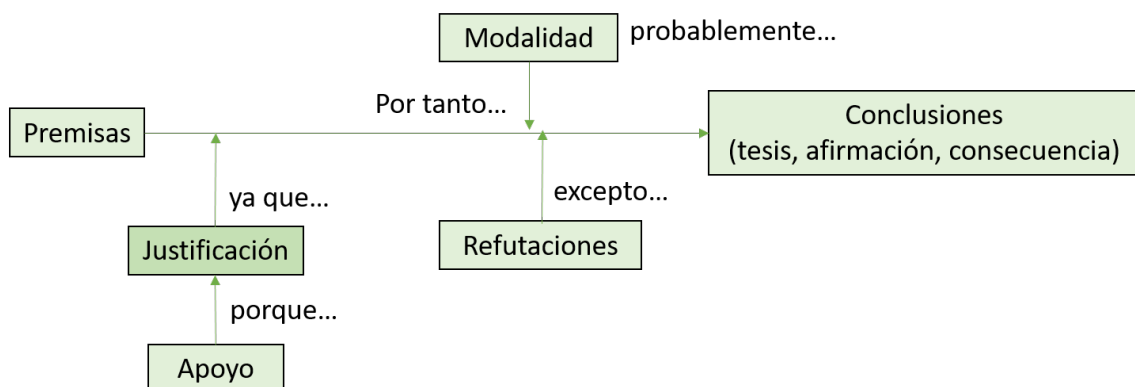


Figura 1.1: Esquema del modelo argumentativo de Toulmin. Modificado de [5].

El esquema plantea formular la conclusión (Aserción) a partir de las premisas (Evidencia). La garantía conecta la aserción con la evidencia, con el apoyo de base teórica, práctica o experimental: respaldo. La modalidad (cualificadores modales) representa el modo de interpretar

CAPÍTULO I. 1.1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

la aserción y su confiabilidad, al igual las refutaciones (reserva) se considera como las posibles objeciones, tal como lo menciona Bello [1]. Conforme a esto, en la Tabla 1.1 se presenta la argumentación de la presente investigación a partir de las categorías planteadas en el modelo de Toulmin, además se contempla la traducción de las categorías según la propuesta de Bello [30], las cuales fueron consignadas entre paréntesis en la anterior descripción del esquema.

Toulmin	Traducción [30]	Implementación
Claim	Aserción	El análisis del fenómeno de barrera capilar se debe abordar bajo un enfoque hidro-mecánico, que permita considerar la interdependencia entre el proceso de infiltración y desarrollo de deformaciones en la interfaz suelo-geotextil.
Data	Datos	Las propiedades hidro-mecánicas tienen influencia en el desarrollo y eficiencia de la barrera capilar.

Toulmin	Traducción [30]	Implementación
Warrants	Garantía	<p>En la investigación de Kim et al. [31] se identifican diferencias en el análisis de infiltración en columnas de suelo, en comparación cuando se realizan bajo un enfoque acoplado y sin acoplamiento entre los procesos de infiltración y deformación. Concluyendo que:</p> <ul style="list-style-type: none"> † Se observa una menor tasa de infiltración con el análisis acoplado. † La consideración de la porosidad en la función de conductividad altera la distribución de la succión matricial. † El análisis de flujo transitorio en suelos deformables es influenciado por el cambio de volumen en el suelo.

Toulmin	Traducción [30]	Implementación
Backing	Respaldo	<p>Los soportes descritos se basan en resultados experimentales y análisis numéricos sobre el comportamiento mecánico e hidráulico de suelos bajo condiciones parcialmente saturadas.</p> <p>† Durante los procesos de humedecimiento, se generan cambios en el volumen del suelo, y por consiguiente en los esfuerzos y las deformaciones, afectando las propiedades hidráulicas del suelo [27].</p> <p>† El grado de saturación y la succión dependen del estado de esfuerzos en el suelo [32], [33], [34].</p> <p>† Los cambios en el grado de saturación están relacionados con los esfuerzos o la densidad del suelo, inclusive cuando la succión permanece constante [35].</p>

CAPÍTULO I. 1.1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

Toulmin	Traducción [30]	Implementación
Modal qualifiers	Cualificadores modales	<p>Probablemente la implementación del enfoque acoplado permita considerar variables y condiciones expuestas en la interfaz suelo-geotextil. No obstante, es importante considerar las limitaciones y formulación del modelo constitutivo empleado. Además, de las condiciones y análisis establecido en el modelo estadístico, el cual será descrito posteriormente. En efecto, el grado de certeza sobre la argumentación del trabajo se basa en la adecuada implementación del modelo constitutivo y estadístico en el estudio del fenómeno.</p>
Rebuttals	Reserva	<p>† A menos que los escenarios de lluvia y flujo no generen modificaciones en el estado de esfuerzos y en la relación de vacíos, la influencia de las propiedades no sea perceptible.</p> <p>† A menos que los niveles y tratamientos en el modelo estadístico empleado para cuantificar la influencia de las propiedades no genere variaciones significativas.</p>

Tabla 1.1: Implementación del modelo Toulmin según las categorías. Adaptado de [1].

El anterior argumento es el que se pretende evaluar en la presente investigación, con el uso de un modelo acoplado de infiltración-deformación. Cuyo propósito es abordar el desempeño de la frontera hidráulica bajo la interacción de distintos materiales caracterizados por sus propiedades hidro-mecánicas, al determinar la influencia de estas propiedades en el desarrollo y eficiencia de la barrera capilar.

Y de esta manera, poder aportar en la implementación del enfoque acoplado en problemas relacionados con el proceso de infiltración, considerando que dicho enfoque aún no ha sido empleado ampliamente en la Ingeniería práctica [36].

Con base en la línea argumentativa descrita anteriormente, a continuación se establecen los objetivos de la investigación.

1.2. Objetivos de la investigación

1.2.1. General

Evaluar la influencia de las propiedades hidro-mecánicas de los materiales que componen las estructuras de suelo reforzado con geosintéticos permeables en el desarrollo de la barrera capilar durante el proceso de infiltración de lluvia bajo condiciones parcialmente saturadas.

1.2.2. Específicos

- † Determinar numéricamente la existencia del fenómeno de barrera capilar en la interfaz suelo-geosintético mediante un modelo acoplado de infiltración-deformación.
- † Analizar la contribución de las propiedades hidro-mecánicas de las estructuras de suelo

CAPÍTULO I. 1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

reforzado en el desarrollo de la barrera capilar en la interfaz suelo-geosintético.

- † Establecer y comparar los niveles de succión correspondientes a la ruptura de la barrera capilar a partir de las variaciones en las propiedades hidráulicas para los materiales que conforman las estructuras de suelo reforzado.

Capítulo II

MARCO TEÓRICO

2.1. Marco conceptual

La infiltración de lluvia representa el principal factor detonante en las fallas de taludes, laderas, terraplenes y suelos compactados [37]. Day y Axten [38] manifiestan que la principal causa de falla superficial en llenos y terraplenes es a causa de intensas lluvias. En Colombia, Aristizábal y Gómez [39] resaltan la relación entre la distribución mensual de lluvias y la ocurrencia de deslizamientos.

Tradicionalmente, el efecto de la infiltración en problemas de estabilidad se ha analizado mediante modelos de talud infinito, en los cuales se plantea el proceso de infiltración paralelo a la superficie de la ladera [40]. Adicionalmente, se establece como premisa un estado de flujo saturado, con el fin de asumir la condición más crítica, dado que la superficie freática coincide con la superficie del talud. En consecuencia, dichas metodologías optan por plantear condiciones conservadoras y a menudo poco representativas del nivel de saturación del suelo, sin considerar la variación en el contenido de humedad debido a la interacción con el entorno y las

condiciones hidroclimatológicas, tales como, la evapotranspiración y la precipitación [41]. Por consiguiente, el estado de saturación parcial es predominante en las estructuras de suelo [42]. En efecto, existe la necesidad de incorporar dicha condición en el análisis del comportamiento de los suelos sujetos a infiltración de lluvia.

Como respuesta a tales desafíos, Fredlund et al. [43] aportan en la implementación y validez de la teoría de mecánica de suelos parcialmente saturados, resaltando que los procesos de excavación, remoldeo y compactación en el suelo son característicos de materiales no saturados, los cuales no son considerados dentro del marco de la mecánica de suelos clásica (régimen saturado). La diferencia entre estas teorías radica en la configuración del suelo según el estado de saturación, en donde los poros del suelo bajo condiciones parcialmente saturadas no solamente están ocupados por agua sino también por aire, generando una distribución del agua intersticial que difiere con la condición de saturación total [44].

Los cambios en el volumen del suelo asociados a los posibles daños en las fundaciones y estructuras. La resistencia al cortante en el análisis de falla de taludes por lluvia. Y finalmente, el comportamiento hidráulico para los diseños de sistemas de cobertura y contención para la disposición de residuos; han sido los principales enfoques abordados bajo los principios de la mecánica de suelos parcialmente saturados [45].

En los últimos años se han desarrollado múltiples modelos constitutivos que permiten evaluar los enfoques mencionados. La investigación pionera fue el modelo llamado *Barcelona basic model* (BBM) propuesto por Alonso [46]. Posteriormente, han surgido modelos que pretenden representar el comportamiento observado por el suelo, a partir de las condiciones establecidas en la formulación del estado de esfuerzos y/o variables constitutivas (e.g [47], [48], [49], [50]).

Resultados experimentales constatan que el comportamiento característico de los suelos parcialmente saturados es acoplado entre la historia de carga y la curva de retención de agua

CAPÍTULO II. 2.1. MARCO CONCEPTUAL

(*soil water characteristic curve-SWCC*) [51], [52]. Del mismo modo, Sheng [53] explica que la variación en el grado de saturación puede generar cambios significativos en el volumen, resistencia al cortante y en las propiedades hidráulicas. En efecto, se han desarrollado modelos bajo el enfoque acoplado hidro-mecánico que consideran la inter-dependencia entre el proceso de infiltración y el desarrollo de deformaciones. Además, la inclusión de variables y condiciones ambientales que intervienen en el comportamiento del suelo. En la Tabla 2.1, se muestra una compilación hecha por Gens [2], sobre las características generales y las variables consideradas en los modelos acoplados.

Tabla 2.1: Características de modelos constitutivos considerando la interacción entre el suelo y el ambiente. Reproducido de [2].

	Suelo saturado	Suelo no-saturado
Variable	Presión líquida	Succión
Balance de agua	Si	Si
Balance de aire		Si
Ecuaciones de equilibrio	Si	Si
Análisis acoplado	HM ^a	HM
Ecuaciones constitutivas	<i>Barcelona Basic Model</i> (Alonso et al., 1990) <i>Microstructure-based model</i> (Gallipoli et al., 2003) <i>Coupled hydro-mechanical model</i> (Sheng et al., 2004)	
Casos históricos	Colapso de fundación en Pereira Barreto (Brazil) Subsidencia en Ravvena (Italia)	

^aHM, Hidro-mecánico

Con respecto, a la implementación del comportamiento articulado entre la componente mecánica e hidráulica para suelos no-saturados, uno de los primeros en presentar un modelo acoplado fue Vaunat et al. [54]. Tal como lo menciona D. Sheng [55], uno de los modelos que considera el acoplamiento completo entre las componentes es el propuesto Wheeler et al. [35]. Posteriormente, otros modelos surgieron (e.g [32], [56], [57], [58], [59], [60]), los cuales se han enfocado en evaluar la influencia de la componente hidráulica en el comportamiento mecánico,

CAPÍTULO II. 2.2. ANTECEDENTES: ESTRUCTURAS DE SUELO REFORZADO CON GEOSINTÉTICO (GRS)

y no en el sentido contrario [61].

El modelo que se va a utilizar en la presente investigación corresponde al desarrollado por Oka [57]. En la Tabla 2.2 se presenta algunas características mencionadas por Gens [2] sobre este modelo y otros similares, agrupados en modelos de clase III según la clasificación propuesta por Gens [47], en los cuales la variable constitutiva empleada dependen del grado de saturación, y por lo tanto, la componente hidráulica este acoplada con el comportamiento mecánico.

Tabla 2.2: Clasificación de modelos clase III según la primer variable constitutiva. Reproducido de [2].

FCV ^a	Características del modelo	Ejemplos
$(\sigma_t)_{ij} - p_g \delta_{ij} + \mu_1(s, S_1) \delta_{ij}$	Representación de rutas de esfuerzos no es simple. La variable constitutiva incorpora el parámetro de estado (S_1). Las dos variables constitutivas están vinculadas. Se asegura la continuidad en la transición saturada/no-saturada. Comportamiento hidro-mecánico acoplado. El aumento de la resistencia con succión es la variable constitutiva. La resistencia y el comportamiento elástico se pueden unificar la FCV.	Jommi and di Prisco (1994); . Bolzon et al. (1996); Jommi (2000); Wheeler et al. (2003); Gallipoli et al. (2003); Sheng et al. (2004); Tamagnini (2004); Laloui and Nuth (2005); Oka et al. (2006)

^aFirst variable constitutive-FCV

2.2. Antecedentes: Estructuras de suelo reforzado con geosintético (GRS)

El uso y la construcción de estructuras de suelo reforzado se ha incrementado durante la ejecución de proyectos viales (carreteras, viaductos y terraplenes), debido a la relación costo-beneficio y capacidad de tolerar grandes asentamientos en comparación con muros de concreto reforzado [9]. Según el reporte presentado por Berg et al. [62], en Estados Unidos se construyen anualmente 190,000 m^2 de estructuras de suelo reforzado.

Una de las primeras estructuras de suelo reforzado fue el sistema llamado Terre Armée inventado por Henri Vidal [63], compuesta por material granular seleccionado, barras de acero

CAPÍTULO II. 2.2. ANTECEDENTES: ESTRUCTURAS DE SUELO REFORZADO CON GEOSINTÉTICO (GRS)

galvanizado empleadas como refuerzo, y paneles de concreto prefabricado. Holtz [6] menciona que a pesar de la implementación de esta tecnología en Francia y varios países, la potencial corrosión que se podía presentar en las barras de acero, generó la incursión de fibras poliméricas como refuerzo, dentro de los cuales se resalta el uso del geosintético.

A mediados de 1970, se inició la construcción de muros de suelo reforzado con geosintéticos. Bell y Steward [64] y el servicio forestal de los Estados Unidos fueron los primeros en reconocer los beneficios de los geotextiles no tejidos, en terminos del drenaje y estabilización que le brindan a las estructuras de pavimento. Otra de las ventajas del geosintético como refuerzo es el costo frente a otras tecnologías (ver Figura 2.1).

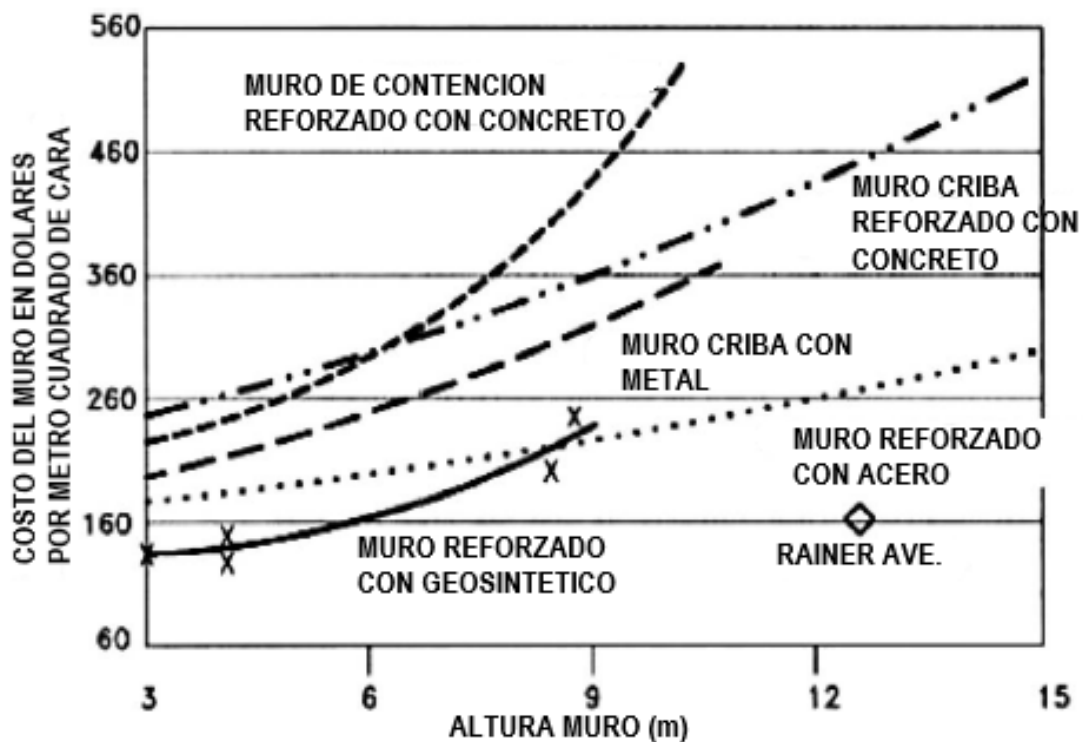


Figura 2.1: Costo de varios sistemas de contención. Modificado de [6].

Adicionalmente, este material otorga flexibilidad a la estructura, al tolerar grandes asen-

CAPÍTULO II. 2.2. ANTECEDENTES: ESTRUCTURAS DE SUELO REFORZADO CON GEOSINTÉTICO (GRS)

tamientos. Al mismo tiempo, la fácil implementación y construcción de estructuras de suelos reforzados con geosintético, lo ha catalogado como una solución alternativa y sostenible en problemas geotécnicos y geoambientales [8]. No obstante, la interacción de materiales con distintos tamaños de poros y por consiguiente, diferentes conductividades hidráulicas y niveles de succión, pueden generar la presencia de mecanismos de retención de agua, tales como la barrera capilar [65]. Tal situación, se presenta en la interfaz suelo-geosintético en las estructuras de suelo reforzadas bajo condiciones parcialmente saturadas.

Según Zornberg et.al [66] este mecanismo se desarrolla cuando una capa de suelo fino-granular está sobre un material poroso, tal como una capa de suelo de grano grueso (arena o grava) o un geosintético poroso. Relacionado con la tensión capilar que limita el movimiento gravitacional del agua a capas más profundas.

Varios estudios han reportado el desarrollo y efecto de la barrera capilar debido a la inclusión de los geosintéticos no tejidos como material de refuerzo. Clough y French [67] presentaron el comportamiento del geosintético no tejido como drenaje dentro de una estructura de pavimento. Este estudio reportó el aumento en el contenido de agua en las capas de suelo por encima del geotextil. Zornberg et al. [66] reporta los resultados experimentales dados por Richardson [68], concluyendo que los geosintéticos no tejidos empleados como capas drenantes en taludes no permitían el flujo de agua de forma fácil y rápida en los suelos por encima de la capa del geosintético, resaltando que la falla de un talud estudiado se generó a partir de la condición impuesta por el geosintético.

Bathurst et al. [19] midió la respuesta de la presión de agua utilizando ensayos de infiltración en columnas de arena con y sin geosintético, detectando que el geotextil actuó como una barrera capilar. Adicionalmente, el estudio plantea aumentar la relación entre la permeabilidad saturada del geotextil y el suelo a razón de 10, utilizada para la selección del geotextil en el diseño de

CAPÍTULO II. 2.2. ANTECEDENTES: ESTRUCTURAS DE SUELO REFORZADO CON GEOSINTÉTICO (GRS)

filtros de drenaje, la cual ha sido empleada convencionalmente en relación de 1. No obstante, en el estudio se resalta la necesidad de validar esta relación para suelos más finos al empleado.

García et al. [69] reportó experimentalmente la respuesta hidráulica de los geosintéticos permeables en un modelo a escala de columnas sujetas a infiltración de lluvia, evaluando la distribución temporal de la presión de poros y el contenido volumétrico de agua durante la infiltración. El resultado muestra que el suelo por encima de la capa de geosintético aumenta su contenido de agua considerablemente con respecto al suelo por debajo del mismo, evidenciando que el drenaje a través del geosintético se presentó cuando la succión en la interfaz es cercana a cero y la permeabilidad del material se incrementa. Finalmente, los autores mencionan la importancia de incluir el efecto de la barrera capilar en la estabilidad de estructuras de suelos mecánicamente estabilizados.

Thuo et al. [70] empleó modelos numéricos con el uso del software SEEP/W, observando que el geotextil no tejido actúa como una barrera de humedad en lugar de actuar como un material drenante, desarrollando presiones de poros positivas en el suelo inmediatamente por encima del geotextil. Adicionalmente, el autor propone la inclusión de la técnica llamada "cojines de arena" (*sand cushion*), la cual se basa en la adición de finas capas de arena en la interface suelo-geotextil. Con la inclusión de este material, se observó que el efecto de la barrera capilar se redujo considerablemente, resaltando la utilidad de esta técnica en las estructuras de drenaje. No obstante, se menciona la necesidad de investigar las dimensiones (grosor, área de cobertura) y el tipo de material a emplear en los cojines de arena para su correcta funcionalidad.

Jana y Dey [9] modelaron mediante elementos finitos un flujo transitorio similar al presentado por Thuo et al. [70], con el fin de analizar la respuesta suelo reforzado con geosintético no tejido con suelo fino, observando que la conductividad hidráulica del geotextil se ve reducida dentro de altos niveles de succión e impide el flujo de infiltración, reduciendo la resistencia del

CAPÍTULO II. 2.2. ANTECEDENTES: ESTRUCTURAS DE SUELO REFORZADO CON GEOSINTÉTICO (GRS)

suelo ubicado por encima del geotextil, resaltando que: “el uso de los geotextiles no tejidos requiere una investigación crítica adicional”.

Por otro lado, el mecanismo y desarrollo del sistema de barrera capilar (*Capillary barrier system-CBS*) se ha utilizado como técnica de protección de taludes y soluciones geoambientales. Tami [71] realizó la experimentación en laboratorio con un talud a escala sujeto a lluvia de infiltración. A partir de los resultados, se logro determinar el potencial uso del CBS como medida de estabilización al limitar el flujo de infiltración dentro de la estructura de suelo.

Posteriormente, Harnas [72] desarrolló un nuevo sistema llamado *Dual capillary system* (DCB), consiste en duplicar la configuración del CBS; compuesto por una capa de material fino-granular sobre una grueso-granular. Los materiales empleados como capa fina y capa granular fueron asfalto reciclado fino (FRA) y asfalto reciclado grueso (CRA), respectivamente. Rahardjo [73] destaca de los resultados, la similitud en el decrecimiento lineal de la presión de poros a través del material fino para ambos sistemas. Igualmente, las condiciones de ruptura se generan para ambos sistemas cuando la presión de poros presente en la parte inferior de la capa fina alcanza el valor de entrada de agua para el material grueso granular. Mediante ensayos de infiltración y análisis numéricos sobre el desempeño de ambos sistemas (DCB y CBS), Rahardjo [74] concluye que el sistema DCB presenta un incremento en la capacidad de almacenamiento del 12 % en comparación con el CBS.

Otro sistema basado en los principios del efecto capilar, es llamado *Geobarrier system* (GBS). Compuesto por el sistema CBS y *geobag*. Tal como se menciona en Rahardjo [73], el desempeño del GBS se ha evaluado mediante un estudio piloto implementado en un talud de suelo residual en Singapur. Investigaciones recientes lideradas por *Nanyang Technological University* (NTU) mencionan la capacidad del GBS de minimizar la infiltración a través del suelo marginal, y por consiguiente, la estabilidad de la estructura durante y después de eventos

CAPÍTULO II. 2.2. ANTECEDENTES: ESTRUCTURAS DE SUELO REFORZADO CON GEOSINTÉTICO (GRS)

de lluvia. De igual manera, Jana y Dey [75] establecen la eficiencia del geotextil como barrera y drenaje en estructuras de retención empleando suelos marginales y materiales reciclados en condiciones parcialmente saturadas.

A partir de las aplicaciones mencionadas anteriormente, el estudio de la barrera capilar se ha convertido en una problemática actual y de interés en el diseño y construcción de estructuras de suelo reforzado con geosintético, las cuales se han posicionado en la infraestructura vial como una alternativa sostenible en términos ambientales y económicos, al considerar su desempeño mecánico y rentabilidad en comparación con las convencionales estructuras de concreto reforzado.

Capítulo III

METODOLOGÍA

Se plantea evaluar el comportamiento hidráulico de las estructuras de suelo reforzado durante el proceso de infiltración a partir de un análisis numérico mediante el modelo COMVI (Consolidation Multiphase Viscoplastic Analysis – Universidad de Kioto, Japón). El código fuente empleado en el modelo COMVI, fue desarrollado por investigadores de las Universidades de Kioto, Gifu y Tohoku (F. Oka Y. Higo. 2002, Kioto. VERSION 2002.11.14).

Este modelo acoplado de infiltración-deformación fue propuesto por Oka et al. [76] basado en la teoría de medios porosos (e.g [77]). En el cual se puede evaluar el comportamiento hidro-mecánico de los materiales en el proceso de infiltración mediante elementos finitos, considerando los materiales con propiedades elasto-viscoplásticas. Las subrutinas descritas en el modelo han sido implementadas en varias investigaciones sobre el proceso de infiltración en estructuras de suelo [78], [79].

En la Figura 3.1, se muestra el diagrama del proceso general realizado en el modelo COMVI, en el cual se tiene como insumos; diseño de la malla, caracterización mecánica e hidráulica de los materiales, al igual que las condiciones iniciales y de frontera para cada escenario de

infiltración a modelar.

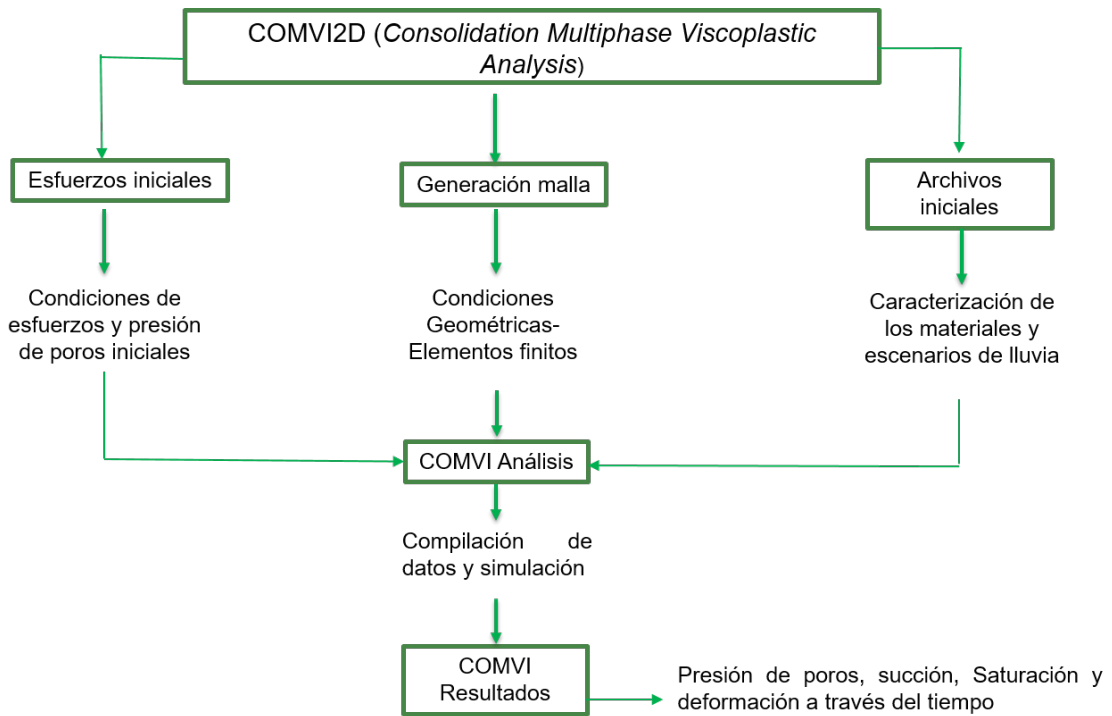


Figura 3.1: Esquema modelo COMVI.

A continuación se presentan las ecuaciones de la teoría de medios porosos y el modelo acoplado de infiltración-deformación utilizado para el análisis.

3.1. Modelo constitutivo

El tensor de esfuerzos se plantea mediante la formulación propuesta por [80], [81]. En los cuales se define *skeleton stress* como la variable de esfuerzo en la relación constitutiva para la estructura del suelo, denominada el esfuerzo efectivo generalizado σ'_{ij} , el tensor de esfuerzos totales σ_{ij} se obtiene como la suma de los esfuerzos parciales.

$$\sum_{\alpha} \sigma_{ij}^{\alpha} = \sigma_{ij}(\alpha = S, W, G) \text{ S=Solido, W=Líquido, G=Gas} \quad (3.1)$$

$$\sigma_{ij}^S = \sigma'_{ij} + n^S P^F \delta_{ij} \quad (3.2)$$

$$\sigma_{ij}^W = n^W P^W \delta_{ij} \quad (3.3)$$

$$\sigma_{ij}^G = n^G P^G \delta_{ij} \quad (3.4)$$

Donde P^W y P^G son la presión de poros del agua y del aire, respectivamente, n representa la porosidad, n^{α} es la fracción volumétrica de la fase α y P^F es el promedio de las presiones según el grado de saturación (s).

$$P^F = sP^W + (1 - s) P^G \quad (3.5)$$

Mediante las anteriores ecuaciones se obtiene la formulación del esfuerzo efectivo generalizado, el cual es usado como el esfuerzo básico en el modelo de suelos parcialmente saturados:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - P^F \delta_{ij} \quad (3.6)$$

Conservación de masa

La conservación de la masa viene dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial}{\partial t}(n^{\alpha} \rho_{\alpha}) + (n^{\alpha} \rho_{\alpha} v_i^{\alpha}), \quad i = 0 \alpha = S, W, G \quad (3.7)$$

CAPÍTULO III. 3.1. MODELO CONSTITUTIVO

En la que ρ_α es la densidad del material y v_i^α es la velocidad de la fase α . Suponiendo que las derivadas espaciales de la fracción de volumen n^α las densidades de material ρ_α son despreciables y suponiendo que las partículas del suelo y el agua son incompresibles, a saber, $\bar{\rho}_S = 0$ y $\bar{\rho}_W = 0$, las leyes de conservación pueden expresarse como funciones de saturación de agua s y porosidad n , es decir:

$$-\dot{n} + (1 - n)v_{i,i}^s = 0 \quad (3.8)$$

$$sD_{ii} + \dot{s}n = -V_{i,i}^W \quad (3.9)$$

$$(1 - s)D_{ii} - \dot{s}n + (1 - s)n\frac{\rho_G}{\rho_G} = -V_{i,i}^G \quad (3.10)$$

Donde v_i^s es la velocidad de la fase sólida, D_{ii} es el estiramiento volumétrico, y V_i la velocidad aparente. Se supone que la densidad del agua es constante. Para describir los cambios en la densidad del aire, se usa la ecuación para el gas ideal.

Conservación del momento

El balance de momento para cada fase es dado por:

$$n^\alpha \rho_\alpha \dot{v}_i^\alpha = \sigma_{ji,j}^\alpha + \rho_\alpha n^\alpha \bar{F}_i - \sum_y D^{\alpha\gamma} (v_i^\alpha - v_i^\gamma) \alpha = S, W, G \quad (3.11)$$

En la que \bar{F}_i es la aceleración por gravedad o la fuerza de gravedad por unidad de masa y $D^{\alpha\gamma}$ ($D^{\alpha\gamma} = D^{\gamma\alpha}$) son los parámetros que describen la interacción entre las fases α y γ , que se define como

$$D^{WS} = \frac{(n^W)^2 \rho_w g}{k^W}, \quad D^{GS} = \frac{(n^G)^2 \rho_G g}{k^G} \quad (3.12)$$

En la que k^W y k^G son los coeficientes de permeabilidad para la fase acuosa y la fase aire, respectivamente, que se dan en L/T (unidades). Dejando de lado la aceleración y la interacción entre el aire y el agua, la ecuación del equilibrio del momento se reduce a la ecuación de equilibrio para cada fase, obtenida como

$$\sigma'_{ji,j} + (n^S P^F)_{i,j} + \rho_S n^S \bar{F}_i - D^{SW} (v_i^S v_i^W) - D^{SG} (v_i^S v_i^G) = 0 \quad (3.13)$$

$$(n^W P^W)_{i,j} + \rho_W n^W \bar{F}_i - D^{WS} (v_i^W v_i^S) = 0 \quad (3.14)$$

$$(n^G P^G)_{i,j} + \rho_G n^G \bar{F}_i - D^{GS} (v_i^G v_i^S) = 0 \quad (3.15)$$

Cuando asumimos que la derivada espacial de la fracción volumétrica n_i^α es despreciable, las leyes de Darcy para las fases agua y aire se obtiene a partir de las siguientes ecuaciones:

$$V_i^W = n^W (v_i^W - v_i^S) = \frac{k^W}{Wg} (P_{,i}^W + \rho_W \bar{F}_i) \quad (3.16)$$

$$V_i^G = n^G (v_i^G - v_i^S) = \frac{k^G}{\rho_G g} (P_{,i}^G + \rho_G \bar{F}_i) \quad (3.17)$$

La suma de las ecuaciones conduce a:

$$\sigma_{ji,j} + \rho \bar{F}_i = 0 \quad (3.18)$$

Ecuaciones constitutivas

El modelo elasto-viscoplástico considerando la degradación de la estructura de suelo propuesta por Kimoto et al. [82] fue extendida para suelos parcialmente saturados usando el concepto de *skeleton stress* y el efecto de la succión en el comportamiento de colapso. La descripción del comportamiento de colapso es dado por la superficie límite de sobreconsolidación, la superficie de fluencia del material y la superficie viscoplástica.

La delimitación de la superficie de sobreconsolidación que define la región normalmente consolidada, $f_b \geq 0$, y región sobreconsolidada, $f_b < 0$, esta dada por:

$$f_b = \bar{\eta}_{(o)}^* + M_m^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mb}} = 0 \quad (3.19)$$

$$\bar{\eta}_{(o)}^* = \{(\eta_{ij}^* - \eta_{ij(o)}^*)(\eta_{ij}^* - \eta_{ij(o)}^*)\}^{1/2} \quad (3.20)$$

donde $\eta_{ij}^* = S_{ij}/\sigma'_m$, S_{ij} es el tensor de esfuerzo desviador, σ'_m es el esfuerzo efectivo medio, M_m^* es el valor de $\eta^* = \sqrt{\eta_{ij}^* \eta_{ij}^*}$ cuando los cambios en el incremento de deformaciones plásticas sean de una dilatancia negativa a positiva, lo cual es igual a la relación M_f^* en estado crítico. El parámetro de endurecimiento del material σ'_{mb} controla el tamaño de la superficie de frontera. Adicionalmente, el efecto de la succión se incorpora a partir de la siguiente expresión:

$$\sigma'_{mb} = \sigma'_{ma} \exp\left(\frac{1 + e_0}{\lambda - \kappa} \varepsilon_{kk}^{vp}\right) \left[1 + S_i \exp\left\{-S_d \left(\frac{P_i^c}{P_c} - 1\right)\right\}\right] \quad (3.21)$$

donde ε_{kk}^{vp} es la deformación viscoplástica volumétrica, λ y κ son los índices de compresión y expansión, respectivamente. P_i^c es el valor de succión inicial y P_c corresponde a la succión

CAPÍTULO III. 3.1. MODELO CONSTITUTIVO

actual, S_i es el parámetro que considera el cambio de resistencia desde la succión inicia hasta los condiciones de saturación. Mientras que, S_d controla la modificación de la resistencia a partir de los cambios en la succión. σ'_{ma} es el parametro de ablandamiento que considera la degradación del material dado por los cambios estructurales.

La función de fluencia (*static yield function*) esta definida como:

$$f_y = \bar{\eta}_{(o)}^* + M^* \ln(\sigma'_m / \sigma'^{(S)}_{my}) = 0 \quad (3.22)$$

El parámetro $\sigma'^{(S)}_{my}$ controla el tamaño de la superficie de fluencia y varia con los cambios en la succión como también con los cambios deformaciones volumétricas viscoplásticas y la degradación estructural.

$$\sigma'^{(S)}_{my} = \frac{\sigma'^{(S)}_{myi}}{\sigma'_{mai}} \sigma'_{ma} \exp\left(\frac{1 + e_0}{\lambda - \kappa} \varepsilon^{vp}_{kk}\right) \left[1 + S_i \exp\left\{-S_d \left(\frac{P_i}{P_c} - 1\right)\right\}\right] \quad (3.23)$$

El tensor de deformación volumétrica esta dada por las siguientes expresiones:

$$D^{vp}_{ij} = C_{ijkl} \langle \phi_1(f_y) \rangle \frac{\partial f_p}{\partial \sigma'_{kl}} \quad (3.24)$$

$$C_{ijkl} = A \delta_{ij} \delta_{kl} + B (\delta_{ij} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (3.25)$$

$$C_1 = B, C_2 = 3A + 2B \quad (3.26)$$

en donde f_p es la superficie de potencial viscoplástico, ϕ_1 denota una función del efecto de la velocidad de carga, A y B son parámetros del material y tienen realción con la componente desviadora C_1 y la componente volumétrica C_2 de los parámetros viscoplásticos. Para mas

detalle en la formulación del modelo sobre el comportamiento de colapso puede ser consultada en Oka et al. [83].

Los parámetros visco-plásticos requeridos en el modelo son determinados por la relación de vacíos inicial (e_0) definida por ensayos de propiedades físicas. El índice de compresión (λ) y el índice de expansión (κ) son definidos por las pendientes en ensayos de consolidación isotrópica y ensayos de expansión, respectivamente. El esfuerzo de compresión en campo (σ'_{mbi}) es determinada del ensayo de consolidación isotrópica.

El modulo de rigidez elástico (G_0) puede ser determinada desde la pendiente inicial del ensayo de compresión de triaxial segun la condición de drenaje:

$$G_0 = \frac{1}{3} \frac{\Delta q}{\Delta e_{11}} \text{Condición drenada}$$

$$G_0 = \frac{1}{3} \frac{\Delta q}{\Delta \varepsilon_{11}} \text{Condición no drenada.}$$

Donde Δq es el incremento del esfuerzo desviador, siendo $q = \sigma'_{11} - \sigma'_{33}$, $\Delta \varepsilon_{11}$ es el incremento de la deformación axial, y Δe_{11} es el incremento de la deformación, definida como $\Delta e_{11} = \varepsilon_{11} - \varepsilon_v/3$.

La relación de esfuerzo en la compresión maxima M_m^* se determina en el ensayo de compresión drenada, Sin embargo, en las arcillas se determina como la relación en estado residual para el ensayo de compresión no drenada al asumirse en estado critico [84]. El parámetro viscoplástico m' puede ser determinado desde el ensayo de compresión triaxial con diferentes gradientes de deformación. En cuanto a los parámetros estructurales σ'_{maf} y β se definen de ensayos no drenados considerando la disminución desde el esfuerzo pico hasta el esfuerzo residual y la curva de ajuste en el proceso de ablandamiento, respectivamente.

Curva de retención de agua

El modelo propuesto por van Genuchten [85] es implementado en el modelo para describir características de infiltración bajo condiciones parcialmente saturadas. Definida como la función que relaciona el contenido de humedad del suelo con la succión, es decir, representa el grado de saturación en una succión específica, convirtiéndose de esta manera en una de las principales herramientas en la determinación del comportamiento no saturado [86].

$$s = s_{min} + (s_{máx} - s_{min}) \left\{ 1 + (\alpha P^C)^{n'} \right\}^{-m} \quad (3.27)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n'} \quad (3.28)$$

Donde las variables α , n' y m son parámetros de ajuste de la forma de la curva característica de retención de agua, teniendo que $s_{máx}$ y s_{min} son los valores máximos y mínimos para saturación, respectivamente.

Los efectos del grado de saturación en la permeabilidad del aire y del agua se muestran a continuación:

$$k^W = k_s^W s^a \left\{ 1 - \left(1 - s^{\frac{1}{m}} \right)^{n'} \right\} \quad (3.29)$$

$$k^G = k_s^G (1 - s)^b \left\{ 1 - \left(s^{\frac{1}{m}} \right)^{n'} \right\} \quad (3.30)$$

Donde a y b son parámetros propios del material, k_s^G y k_s^W son el coeficiente de permeabilidad para el aire bajo condiciones de suelo seco y el coeficiente de permeabilidad para el agua bajo condiciones de saturación total, respectivamente. Estos coeficientes de permeabilidad

dependen de la relación de vacíos (e) de la siguiente forma:

$$k_s^W = k_{s0}^W \exp[(e - e_0)/C_k] \quad (3.31)$$

$$k_s^G = k_{s0}^G \exp[(e - e_0)/C_k] \quad (3.32)$$

k_{s0}^W y k_{s0}^G son los valores iniciales para k_s^W y k_s^G en $e = e_0$ respectivamente. C_k es un parámetro de material que considera el gradiente de cambios en la permeabilidad sujeta a cambios en la relación de vacíos.

3.2. Estructura metodológica

Con el propósito de ejecutar el modelo propuesto por Oka et al. [76], se utiliza el entorno de desarrollo integrado (IDE) CodeBlocks, desarrollado en el lenguaje de programación FORTRAN 77 y el compilador GNU GCC FORTRAN Compiler. Para propósitos de la presente investigación, se ajustan las condiciones de frontera y drenaje establecidas en las subrutinas integrantes del modelo acoplado, además de la geometría y características de los materiales a interactuar durante el proceso de infiltración en condiciones parcialmente saturadas.

En la Figura 3.2 se presenta un esquema de la metodología llevada a cabo, iniciando con la implementación del modelo, posteriormente el análisis de la contribución de las variables en el desarrollo del fenómeno y, por último, el desempeño y rendimiento de la ruptura de la barrera capilar bajo distintos escenarios. Este procedimiento pretende desarrollar los objetivos planteados en la investigación. A continuación, se detallan las etapas y análisis correspondientes a cada uno de los objetivos específicos.

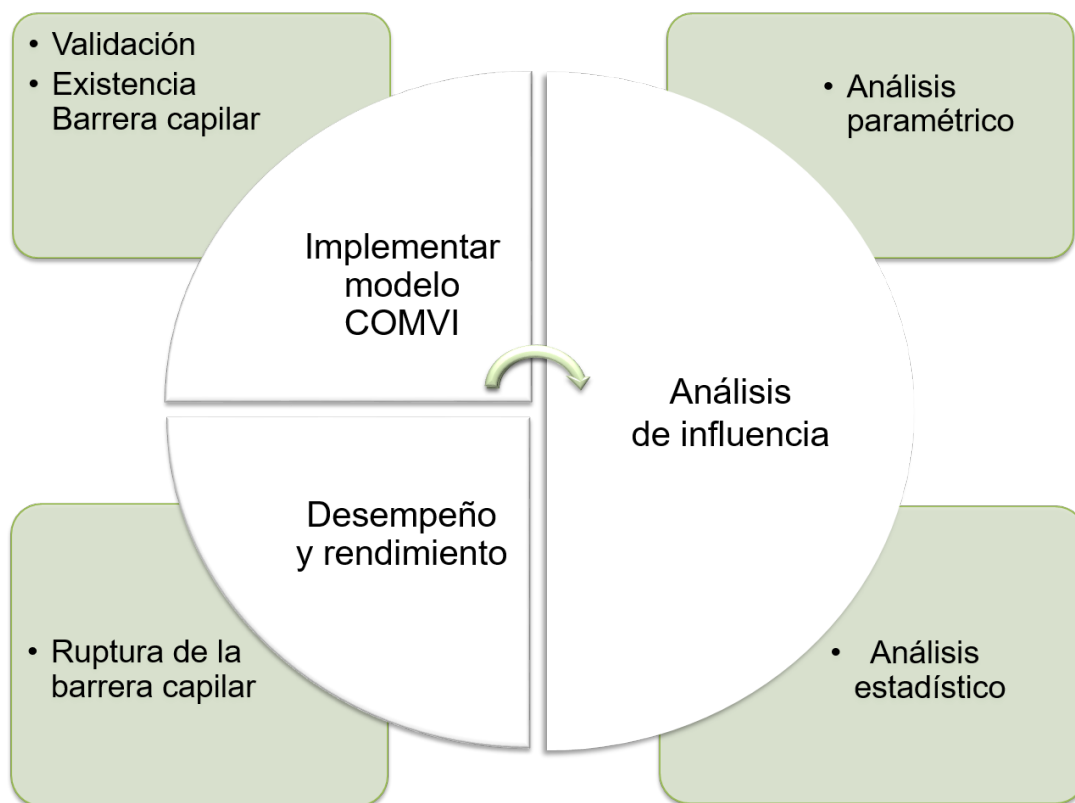


Figura 3.2: Diagrama metodológico

3.3. Validación

Se evalúa la capacidad del modelo COMVI para representar de manera continua el proceso de infiltración y el fenómeno de la barrera capilar bajo un enfoque hidro-mecánico. La evaluación consta de validar numéricamente los resultados experimentales en terraplenes reforzados con geosintéticos estudiados por Garcia [3], en los cuales se sometió las estructuras de suelo reforzado a procesos de secado y humedecimiento.

A continuación se describe las condiciones y características de la experimentación realizada por Garcia [3], así como los resultados y conclusiones derivadas de la respuesta hidráulica de

los geosintéticos permeables bajo condiciones parcialmente saturadas.

3.3.1. Modelo experimental

Garcia [3] desarrolló una investigación experimental sobre el comportamiento y respuesta hidráulica de terraplenes artificiales reforzados con geosintéticos permeables. Evaluando el desempeño de los geosintéticos como material drenante durante eventos de secado y humedecimiento.

Los terraplenes fueron instrumentados con transductores de presión de poros y humedad, para medir la succión y el contenido volumétrico de agua a través de los materiales en condiciones parcialmente saturadas. Adicionalmente, se empleó la celda de presión (*tempe pressure cell*) y el ensayo de cabeza colgante (*hanging column*) para determinar las curvas de retención del suelo y los geosintéticos, respectivamente.

Terraplenes con y sin refuerzo (Geosintético) fueron sometidos a escenarios de lluvia artificial, con el fin de observar la influencia del geosintético en el avance del frente húmedo. La disposición de los sensores se enfocó en la interfaz suelo-geosintético. Por ende, se instalaron sensores por debajo y por encima de las capas de refuerzo. Por otro lado, en la parte inferior del terraplén se ubicaron dos agujeros para permitir el drenaje del agua durante la experimentación. Las Figuras 3.3 y 3.4 muestran el modelo experimental y la distribución de los sensores en el terraplén, respectivamente.

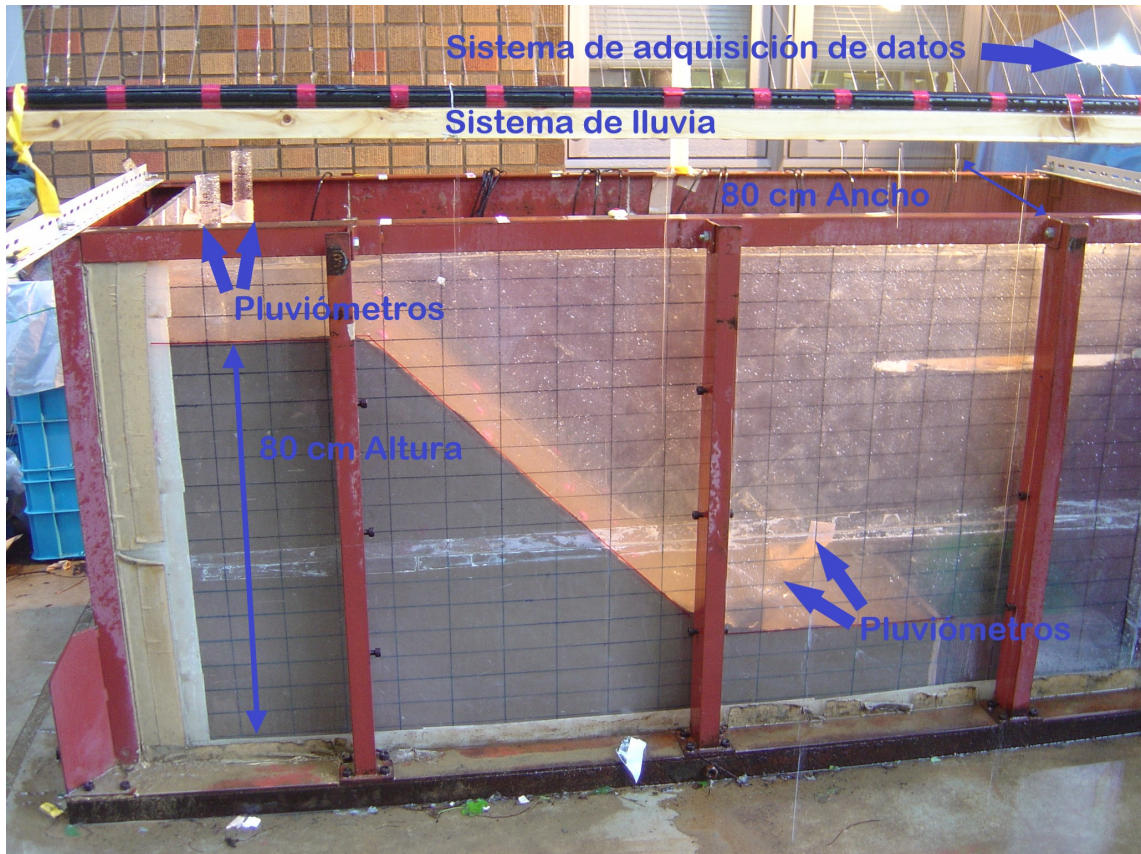


Figura 3.3: Modelo experimental y elementos empleados. Reproducido de [3].

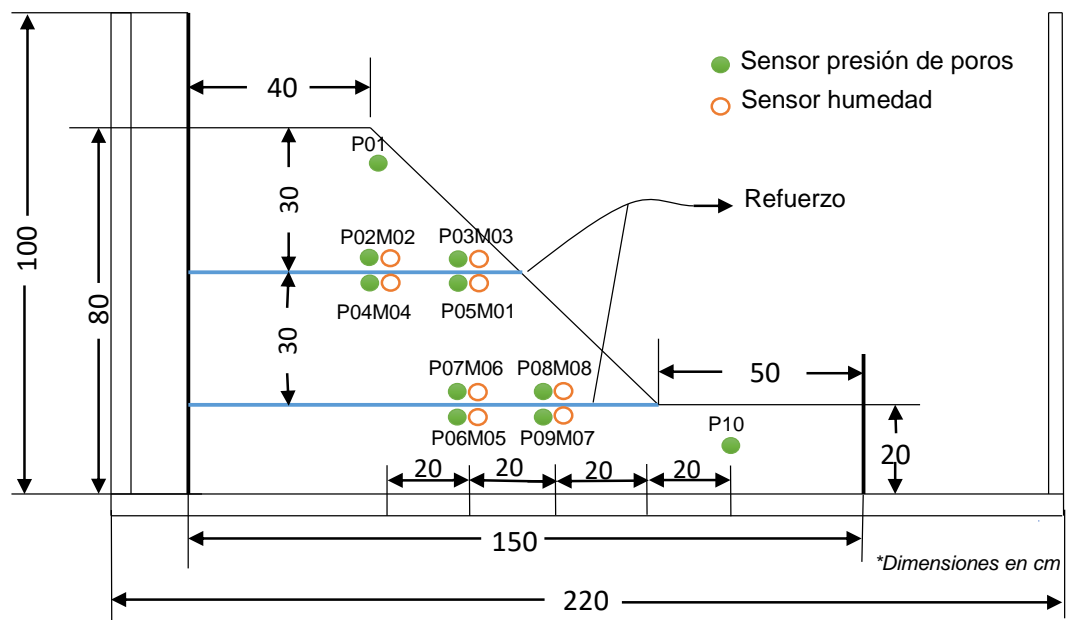


Figura 3.4: Modelo esquemático y localización de los sensores. Reproducido de [3].

Los materiales empleados corresponden a arenas limosas (silty sand) acorde al sistema de clasificación unificada de suelos (*unified soil classification system-USCS*), en el estudio de Garcia [3] son llamados Inage y Edosaki sand, obtenidos de las prefecturas de Ibaraki y Chiba (Japon), respectivamente [87]. Con respecto a los materiales de refuerzo se utilizó un geotextil no tejido y un geocompuesto tejido-no tejido. Estos materiales se usaron para diferentes ensayos y escenarios durante el proceso de infiltración. En la Tabla 3.1 se describe las características y condiciones del modelo empleado para la validación numérica, correspondiente al Modelo 3.

Tabla 3.1: Descripción Modelo 3. Modificado de [3]

Suelo	Edosaki sand
Pendiente (%)	45
Contenido inicial de agua	18
Contenido optimo de agua, w_{opt} (%)	16.01
Grado de saturación inicial, S_r (%)	45
Peso especifico seco, γ_d (kN/m^3)	13.50
Máximo Peso especifico seco, (kN/m^3)	17.20
Grado de compactación (%)	78
Geosintético	No-tejido
Capas de geosintético	2
Número de sensores de presiones de poros	10
Número de sensores de humedad	8
Duración ensayo (días)	3
Lluvia 1	
Intensidad (mm/h)	40-50
Duración (horas)	4
Periodo de secado (h)	19
Lluvia 2	
Intensidad (mm/h)	40-50
Duración (horas)	1.2

En la Figura 3.5 se presenta la distribución temporal del contenido volumétrico de agua obtenido en el Modelo 3 durante toda la experimentación; incluyendo la preparación, eventos de lluvia y secado. A partir de los resultados se infiere que la inclusión del geotextil genera una frontera hidráulica durante y después de los eventos de lluvia, reflejada en la acumulación de agua por encima de la capa de geotextil. Garcia [3] concluye que el drenaje del agua a través del geotextil se genera solo hasta que el suelo circundante este casi saturado y se presenten presiones de poros positivas. Adicionalmente, el estudio reporta los efectos de la presencia de la barrera capilar, generando fallas después del segundo evento de lluvia, justamente en la interfaz suelo-geotextil (ver Figuras 3.6a y 3.6b).

Considerando las condiciones y discretización a implementar en la malla de análisis; se

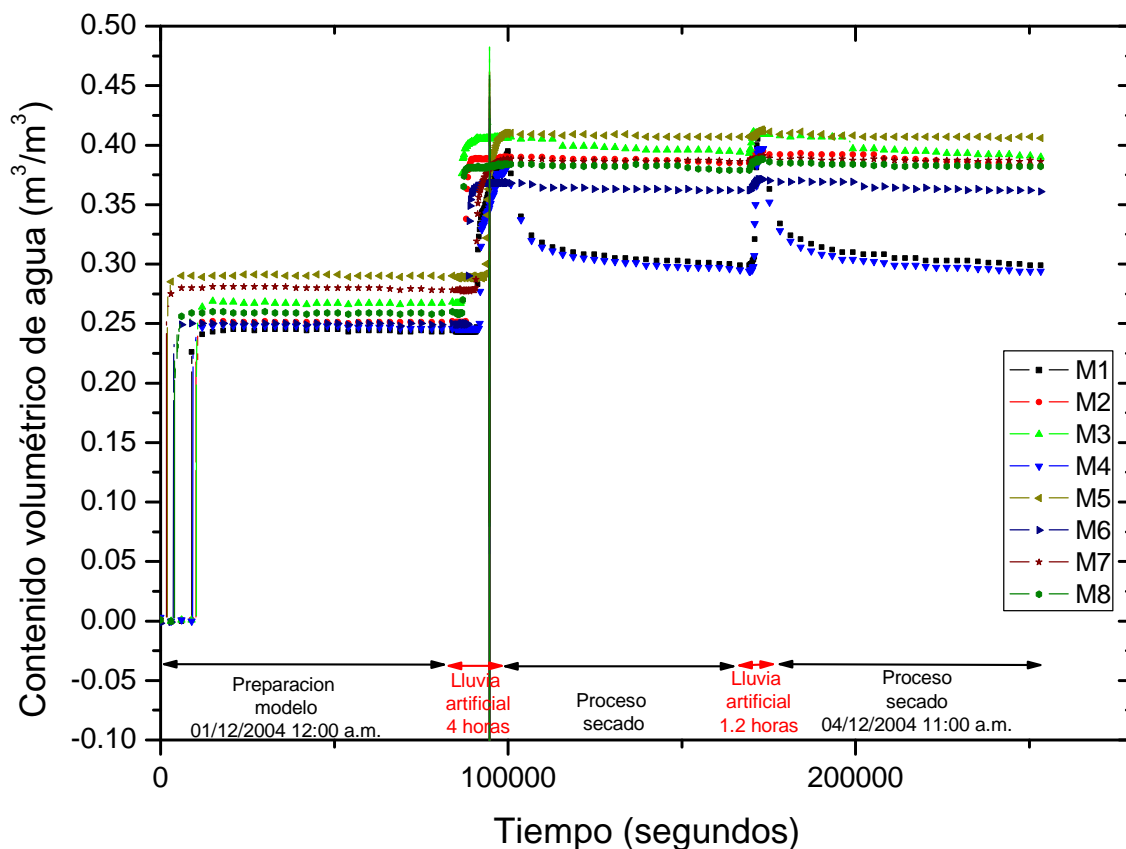
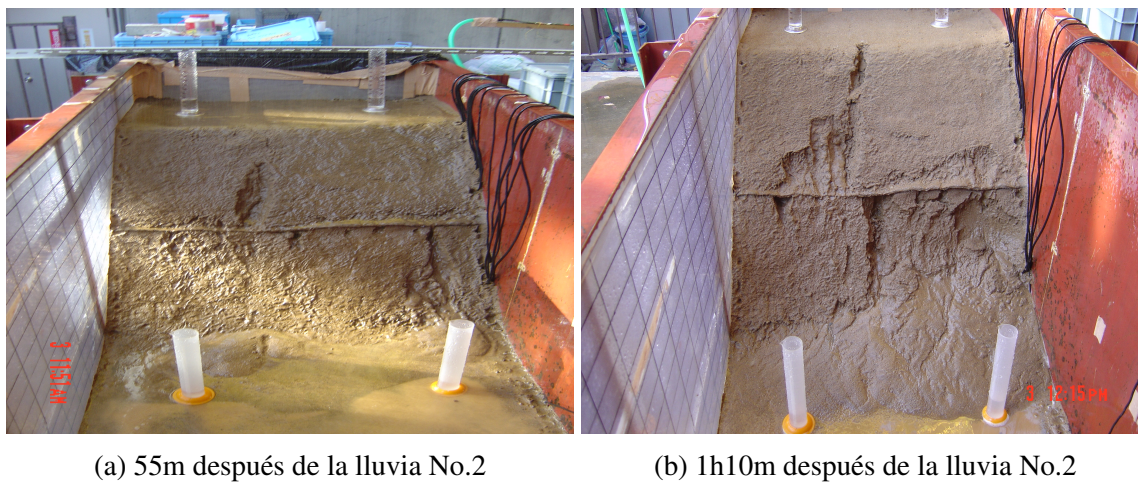


Figura 3.5: Distribución temporal del contenido volumétrico registrado en el Modelo 3. Repro-
ducido de [3].



(a) 55m después de la lluvia No.2

(b) 1h10m después de la lluvia No.2

Figura 3.6: Fallas locales presentadas en el Modelo 3 [3].

evalúa el proceso de infiltración mediante la variación temporal de la presión de poros y el contenido volumétrico de agua, analizando el ajuste en las variables respuesta en comparación con los registros dados por la instrumentación localizada en las capas de refuerzo durante la experimentación. En los resultados numéricos se considera el ajuste que se puede obtener mediante la curva de humedecimiento y con la curva estimada a partir de los registros reportados por los sensores de contenido volumétrico de agua y presión de poros, llamadas *scannig curve*. Finalmente, se determina el comportamiento general en términos del ajuste y desempeño del modelo en representar la presencia y desarrollo de la barrera capilar.

3.4. Análisis de influencia

El análisis de influencia consta de un análisis paramétrico, y posteriormente la implementación de modelos de inferencia estadística, con el propósito de caracterizar el efecto de las variables hidro-mecánicas en el fenómeno de la barrera capilar. A continuación se describe las etapas que componen el análisis de influencia y su respectivo propósito.

3.4.1. Material base

Inicialmente, se definen las condiciones de frontera y los materiales base correspondientes al suelo y refuerzo empleados, a partir de los parámetros requeridos en el modelo según la asignación del material (elástico o viscoplástico). Así mismo, se presenta los resultados del proceso de infiltración y la generación de la barrera capilar a partir de los parámetros establecidos.

3.4.2. Análisis paramétrico

Posteriormente, se procede a establecer el diseño del análisis paramétrico mediante la selección de los parámetros que puedan gobernar el flujo y las condiciones presentes en la interfaz suelo-geotextil, considerando la interdependencia entre el comportamiento hidráulico y mecánico. Por tal razón, la selección de los parámetros y los niveles se establecen con base en las propiedades destacadas por estudios numéricos y/o experimentales con influencia en el desempeño de la barrera capilar, como también de investigaciones realizadas bajo un enfoque acoplado hidro-mecánico y la influencia de las variables mecánicas en el comportamiento hidráulico durante eventos de infiltración. Con énfasis en las variables implementadas en investigaciones previas con el uso del modelo COMVI.

El análisis paramétrico pretende describir las variaciones generadas por los distintos parámetros en la distribución de las variables concernientes al flujo de infiltración, con principal atención en la ruptura de la barrera capilar. La descripción de la posible influencia se realiza a partir de la representación temporal del grado de saturación y presión de poros desarrollados en el intervalo de tiempo donde se genera la ruptura del fenómeno para cada nivel del parámetro en estudio.

3.4.3. Análisis estadístico

Finalmente, se adoptaron modelos de inferencia estadística, con el fin de soportar y determinar la posible influencia de los parámetros estudiados en el análisis paramétrico. El uso de pruebas de hipótesis como modelos de inferencia buscan aceptar o rechazar planteamientos con base en las evidencias que se tengan del comportamiento expuesto por las variables dependientes a partir de los distintos tratamientos y evidenciar las posibles diferencias entre ellos [88]. La validez de los resultados y alcance de estos modelos dependen estrictamente del cumplimiento

CAPÍTULO III. 3.4. ANÁLISIS DE INFLUENCIA

de los supuestos considerados en los distintos test (pruebas).

Por lo tanto, se realiza un análisis descriptivo de las variables que intervienen en el proceso de infiltración, las cuales corresponden a las variables respuesta arrojadas por el modelo; como resultado del proceso de infiltración determinado en cada unidad de tiempo ($\Delta t = 30s$). El análisis estadístico propuesto es implementado en el software de código abierto R version 3.5.2 (2018-12-20). Inicialmente, se presenta la estructura de dependencia entre las variables dado por la dispersión, matriz de correlación (método de Spearman) y los histogramas de las variables (paquete R '*PerformanceAnalytics*'). Adicionalmente, se emplea el análisis de componentes principales (paquete R '*factoextra*' y '*devtools*') para determinar la contribución de las variables en la explicación de la variabilidad, y la posible construcción de variables latentes que dan un concepto específico del comportamiento evaluado. A continuación, se presentan los distintos modelos de varianza según las condiciones y supuestos establecidos.

Las primeras técnicas de inferencia fueron establecidas con la suposición sobre la naturaleza y forma de la población, estas técnicas fueron llamadas paramétricas. La prueba F es considerada como la prueba con mayor poder estadístico debido a sus suposiciones extensas y estrictas [89]. El estadístico F determina la diferencia entre los grupos a partir de la relación entre la varianza de las medias de los distintos niveles del factor y la varianza dentro de los niveles, definidas como la intervarianza e intravarianza, respectivamente [90]. Es por esto, que la prueba F es empleada para el análisis de varianza 'dentro y entre los grupos' [91]. Se establece la siguiente prueba de hipótesis, siendo la hipótesis nula y alternativa H_0 y H_a , respectivamente.

† H_0 : No hay diferencias entre las medias de los grupos: $\mu_1 = \mu_{2..} = \mu_k = \mu$.

† H_a : Al menos un par de medias son significativamente distintas entre ellas.

El análisis de varianza es definido a partir de la descomposición de la varianza (Variabilidad

CAPÍTULO III. 3.4. ANÁLISIS DE INFLUENCIA

total= intervarianza + intravarianza), las cuales son definidas mediante la suma de cuadrados medios, siendo:

$$\hat{S}_T^2 = \frac{TTS}{N - 1} = \frac{\text{Cuadrados medios totales}}{\text{Grados de libertad}} = \text{varianza total}$$
$$\hat{S}_t^2 = \frac{SST}{k - 1} = \frac{\text{Cuadrados medios del factor}}{\text{Grados de libertad}} = \text{Intervarianza}$$
$$\hat{S}_E^2 = \frac{TTS}{N - k} = \frac{\text{Cuadrados medios del error}}{\text{Grados de libertad}} = \text{varianza dentro los niveles}$$
$$F = \frac{\hat{S}_t^2}{\hat{S}_E^2} = \frac{\text{Intervarianza}}{\text{Intravarianza}}$$

Los criterios de rechazo de la hipótesis nula es el valor obtenido para el estadístico F, el p-value (con nivel de significancia $\alpha = 0,05$) y el tamaño del efecto η^2 . Este último, determinado como la relación entre la suma de cuadrados entre grupos y la suma de cuadrados totales. Los supuestos considerados en la prueba F son:

- † Independencia de las observaciones, es decir, las observaciones deben ser aleatorias. Los grupos (niveles del factor) deben de ser independientes entre ellos.
- † Normalidad de la población en cada uno de niveles.
- † Homogeneidad de varianza entre grupos.

El incumplimiento de estos supuestos puede aumentar la probabilidad de incurrir en el error tipo I (rechazar erróneamente la hipótesis nula verdadera) [92]. Como alternativa a los modelos paramétricos han surgido las técnicas no paramétricas, los cuales no dependen de la forma o distribución de la población (normalidad). Los modelos no paramétricos se enfocan en ordenar o ranquear las observaciones, por consiguiente, el análisis lo realiza a partir de la diferencias

CAPÍTULO III. 3.4. ANÁLISIS DE INFLUENCIA

existentes en las medianas de los rangos, en comparación de los modelos paramétricos al evaluar la diferencia entre las medias de los grupos [88].

En la Tabla 3.2 se presenta las pruebas según el tipo de variable dependiente y el número de muestras a considerar. A partir de las características de las observaciones y grupos conformados por la serie de simulaciones realizadas; se podría implementar las pruebas de la Mediana y Kruskal Wallis (prueba H), al considerar la naturaleza de las variables cuantitativas y continuas, definidas para más de 2 niveles en cada factor. Con respecto a estas dos pruebas no paramétricas, varios autores han definido que se logra alcanzar una mayor eficiencia de la prueba H en comparación con la prueba de la mediana [93], [94].

Tabla 3.2: Clasificación de pruebas no paramétricas según variable dependiente. Modificado de [4].

	Nominal	Ordinal/ Intervalo
Una muestra	Binomial Chi-Cuadrado Rachas	Kolmogorov-Smirnov
2 muestras relacionadas	McNemar	Signos Wilcoxon
>2 muestras relacionadas	Cochran	Friedman Kendall
2 muestras independientes	-	Rachas de Wald-Wolfowitz U de Mann-Whitney Moses Kolmogorov-Smirnov
>2 muestras independientes	-	Mediana Kruskal-Wallis

La prueba H es una extensión de la U de Mann-Whitney, la prueba propuesta por Kruskal y Wallis en 1952 [95] es conocida como la alternativa no paramétrica a la prueba F [92]. En términos de la relación poder-eficiencia; la prueba H tiene un 95 % de poder estadístico con respecto a la prueba F [96].

CAPÍTULO III. 3.4. ANÁLISIS DE INFLUENCIA

La prueba H considera una misma distribución para todos los grupos (sin necesidad de ser normal), además es sensible a varianzas heterogéneas [97]. Las hipótesis planteadas en la prueba H son:

† Ho: todas las muestras provienen de la misma población (distribución).

† Ha: Al menos una muestra proviene de una población con una distribución distinta.

El valor p y el estadístico H se emplea como criterio de rechazo, defino como:

$$H = \left[\frac{12}{N(N+1)} \sum_{j=1}^J \frac{R_j^2}{n_j} \right] - 3(N+1)$$

N son las observaciones a ordenar por rangos, R_{ij} representa el rango de las i observaciones en j grupos. En donde R_j representa la suma de los rangos para los j grupos.

Acorde a lo descrito anteriormente, en la presente investigación se determina el análisis de varianza mediante las pruebas F (*aov*) y H (*kruskal.test*), se considera unicamente la influencia de los efectos principales de cada factor en las diferencias presentadas por cada grupo, no se contempla los efectos generados por la interacción entre factores, el nivel de significancia establecido para el análisis de varianza es de 95 % ($\alpha = 0,05$).

Inicialmente, se realiza el análisis descriptivo de las variables respuesta. Posteriormente, se presentan estadísticos de tendencia central (media, desviación estandar y mediana) para las variables determinadas en cada factor y sus respectivos niveles. Finalmente, se muestran los resultados del análisis de varianza y la validación de los supuestos inmersos en cada prueba; en el modelo paramétrico la validación se evalúa en los residuos de la prueba F, la distribución normal se revisa mediante el diagrama *QQ-plot*, la igualdad en las varianzas es verificada con la prueba de Barlett (*require(car)*), y para la independencia se consideró la prueba de Durbin-Watson

(*require(lmtest)*). En cuanto al modelo no paramétrico (Kruskal-Wallis) se requiere revisar únicamente la homocedasticidad [92], esta es evaluada con la prueba de Barlett en las variables respuesta con respecto a cada factor. Adicionalmente, se realizan análisis de contrastes Post-Hoc (paquete R '*pgirmess*') en las pruebas de hipótesis con diferencias significativas, con el propósito de identificar las diferencias a partir de comparaciones múltiples entre los niveles de cada factor, para el análisis no paramétrico se empleó la prueba de Wilcoxon para rangos con corrección del nivel significancia de Holm (*pairwise.wilcox.test*).

3.5. Desempeño de la ruptura capilar

Se pretende evaluar el desempeño de la barrera capilar con la variación de las propiedades hidráulicas de los materiales. En este proceso se determina el tiempo y nivel de succión que se requiere para romper la barrera capilar, como resultado de la acumulación y saturación del suelo circundante a la capa de geotextil. Y el consecuente crecimiento súbito de la presión de poros en la interfaz suelo-geotextil hasta alcanzar las condiciones necesarias para la ruptura de la barrera capilar. Para este análisis se emplea el elemento 409 asignado como geotextil para determinar el tiempo y nivel de succión generados en la ruptura.

El tiempo y la succión determinada con el análisis numérico se compara con la succión de avance determinada a partir de la función de conductividad de ambos materiales empleando el modelo de Van Genuchten [85] definida como *breakthrough suction*, en la presente investigación es llamada succión de avance, en el cual se puede establecer la succión teórica que genera la ruptura de la barrera capilar mediante la interacción y convergencia de las funciones de conductividad de ambos materiales; es decir, el fenómeno de barrera capilar permanece hasta que las conductividades hidráulicas de ambos materiales alcanzan el mismo valor en el nivel

CAPÍTULO III. 3.5. DESEMPEÑO DE LA RUPTURA CAPILAR

de succión crítico [98]. Con esta comparación, se pretende estimar la capacidad del modelo en representar la ruptura de la barrera capilar bajo la interacción del suelo con distintos geotextiles, definidos a partir de los parámetros de ajuste de la curva de retención de agua con el modelo de Van Genuchten (α y n). Los valores asignados a los parámetros de ajuste corresponden a geotextiles no-tejidos de uso comercial en Estados Unidos reportados por Zornberg et al. [99].

Capítulo IV

RESULTADOS

4.1. Validación

Las condiciones descritas en el estudio experimental se implementaron en el modelo COM-VI, con el propósito de determinar la capacidad del análisis numérico para representar el proceso de infiltración y el fenómeno de la barrera capilar bajo un enfoque acoplado hidro-mecánico.

En la Figura 4.1 se presenta la malla ajustada a las dimensiones del terraplén artificial, en cuanto a los desplazamientos; para el fondo del terraplén se restringe en ambas direcciones (vertical y horizontal), mientras que en las paredes laterales se limita en dirección horizontal.

En los elementos de contorno se determinan las condiciones de frontera drenantes. A partir de la asignación de materiales se define el ingreso de lluvia, el cual se permite mediante los materiales 2 y 3. Las paredes laterales del talud se establecen como fronteras impermeables, con el fin de drenar el flujo de infiltración en el fondo del talud (Figura 4.2).

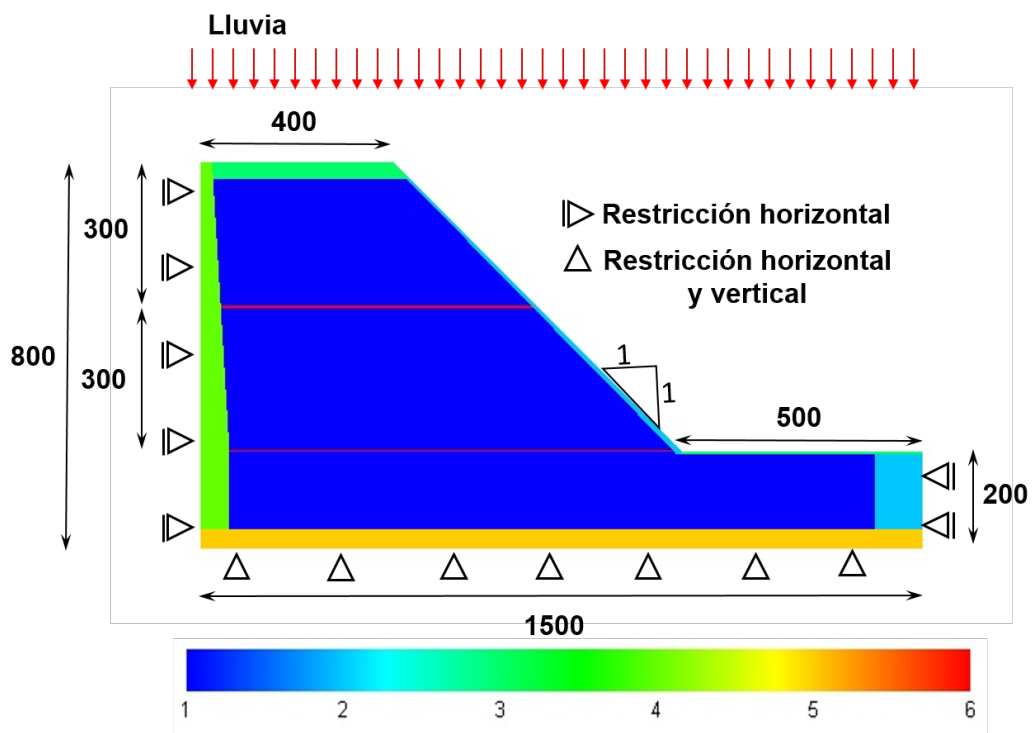


Figura 4.1: Condiciones de frontera implementada en elementos finitos según asignación del material.

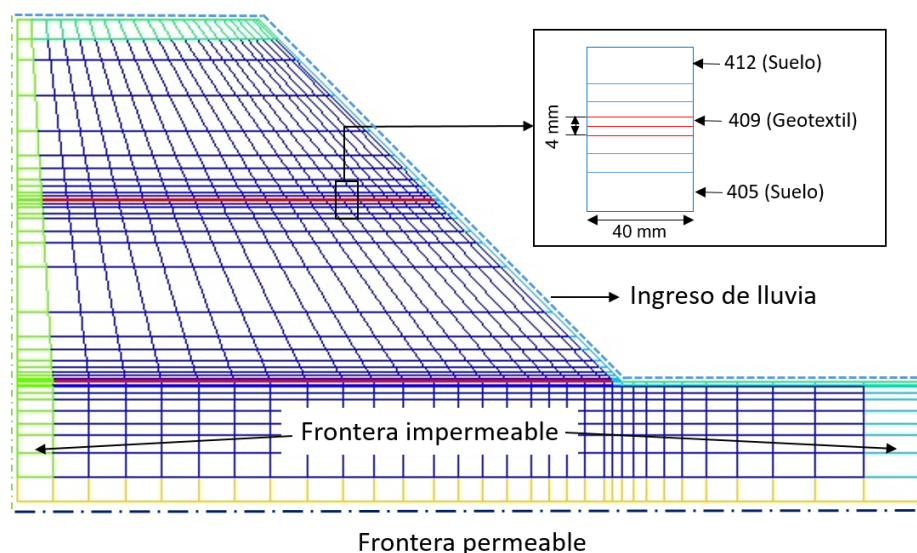


Figura 4.2: Discretización malla y condiciones de drenaje.

La discretización y dimensiones de los elementos que componen la malla de análisis pretende considerar la interacción de los materiales con el uso de elementos finitos. Es por esto, que en la interfaz suelo-geotextil la malla es mas fina, con el fin de generar una adecuada transición entre los materiales modelados. Los elementos de análisis se encuentran en la posición de los instrumentos por debajo y por encima de las capas de refuerzo con geotextil, tal como se muestra en la Figura 4.2.

El escenario de infiltración corresponde a la primer lluvia ejecutada en el Modelo 3, la cual se realizó con una intensidad de 40 a 50 mm/h, aproximadamente. Para efectos de simulación se implementa una lluvia constante de 40 mm/h durante 4 horas. La posición del nivel freático se ubica en la base del talud. El flujo de aire es permitido en todas las fronteras, la presión de aire inicial es asumida como cero.

Las condiciones de humedad iniciales dependen del procedimiento y preparación del terra-

plén en el Modelo 3. Por consiguiente, la succión inicial (ψ_i) de los elementos se determina a partir del nivel de saturación inicial del suelo previo al ingreso de lluvia. Para tal propósito, se ajustan las curvas de retención de agua mediante el modelo de van Genunchten (VG) [85]. A continuación, se presentan las principales curvas de humedecimiento y secado, ajustado a los datos reportados experimentalmente (Exp.). También, se muestran las curvas elaboradas con los registros de presión de poros y contenido volumétrico de agua en los distintos puntos de instrumentación (P2-M2, P3-M3, P4-M4, P5-M1, P7-M6, P6-M5). Esto, con el propósito de adaptar las condiciones iniciales de la experimentación a partir de los parámetros hidráulicos requeridos en la simulación. Las curvas mencionadas, han sido definidas como *scanning curve*, limitadas por las curvas de humedecimiento y secado, ajustando los parámetros α y n según la variación en el comportamiento exhibido por los sensores (Figura 4.3). Cabe destacar, que varios investigadores han implementado el uso de estas curvas [100] [101] [102] [60].

Adicionalmente, La Figura 4.4 presenta las funciones de conductividad hidráulica empleando los parámetros del modelo de van Genunchten [85], obtenido por las curvas humedecimiento y secado, respectivamente. Para el suelo se emplean la conductividad hidráulica saturada reportada por Gallage [103], en el cual se realizaron medidas de la conductividad hidráulica en el mismo suelo del experimento durante el proceso de secado, con el uso de un permeámetro compuesto con tensiómetros que miden directamente la succión durante la experimentación. Con respecto, al geotextil se utilizan las propiedades hidráulicas descritas en Handoko [104], correspondiente al geotextil no tejido (NW) EX-80 con espesor de 4 mm, siendo el mismo material de refuerzo empleado en el estudio experimental en consideración. En la Figura 4.4 también se puede observar que el valor teórico de succión (ψ_{cr}) necesario para la ruptura de la barrera capilar representa valores muy cercanos a cero, lo cual es descrito posteriormente en los registros de los sensores durante la experimentación.

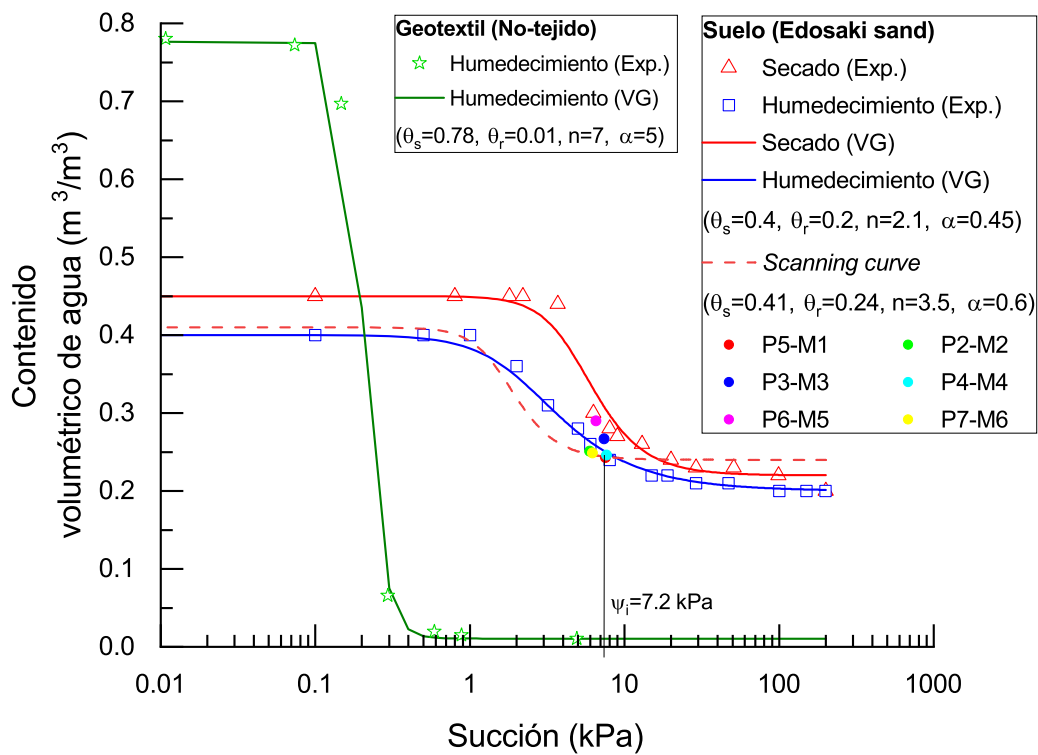


Figura 4.3: Curva de retención de agua del suelo y el geotextil.

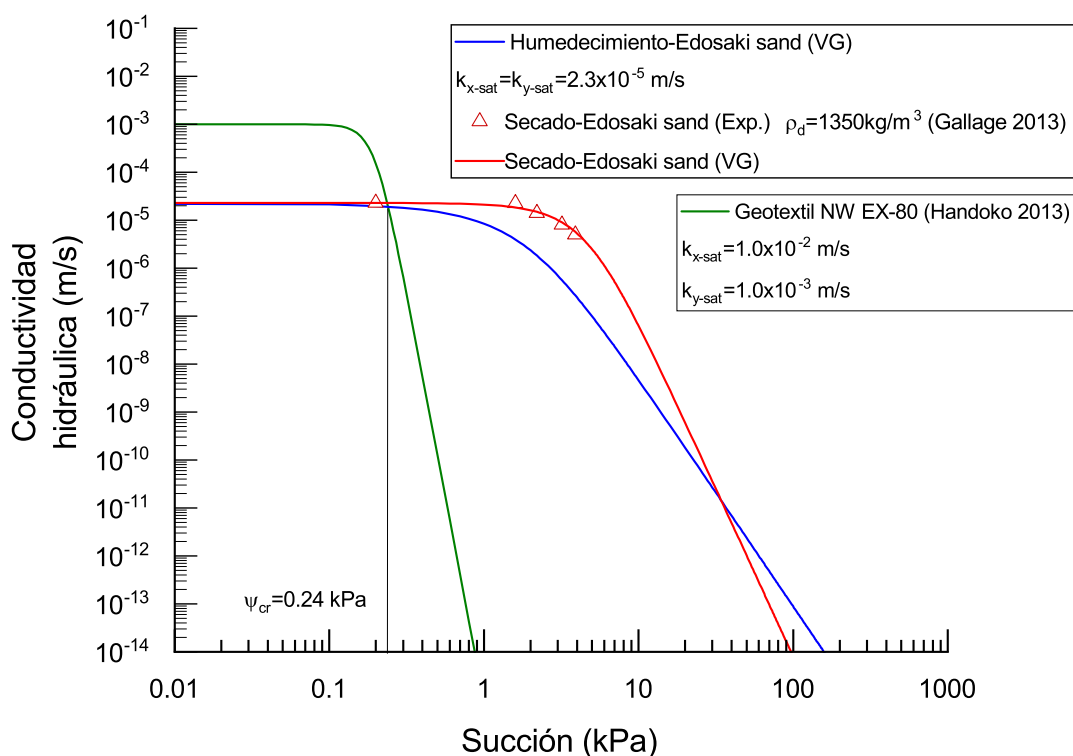


Figura 4.4: Funciones de conductividad de agua del suelo y el geotextil.

En la Figura 4.5 se presenta la comparación entre los resultados experimentales y numéricos, en términos del contenido volumétrico de agua registrado por los sensores M2 y M4, los cuales se encuentran ubicados por encima y por debajo de la primer capa de refuerzo, respectivamente (Figura 3.4). Los resultados numéricos se basan en las simulaciones realizadas con la curva principal de humedecimiento (*Main wetting curve-MWC*) y *scanning curve-SC* designadas en las propiedades hidráulicas del suelo.

A partir de la Figura 4.5 se logra inferir la capacidad del modelo numérico en capturar el fenómeno de barrera capilar. Evidenciado en los altos niveles de humedad que presenta el elemento 612 (ubicado por encima del geotextil) en los primeros minutos de simulación. En

CAPÍTULO IV. 4.1. VALIDACIÓN

consecuencia, se presenta una reducción en la presión de poros producto del inicio de la acumulación de agua concentrada en dicha zona. Posteriormente, se alcanzan niveles de humedad cercanos a la saturación completa, dicha condición se presenta posterior a los 2500 segundos tanto para los registros experimentales como para las simulaciones, conservando estas condiciones de humedad para el resto del tiempo de infiltración.

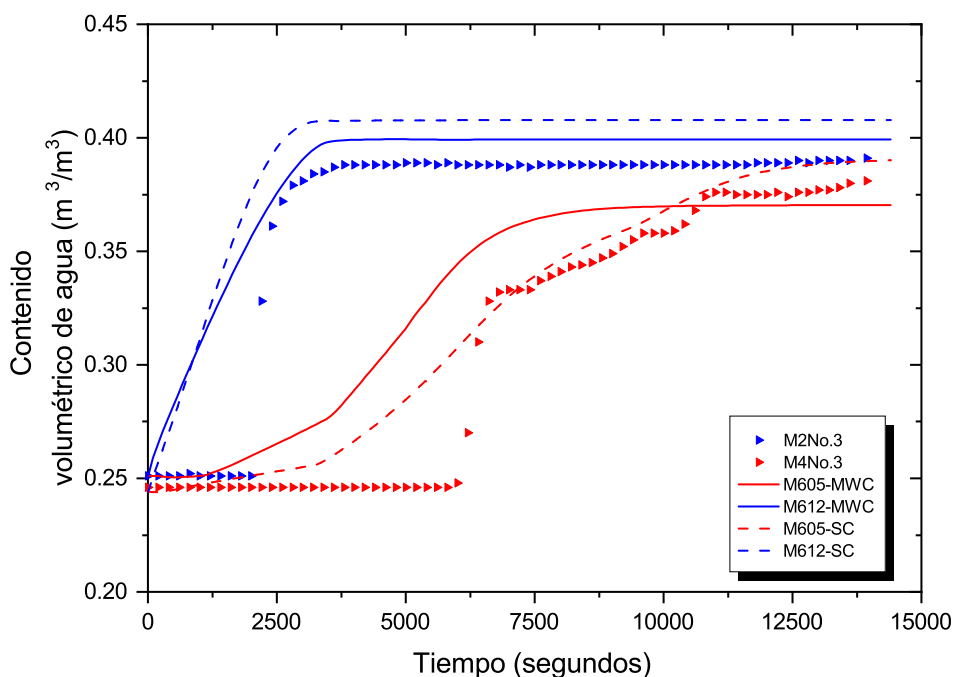


Figura 4.5: Distribución temporal del contenido volumétrico de agua registrado por M2 y M4.

En la Figura 4.6 se muestra la comparación con la presión de poros desarrollado en los sensores P2 y P4, observando que a los 5000 segundos transcurridos se registran valores entre 0.4-0.2 kPa, los cuales son congruentes con el comportamiento teórico descrito por las funciones de conductividad, y las condiciones necesarias en términos de presión de poros para el flujo a través del geotextil.

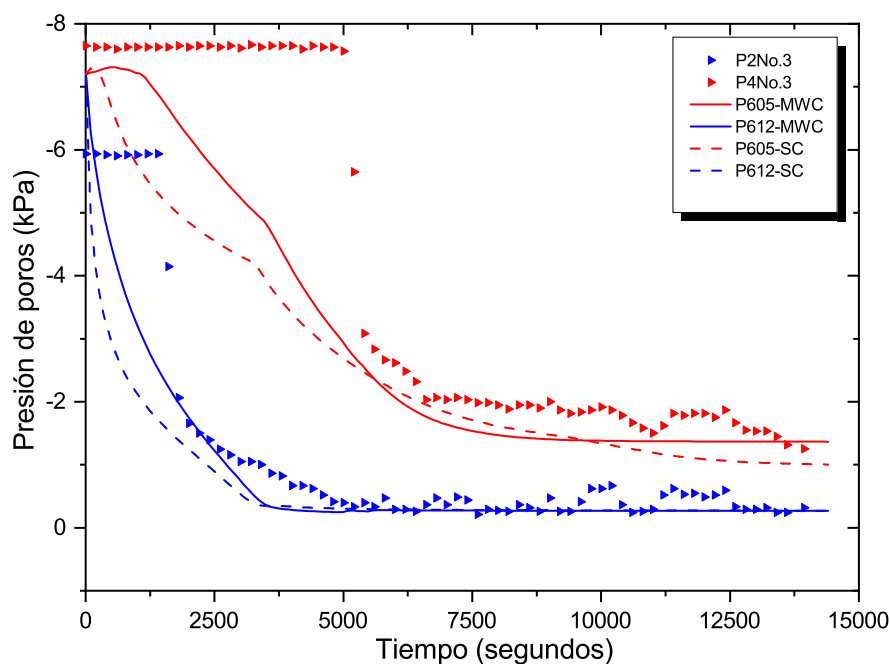


Figura 4.6: Distribución temporal de la presión de poros con la registrada por P2 y P4.

En el análisis experimental los sensores localizados por debajo del geotextil (M4-P4) inicialmente no presentan variaciones en el contenido de humedad, y por ende en la presión de poros, debido a la condición hidráulica existente en la interfaz suelo-geotextil. El flujo de agua por debajo del geotextil se registra posterior de los 5000 segundos transcurridos. Mientras que en el análisis numérico el incremento de humedad se presenta desde el inicio de la modelación. No obstante, el incremento en la humedad se acelera cuando el elemento 612 (ubicado por encima del geotextil) alcanza niveles de saturación completa, lo que genera las condiciones de humedad necesarias para la ruptura de la barrera capilar.

La diferencia entre los valores medidos por los sensores y los resultados en el análisis numérico podría atribuirse a varios aspectos durante la experimentación. El proceso de compactación

CAPÍTULO IV. 4.1. VALIDACIÓN

durante la construcción del terraplen puede generar variaciones en la distribución de poros y conductividad, puntualizando la zona suelo-refuerzo [105]. Lo cual, puede inducir condiciones de heterogeneidad y/o anisotropía en el suelo no consideradas en el modelo numérico. De igual modo, la intrusión de partículas y aire atrapado en las capas de refuerzo puede reducir la conductividad hidráulica del geotextil, lo cual ha sido reportado por varios investigadores [106], [107]. Dicha reducción en las propiedades hidráulicas no se consideró en las simulaciones.

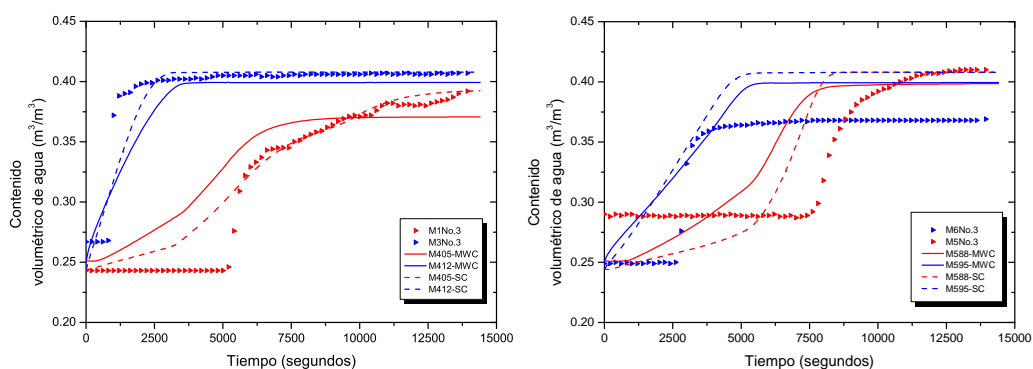
Por otra parte, durante la experimentación se pueden presentar retrasos en la medición del contenido de humedad y presiones de poros dependiendo de la instrumentación empleada y las condiciones presentes durante el avance del frente húmedo. Estas condiciones pueden retrasar el flujo a través de la capa de geotextil, y por lo tanto la ruptura de la barrera capilar puede presentarse posteriormente, en comparación con lo observado en el análisis numérico. Sin embargo, la distribución temporal de las variables respuesta (Contenido volumétrico y presión de poros) y la comparación entre los valores medidos y determinados numéricamente permiten destacar el desempeño del modelo para representar el proceso de infiltración en estructuras de suelo reforzado con geotextil no tejido. Con principal énfasis en la presencia, desarrollo y desempeño de la barrera capilar.

La Figura 4.7 muestra los otros puntos de análisis alrededor de las capas de refuerzo. La primer capa de refuerzo está ubicada en la parte inferior del talud, y corresponde a los elementos 588 y 595. En cuanto a la capa superior de refuerzo; se emplean los elementos 405 y 412. La selección de estos elementos de análisis se ajusta a la localización de los sensores tal como se indica en la Figura 3.4, y la posición por encima y por debajo del geotextil es acorde a la discretización de la malla en la zona de refuerzo (Figura 4.2).

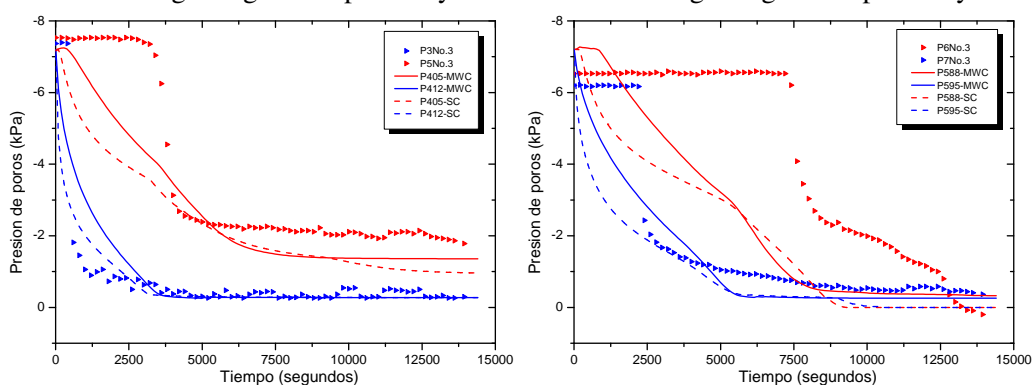
En general, se logra un mejor ajuste en términos del contenido volumétrico en relación con lo obtenido con presiones de poros, esencialmente a los valores registrados posterior a la ruptura

CAPÍTULO IV. 4.1. VALIDACIÓN

de la barrera capilar. No obstante, en las Figuras 4.7b y 4.7d los elementos ubicados en la capa inferior (588 y 595) presentan mayores diferencias con los datos experimentales, inclusive con los valores iniciales de humedad, los cuales difieren de las condiciones evidenciadas en los otros puntos de análisis. Basado en lo anterior, se podría considerar la variación en las condiciones iniciales de los elementos cercanos al nivel freático, condiciones que difieren de las establecidas en el análisis numérico de forma uniforme para toda la malla. Además, de la posible influencia en el desempeño de la barrera capilar con el desarrollo de presiones positivas por debajo del geotextil.



(a) Distribución temporal del contenido volumétrico de agua registrado por M1 y M3. (b) Distribución temporal del contenido volumétrico de agua registrado por M5 y M6.



(c) Distribución temporal de la presión de poros con la registrada por P3 y P5. (d) Distribución temporal de la presión de poros con la registrada por P6 y P7.

Figura 4.7: Comparación de resultados experimentales y numéricos por debajo y por encima de las capas de refuerzo

CAPÍTULO IV. 4.1. VALIDACIÓN

Cabe destacar, que se obtuvo un mejor ajuste con los parámetros empleados en la *scanning curve* durante la representación del proceso de infiltración y desarrollo de la barrera capilar, permitiendo representar con mayor aproximación las condiciones existente durante el ensayo experimental. Dicho resultado, permite destacar el uso y eficiencia de las *scanning curve* en el estudio de fenómenos de infiltración bajo un enfoque hidro-mecánico.

Otro aspecto a mencionar, es la similitud en el comportamiento exhibido en los elementos de análisis localizados en la segunda capa de refuerzo (Figura 4.7a y 4.7c), representando con mayor claridad el incremento súbito de agua y su efecto en el abatimiento de la presión de poros, en comparación con lo presentado en la primera capa de refuerzo. No obstante, el tiempo requerido para la ruptura de la barrera capilar difiere levemente entre los sensores P4 y P5, los cuales están localizados en la misma altura del talud, separados en dirección horizontal. En la Figura 4.7c se observa que el decaimiento de la presión de poros en el sensor P5 inicia antes de los 3000 segundos, mientras que el flujo de agua a través del geotextil, y por ende la disminución de la presión de poros en P4 se presenta a los 5000 segundos (ver Figura 4.6), es decir, que la ruptura de la frontera hidráulica se genera en primer instancia en los elementos cercanos al contorno del talud, acorde al avance del frente húmedo, y la posterior acumulación de agua en dicha zona.

Dicho comportamiento, podría atribuirse al mecanismo de ruptura en la interfaz suelo-geotextil, el cual puede presentarse inicialmente de forma puntual en algún punto de la interfaz y expandirse alrededor de la misma, tal como se menciona en Albino [105]. Lo cual indica la variabilidad espacial durante la ruptura de la barrera capilar. Por ende, los análisis posteriores serán determinados en la segunda capa de refuerzo, específicamente en el elemento 405, con el fin de establecer un único elemento de comparación en el análisis de influencia.

4.2. Análisis de influencia

Las condiciones de frontera y la malla descrita en el capítulo de validación (Sección 4.1.2) son empleadas en el siguiente análisis. El elemento 405 (en la Figura 4.2 se observa la ubicación del elemento) es utilizado en la evaluación del desempeño de la barrera capilar bajo la interacción de distintos materiales, determinados a partir de las propiedades hidro-mecánicas y su influencia en el fenómeno.

El desempeño de la barrera capilar considera la distribución temporal de las variables respuesta (Grado de saturación y presión de poros) con respecto al flujo durante el proceso de infiltración. Específicamente, se basa en el instante en que se genera la ruptura de la barrera capilar, representado por el momento que ocurre el incremento súbito en el contenido de humedad y la posterior variación hasta alcanzar la condición de flujo estacionario.

El escenario de lluvia contempla el patrón de lluvia R1 para el análisis de infiltración de terraplenes recomendado por el *Japan Institute of Construction Engineering* [23]. De manera puntual, la intensidad de lluvia aplicada es de 10 mm/h durante 30 horas. El nivel freático está localizado inicialmente en la base del talud. A continuación, se presenta la descripción de los materiales empleados como base para el posterior análisis de influencia considerando la variación de las propiedades hidro-mecánicas, además se presentan los resultados en términos del grado de saturación bajo la interacción de estos materiales.

4.2.1. Material base

Con respecto a los materiales empleados, el suelo corresponde a una arcilla limosa (silty clay), llamado comercialmente DL clay conformado por caolinita y sílice. Oka et al. [108] evaluó experimentalmente el comportamiento del suelo (DL Clay) mediante ensayos de triaxial

CAPÍTULO IV. 4.2. ANÁLISIS DE INFLUENCIA

a compresión en condiciones parcialmente saturadas. Inicialmente, se realizaron ensayos de absorción previo al proceso de corte en condiciones drenadas. Igualmente, se realizaron ensayos de corte no-drenado llamado "*fully undrained condition*" al establecer valores constantes de contenido de agua y aire en el espécimen. En la Tabla 4.1 se establecen los parámetros definidos para el suelo como material viscoplástico, las cuales han sido empleadas en investigaciones desarrolladas con el modelo COMVI [57].

Cabe destacar, que la permeabilidad saturada (k_s^w) del suelo es modificada, con el propósito de establecer el escenario en donde toda el agua disponible debido a la lluvia se infiltre en el suelo. Esta condición de flujo es definida como frontera en la superficie; cuando el suelo se encuentra en condiciones parcialmente saturadas y la intensidad de lluvia es igual o menor que la mínima rata de infiltración asumida como la permeabilidad saturada (es decir, $s_{superficie} < s_{max}$ y $I \leq k_s^w$) [109]. Dicha frontera de flujo ha sido implementada en el estudio del proceso de infiltración en taludes bajo condiciones parcialmente saturadas [78], [110]. Para la presente investigación, la permeabilidad saturada es equivalente a la intensidad de lluvia ($I/k_s^w = 1,0$). En relación con los parámetros del material de refuerzo se utilizaron los resultados de los ensayos realizados por Garcia [3], excepto el valor de la permitividad, el cual corresponde a las propiedades de un geotextil no tejido de uso común en Colombia. Para este propósito se utilizó como fuente el catálogo de productos PAVCO (Geotextil NT 3000) (ver Tabla 4.2).

Tabla 4.1: Parametros hidro-mecánicos del suelo (DL clay)

Parámetro del material	Símbolo	Valor
Parámetro viscoplástico	m'	23.0
Parámetro viscoplástico (1/s)	C_1	$1,3x10^{-11}$
Parámetro viscoplástico (1/s)	C_2	$2,3x10^{-11}$
Relación de esfuerzos en estado crítico	M_m^*	1.01
Parámetro del método de la línea tangente rígida	θ	0.5
Índice de compresión	λ	0.144
Índice de expansión	κ	0.0186
Módulo de rigidez elástico (kPa)	G_0	20000
Relación de vacíos inicial	e_0	1.03
Esfuerzo de consolidación en campo (kPa)	σ'_{mbi}	216.0
Esfuerzo vertical inicial (kPa)	σ'_{m0}	216.0
Parámetro estructural	β	0.0
Parámetro estructural	σ'_{maf}	216.0
Permeabilidad saturada vertical (m/s)	k_{sv}^W	$2,8x10^{-6}$
Permeabilidad saturada horizontal (m/s)	k_{sh}^W	$2,8x10^{-6}$
Permeabilidad del gas en condiciones secas (m/s)	k_s^G	$1,0x10^{-3}$
Parámetro de van Genuchten (1/kPa)	α	0.13
Parámetro de van Genuchten	n	1.65
Parámetro de succión	S_i	0.2
Parámetro de succión	S_d	5.0
Saturación máxima	S_{max}	0.99
Saturación mínima	S_{min}	0.0
Parámetro de forma de la función de permeabilidad	a	1.0
Parámetro de forma de la función de permeabilidad	b	1.0
Succión inicial (kPa)	ψ_i	50

Tabla 4.2: Parámetros básicos del Geosintético (NT)

Parámetro del material	Símbolo	Valor
Tipo de Geosintético	NT	No Tejido
Masa por unidad (g/m^2)	μ_A	400
Espesor (mm)	t_{GTX}	4
Relación de vacíos inicial	e_0	8.10
Parámetro de van Genuchten (1/kPa)	α	5.00
Parámetro de van Genuchten	n	7.00
Saturación máxima	S_{max}	0.88
Saturación mínima	S_{min}	0.012
Permitividad (s^{-1})	θ	2
Permeabilidad saturada (m/s)	k_v^W	$8,0 \times 10^{-3}$
Parámetro de forma de la función de permeabilidad	a	5.0
Parámetro de forma de la función de permeabilidad	b	1.0
Succión inicial (kPa)	ψ_i	50

La Figura 4.8 presenta la distribución del grado de saturación a través del talud reforzado sujeto a lluvia de infiltración constante durante 30 horas. Inicialmente, en $t=2$ h se observa el aumento de humedad en los elementos de contorno y el avance progresivo del frente húmedo hacia las capas de refuerzo. Posteriormente, en $t=10$ h se observa la acumulación de agua por encima de la segunda capa de refuerzo como evidencia de la presencia del fenómeno de barrera capilar en la interfaz suelo-geotextil, además del avance en la saturación producto del flujo lateral en medio de las capas de refuerzo ($t=12$ h). Los elementos localizados por encima del geotextil alcanzan valores de saturación entre 0.8-0.9, siendo la zona que presentan los mayores valores al igual que los elementos ubicados en la parte inferior del talud. Mientras que, los niveles de saturación por debajo del geotextil son alrededor de 0.5 a 0.6. Dicha acumulación se conserva hasta el tiempo $t=12.6$ h cuando se genera la ruptura de la barrera capilar alrededor de la segunda capa de refuerzo. Posteriormente, se observa el flujo por la capa de refuerzo inferior cercano a las 14 de horas de lluvia. Finalmente, transcurrido de 30 horas de simulación se alcanzan niveles cercanos a la saturación completa en toda la estructura gobernado principalmente

CAPÍTULO IV. 4.2. ANÁLISIS DE INFLUENCIA

por el flujo gravitacional.

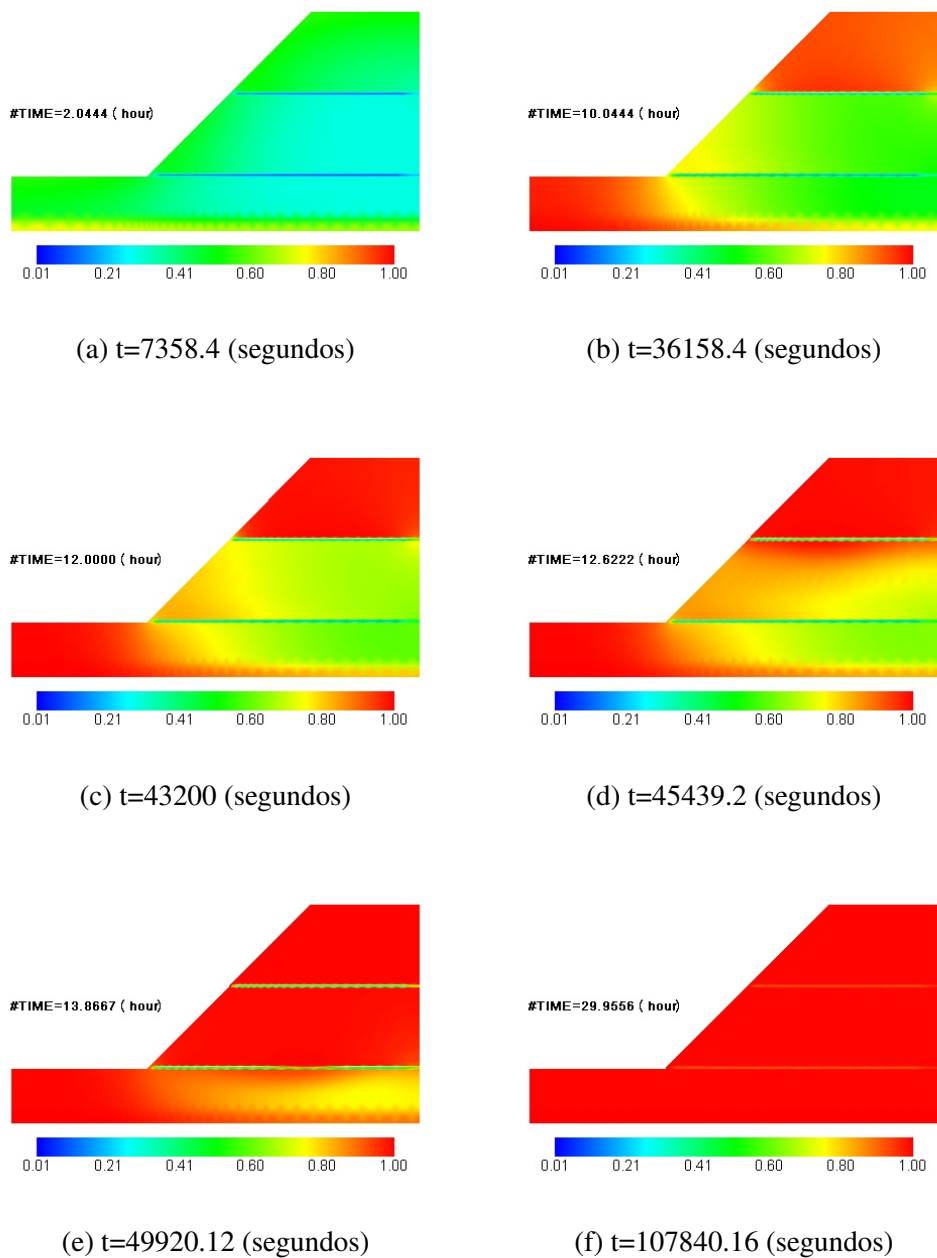


Figura 4.8: Distribución del grado de saturación en talud reforzado con geotextil no tejido

CAPÍTULO IV. 4.2. ANÁLISIS DE INFLUENCIA

La anterior distribución espacial y temporal del grado de saturación es consistente con el desarrollo de las presiones de poros en la interfaz suelo-geotextil. En la Figura 4.9 se presenta la distribución temporal de la presión de poros en elementos de análisis asignados al geotextil y al suelo ubicado por encima y por debajo de la segunda capa de refuerzo del talud (ver Figura 4.2). La mayor tasa de crecimiento de la presión de poros durante el proceso de infiltración se genera en el elemento 412 (ubicado por encima del geotextil) producto de la acumulación de agua en la capa de refuerzo, como se puede ver en la Figura 4.9a.

El incremento de la presión de poros en el geotextil se acelera cuando el elemento 412 alcanza altos niveles de saturación (Figura 4.8c). En la Figura 4.9b se detalla la distribución de la presión de poros en el intervalo de tiempo cuando se generan cambios súbitos en el geotextil, y por consiguiente en el elemento 405 (ubicado por debajo del geotextil) como efecto de las condiciones de humedad justamente por encima de la capa de refuerzo. El inicio de estos cambios se presentan en $t=12$ h tanto para el geotextil como para el suelo por debajo, desarrollando un mayor gradiente de crecimiento en relación con los cambios en las primeras horas de simulación. Posteriormente, se logra alcanzar las condiciones necesarias para la ruptura efectiva de la barrera capilar correspondiente a niveles de presión de poros cercanos a cero, tal como se puede observar en la Figura 4.9b a través de la línea trazada horizontalmente en el punto de inflexión observado en el comportamiento del elemento 405. Estas condiciones se generan en $t=12.6$ horas (Figura 4.8d) permitiendo el flujo gravitacional a través de la capa de refuerzo y descenso a elementos inferiores, hasta desarrollar condiciones de flujo en estado estacionario en la interfaz suelo-geotextil dado por el gradiente de flujo constante posterior a la ruptura (Figura 4.8e).

Las etapas descritas anteriormente consideran la presencia, desarrollo y desempeño de la barrera capilar, respectivamente. Siendo el intervalo de tiempo donde se generan estas condiciones el rango considerado en el siguiente análisis de influencia.

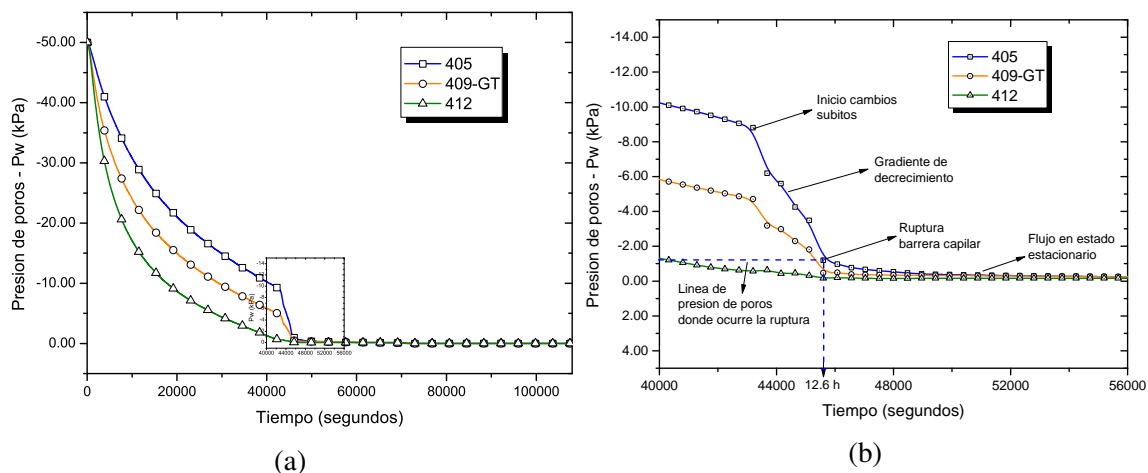


Figura 4.9: Distribución de presión de poros para el geotextil (409) y elementos de suelo ubicados por encima (412) y por debajo (405) de la segunda capa de refuerzo: (a) Durante todo el tiempo de simulación; (b) Intervalo de tiempo correspondiente a la ruptura de la barrera capilar.

4.2.2. Análisis paramétrico

El análisis paramétrico considera la influencia de las propiedades mecánicas e hidráulicas en el proceso de infiltración y en el mecanismo de barrera capilar mediante un modelo acoplado de infiltración-deformación (COMVI). En la Tabla 4.3 se presenta los parámetros hidro-mecánicos y sus correspondientes valores asignados al suelo y/o geotextil, los cuales corresponden al diseño factorial empleado. La respuesta transitoria de la presión de poros y grado de saturación considera unicamente el efecto individual de cada parámetro a partir de sus niveles, con énfasis en el intervalo de tiempo donde se presenta la ruptura de la barrera capilar en el elemento 405, representando por el inicio de los cambios y el gradiente generado en las variables respuesta hasta alcanzar las condiciones necesarias para generar la ruptura del fenómeno.

CAPÍTULO IV. 4.2. ANÁLISIS DE INFLUENCIA

Tabla 4.3: Diseño factorial con sus respectivos niveles

Niveles	Componente mecánico				Componente hidráulico			
	e_0	$OCR = \sigma'_{mbi}/(\sigma'_{mo})$	G_0 (kPa)	λ	$k_r = k_h^w/k_v^w$ (m/s)	ψ_i (kPa)	n	α (1/kPa)
1 ^a	1.03							
2	1.1							
3	1.2	1	20000	0.144	1	50	7	5
4	1.3							
1		1						
2	1.03	2	20000	0.144	1	50	7	5
3		5.9						
1			20000					
2			13000					
3	1.03	1	22500	0.144	1	50	7	5
4			36100					
1				0.144				
2				0.09				
3	1.03	1	20000	0.144	1	50	7	5
4				0.11				
1				0.125				
2					1			
3	1.03	1	20000	0.144	10	50	7	5
4					50			
1 ^b					100			
2						50		
3	1.03	1	20000	0.144	1	30	7	5
4						40		
1 ^c						100		
2							7	
3	1.03	1	20000	0.144	1	50	4.37	5
4							5.25	
1							5.73	
2								5
3	1.03	1	20000	0.144	1	50	7	8.46
4								9.07
								11.21

^aValor empleado en el suelo como material base

^bValor empleado para ambos materiales base

^cValor empleado en el geotextil como material base

Componente mecánico

Los parámetros mecánicos y sus respectivos valores fueron seleccionados a partir de investigaciones abordadas bajo un enfoque hidromecánico, en los cuales se haya determinado la influencia de las propiedades mecánicas en el comportamiento hidráulico. Igualmente, se consideró variables que han sido evaluadas con el uso del modelo COMVI. A continuación, se

describe las variaciones por cada parámetro mecánico asignado al material suelo.

Relación de vacíos- e_0

La Figuras 4.10 y 4.11 muestran la distribución temporal del grado de saturación y la presión de poros con distintos valores de relación de vacíos inicial (i.e $e_0=1.03$, 1.1, 1.2 y 1.3), respectivamente. Los valores de e_0 fueron los empleados por Zhou et al. [111]. Con el propósito de evaluar el comportamiento hidro-mecánico de suelos compactados con diferentes densidades iniciales (definidas a partir de e_0) mediante el modelo UH [112]. El rango de valores representa muestras de suelo hipotéticamente compactadas considerando la intensidad y magnitud del proceso, desde muestras ligeramente compactadas ($e_0=1.3$) hasta muestras altamente compactadas ($e_0=1.0$).

A partir de la Figura 4.10 se logra identificar la ruptura de la barrera capilar dado por el incremento súbito de la saturación, iniciando en valores de $S_r=0.72$ aproximadamente para todos los valores de e_0 . De igual manera, en la Figura 4.11 se observa que el incremento de la presión de poros para todos los escenarios inicia alrededor de $P_w=-8.80$ kPa como efecto del aumento en las condiciones de humedad. No obstante, el tiempo de inicio y generación de la ruptura difiere según la relación de vacíos inicial establecida, mostrando que el menor tiempo se obtiene en $e_0=1.03$ (Material base-MB), y a medida que e_0 aumenta la permanencia de la frontera hidráulica se prolonga por mayor tiempo. Siendo $e_0=1.3$ el escenario donde la barrera capilar es efectiva durante 51800 segundos de simulación. La diferencia observada entre los valores extremos de e_0 (1.03 y 1.3) cuando se genera la ruptura es aproximadamente de 1.7 horas ($\Delta t = 6200s$).

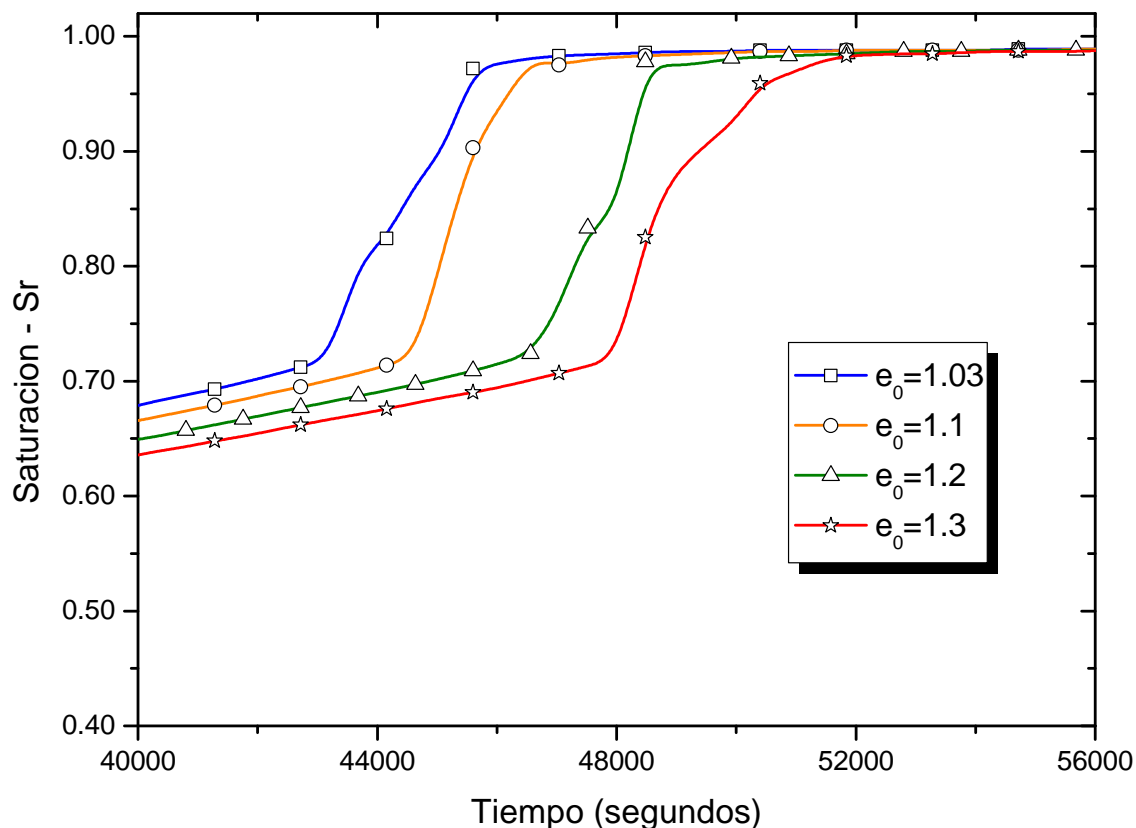


Figura 4.10: Distribución temporal del grado de saturación (Sr) para el elemento 405 bajo los distintos niveles de e_0 .

En cuanto a la distribución de la humedad y la consecuente reducción de la presión hasta llegar a valores cercanos a cero. El comportamiento en el gradiente de saturación presenta diferencias a medida que e_0 es mayor, observando similitudes entre los niveles mas bajos de e_0 (1.03 y 1.1), al igual que $e_0=1.2$ y $e_0=1.3$. Dicha agrupación es definida con base a la diferencia observada entre los valores 1.1 y 1.2 en términos de la distribución de la saturación y presión de poros hasta llegar a las condiciones de saturación completa.

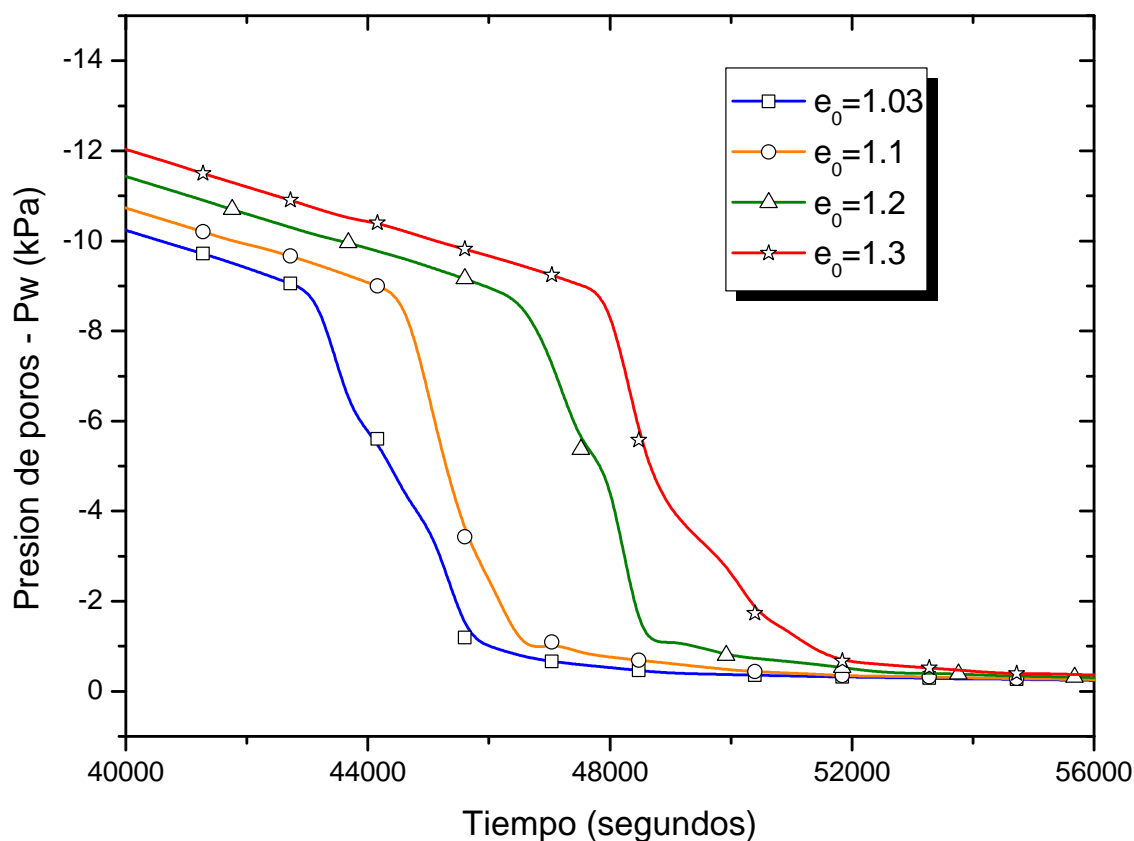


Figura 4.11: Distribución temporal de la presión de poros (P_w) para el elemento 405 bajo los distintos niveles de e_0 .

Se infiere que el proceso de compactación podría jugar un papel importante en el desempeño de la barrera capilar, con base en la prolongación de la frontera hidráulica en la interfaz suelo-geotextil, en especial para procesos de compactación intensos correspondientes a valores de e_0 cercanos a 1 o inferiores. McCartney et al. [113] indican que la densidad del suelo puede afectar el comportamiento de la barrera capilar, al encontrar que las arcillas poco compactadas alcanzan una menor succión de ruptura en comparación con arcillas altamente compactadas, tal como lo menciona Zornberg [114]. A partir de la distribución de la presión de poros desarrollados en los distintos niveles de e_0 se logra identificar un comportamiento similar al descrito por McCartney et al. [113]. En la Tabla 4.4 se indica el tiempo y el valor de presión de poros en el momento de

CAPÍTULO IV. 4.2. ANÁLISIS DE INFLUENCIA

la ruptura, observando que el valor de la presión de poros disminuye a medida que la relación de vacíos aumenta, esta tendencia se conserva para todos los niveles e_0 . Por lo tanto, se logra concluir y complementar la influencia del proceso de compactación en el desempeño de la barrera capilar mediante las variaciones en la relación de vacíos inicial del suelo. Al considerar que el proceso de compactación puede generar condiciones heterogéneas, afectando la relación de vacíos del suelo circundante a las capas de refuerzo [105].

Tabla 4.4: Tiempo y succión de ruptura en los distintos niveles de e_0 .

Nivel	Succión (kPa)	Tiempo(s)
1.03	-1.189	45600
1.1	-0.839	47500
1.2	-0.795	49900
1.3	-0.668	51800

Relación de sobreconsolidación-OCR

La evaluación de la relación de sobreconsolidación (OCR) considera los valores empleados por Kimoto y Oka [82]. El estudio muestra la aplicación del modelo COMVI teniendo en cuenta cambios estructurales y el análisis de consolidación aplicado en suelos arcillosos de Osaka, Japón. La implementación del modelo consistió en representar ensayos triaxiales a compresión en condiciones no drenadas, considerando un esfuerzo de preconsolidación de 580kPa (*consolidation yield stress - σ_{mbi}*), y relaciones de sobreconsolidación (*Overconsolidation ratio-OCR*) de 1, 2 y 5.9.

En general, las condiciones donde se presenta el inicio de los cambios en la humedad y el momento de ruptura es el mismo para arcillas normalmente consolidadas (OCR=1) y arcillas sobreconsolidadas (OCR>1). En la Figura 4.13 se observa que el tiempo de ruptura de la barrera capilar es de 45600 segundos para todas las relaciones de sobreconsolidación.

CAPÍTULO IV. 4.2. ANÁLISIS DE INFLUENCIA

En términos del comportamiento en el gradiente de saturación; se logra identificar diferencias después de alcanzar valores de saturación cercanos a 0.80 (Figura 4.12). Para el suelo normalmente consolidado el incremento de la saturación se presenta de forma progresiva hasta lograr condiciones de saturación completa, mientras que para los suelos sobreconsolidados el gradiente de saturación es más alto. En el caso de $OCR=2.0$ se presenta valores de saturación mayores en comparación con los presentados por el suelo normalmente consolidado durante el intervalo de tiempo comprendido entre 43700s y la ruptura de la barrera (45600 s). De igual manera, $OCR=5.9$ presenta mayor contenido de humedad que lo observado por OCR de 1 y 2.0 en el mismo intervalo de tiempo. Conforme a lo anterior, se podría interpretar que la relación de sobreconsolidación (OCR) influye en la tasa de infiltración a través de la interfaz suelo-geotextil, generando un incremento de saturación de forma súbita a medida que el nivel de sobreconsolidación aumenta, sin embargo no se observa diferencias en las condiciones de ruptura de la barrera capilar.

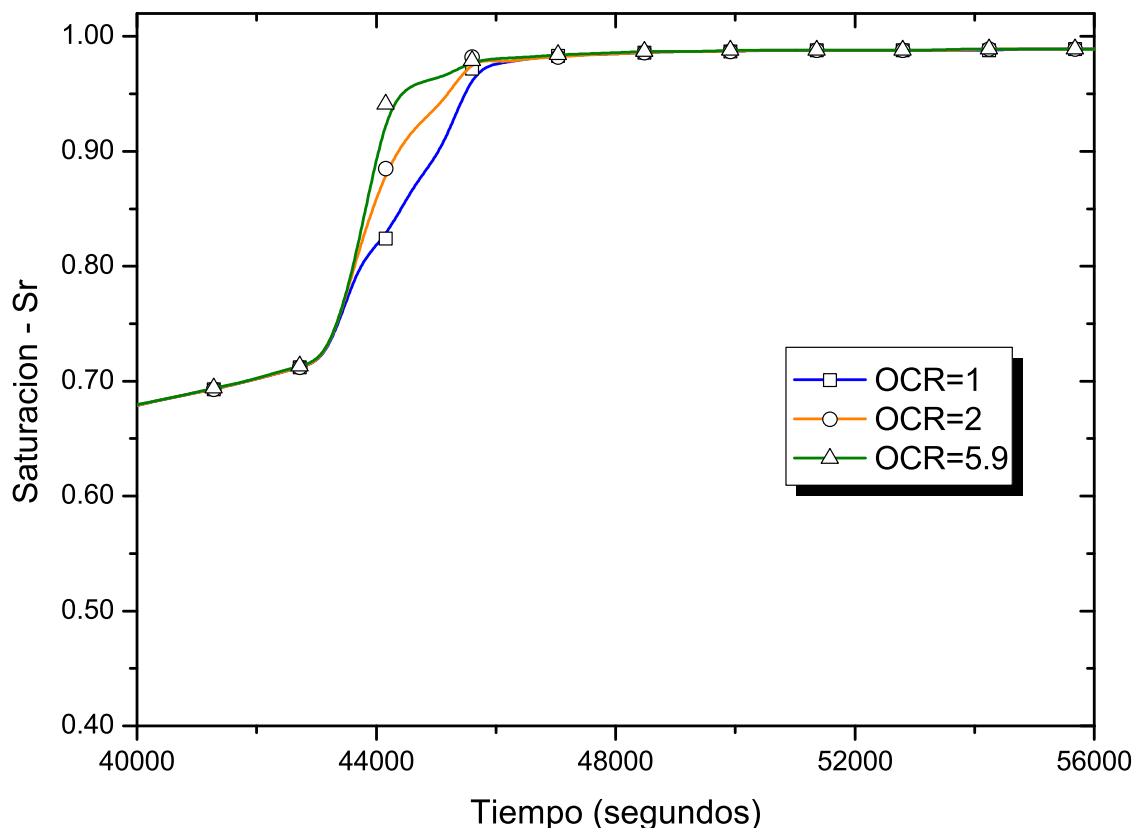


Figura 4.12: Distribución temporal del grado de saturación (S_r) para el elemento 405 bajo los distintos niveles de OCR .

Existen resultados experimentales sobre la respuesta hidro-mecánica de suelos en estado sobreconsolidado y normalmente consolidado. Tal como el estudio desarrollado por Wu [115] mediante ensayos triaxiales no drenados. Wu [115] describe las diferencias presentadas en términos del volumen de agua descargada y cambios volumétricos con diferentes OCR durante el proceso de secado. Observando que a medida que el OCR es mayor; el volumen de agua drenada aumenta. Además concluye que el cambio en la saturación está altamente relacionado con el cambio de volumen (dilatación), el cual es más significativo a medida que aumenta el OCR. Esto podría estar relacionado con el rápido incremento en las condiciones de humedad presentando en las relaciones de sobreconsolidación mayores a 1.

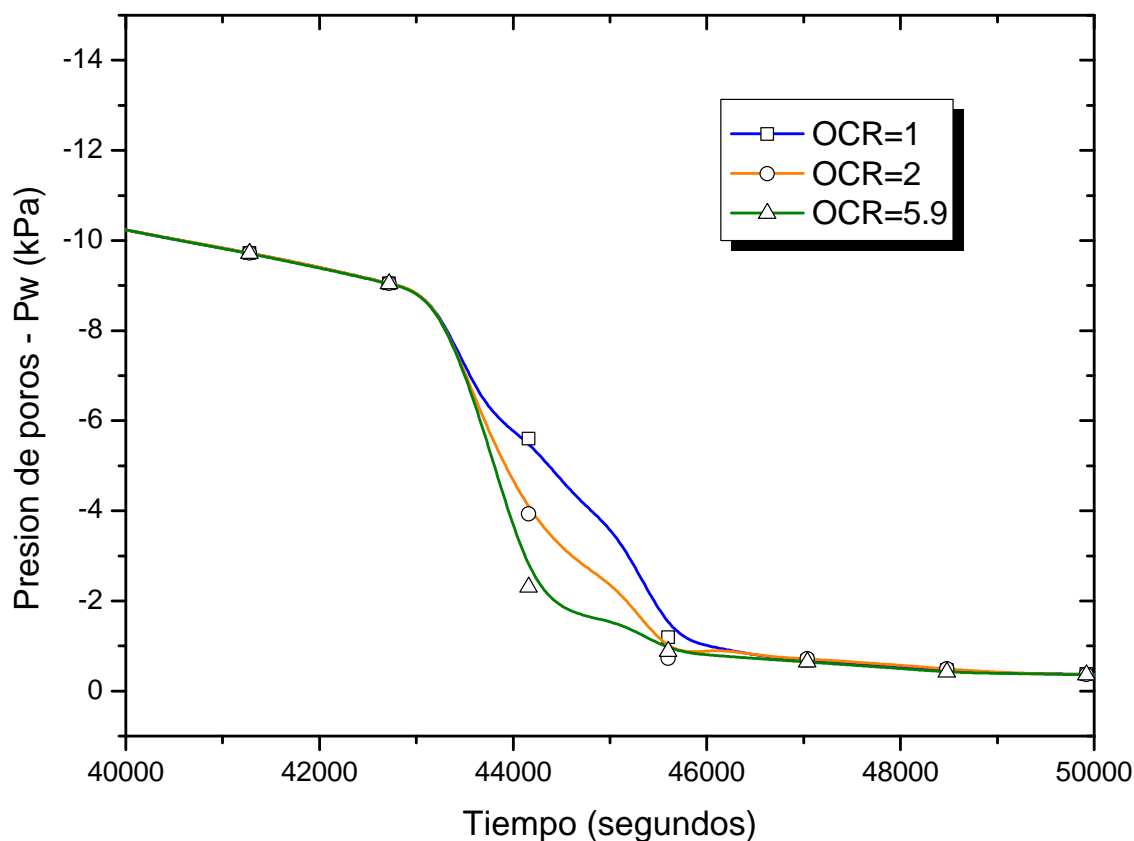


Figura 4.13: Distribución temporal de la presión de poros (P_w) para el elemento 405 bajo los distintos niveles de OCR .

Igualmente, varios autores han resaltado la influencia del estado e historial de esfuerzos en la determinación de la curva de retención de agua [34], [35], [116]. Sin embargo, las características de las investigaciones mencionadas no corresponden a las condiciones del proceso de infiltración y el fenómeno hidráulico estudiado. Razón por la cual, se requiere ampliar el rango de valores de OCR que permita robustecer y afianzar la tendencia e influencia observada en el desarrollo de la barrera capilar.

Modulo de rigidez elástico - G_0

Los niveles de G_0 al igual que OCR son derivados de la implementación del modelo COMVI en la investigación realizada por Kimoto y Oka [82]. Los valores de rigidez son afectados por las condiciones y grado de compactación durante la construcción de estructuras de suelo [117]. De forma puntual, Yokohama [118] determina que el modulo de rigidez G_0 aumenta con el grado de compactación, es decir, un material con bajo grado de compactación desarrolla un valor de G_0 menor. Es por esto, que la respuesta del grado de saturación y presión de poros a través de los distintos valores de rigidez busca representar la influencia del grado de compactación en el desarrollo del fenómeno.

La variación de la saturación y presión de poros ocasionada por el proceso de infiltración es presentada en las Figuras 4.14 y 4.15 mediante los valores de rigidez del suelo ($G_0=13000$, 20000 , 22500 y 36100 kPa). A partir de la Figura 4.14 se detecta que los mayores cambios en el grado de saturación se obtienen con $G_0=13000$ kPa, contrastante con el incremento progresivo en la saturación para $G_0=36100$ kPa. Respecto a los valores intermedios dados por los valores de $G_0=20000$ y 22500 kPa; las variables respuesta (saturación y presión de poros) se comportan de forma similar, sin embargo en $G_0=22500$ kPa se observa una mayor fluctuación en comparación con el valor inicial definido en el material base ($G_0=20000$ kPa).

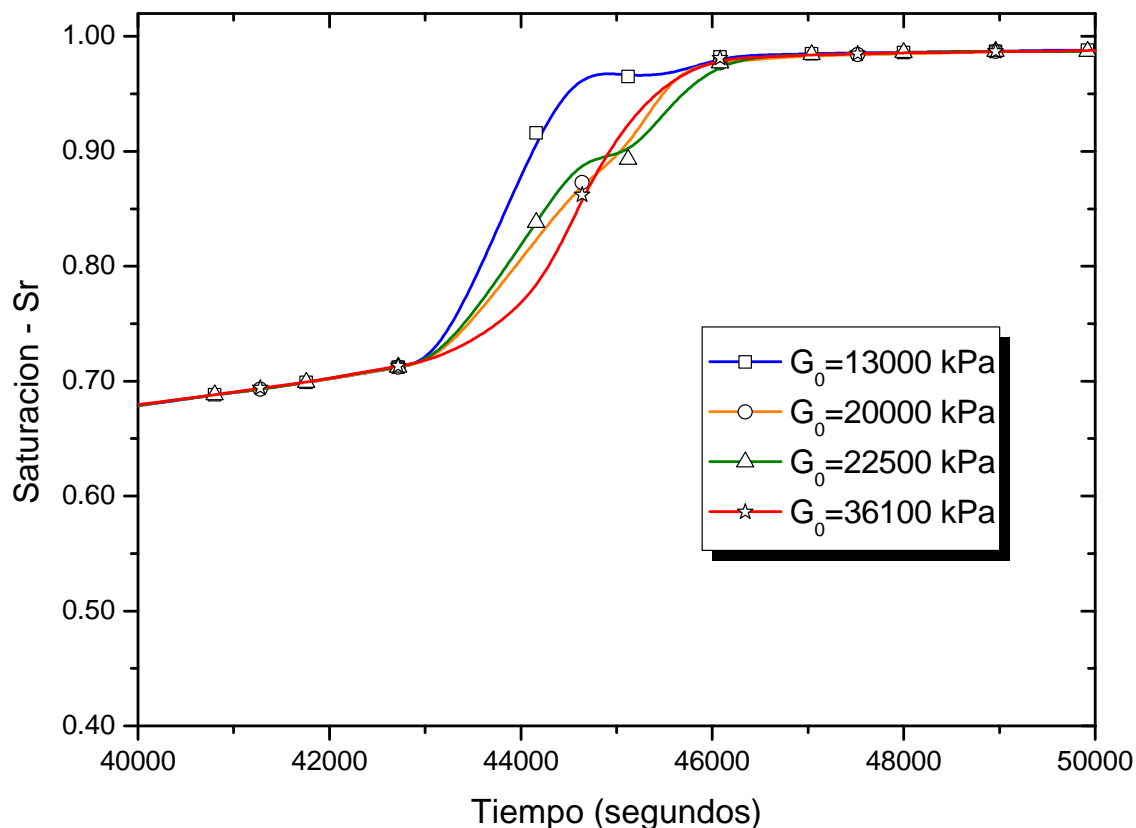


Figura 4.14: Distribución temporal del grado de saturación (Sr) para el elemento 405 bajo los distintos niveles de G_0 .

Los resultados indican que la reducción en el grado de compactación (dado por el valor G_0) genera un mayor gradiente de saturación antes de lograr la ruptura. Lo que podría indicar el descenso del flujo con mayor rapidez en un material con menor grado de compactación. La tendencia anterior es acorde a lo esperado, al considerar que el aumento en el grado de compactación genera una reducción en las condiciones de permeabilidad [118]. Y por lo tanto, en materiales con mayor grado de compactación el proceso de crecimiento de la presión de poros se genera lentamente en relación con lo observado cuando se reduce la rigidez del material (Figura 4.15).

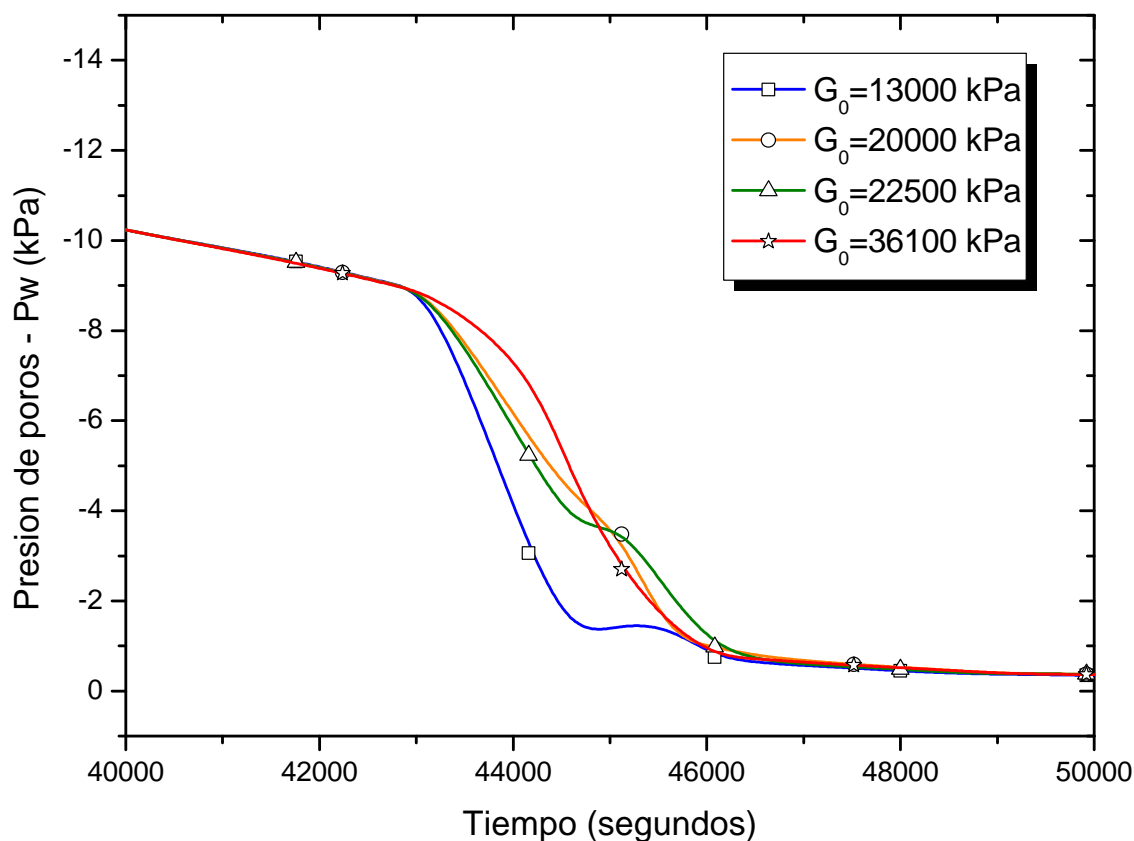


Figura 4.15: Distribución temporal de la presión de poros (P_w) para el elemento 405 bajo los distintos niveles de G_0 .

Por otro lado, la reducción en los valores de rigidez pueden incrementar las deformaciones y cambios volumétricos en la estructura, tal como lo reporta Kimoto [79]. El desarrollo de deformaciones genera cambios en la respuesta hidromecánica en el material, en términos de la reducción en la relación de vacíos, y por consiguiente un incremento en el grado de saturación, tal respuesta ha sido constatada experimentalmente por Zakaria [119] y Sivakumar [120], estas investigaciones fueron empleadas por Gallipoli [121] para la re-formulación del grado de saturación considerando el volumen específico en suelos deformables. En consecuencia, el incremento de saturación presentado por los módulos de rigidez también podría estar relacionado por la variación en la respuesta hidromecánica durante el proceso de infiltración.

Indice de compresión - λ

Los valores seleccionados para el índice de compresión ($\lambda = 0.09, 0.1$ y 0.125) fueron utilizados por Gholizadeh y Latifi para evaluar la respuesta hidro-mecánica y el desempeño del modelo propuesto en [122]. Estos valores fueron reportados experimentalmente en [123], [124] y [120].

A partir de las Figuras 4.16 y 4.17 se identifica que las principales diferencias son concernientes al gradiente en las variables durante incremento de la humedad hasta alcanzar la condición de flujo estacionario, al igual que lo reflejado por los factores de OCR y G_0 . La Figura 4.16 ilustra la relación entre el índice de compresión del suelo y la saturación, a su vez la Figura 4.17 presenta las variaciones en la presión de poros. Estas Figuras muestran que la respuesta hidráulica incrementa cuando se reduce el índice de compresión. Siendo el nivel de $\lambda = 0.09$ la mayor respuesta en términos del incremento en la saturación, y la consecuente reducción en la presión de poros. Mientras tanto, para $\lambda = 0.125$ y 0.144 se observa un comportamiento similar en ambos niveles, dado por un gradiente menor en el grado de saturación y presión de poros. Cabe destacar, que se observa una mayor diferencia entre los niveles de λ en términos de presión de poros.

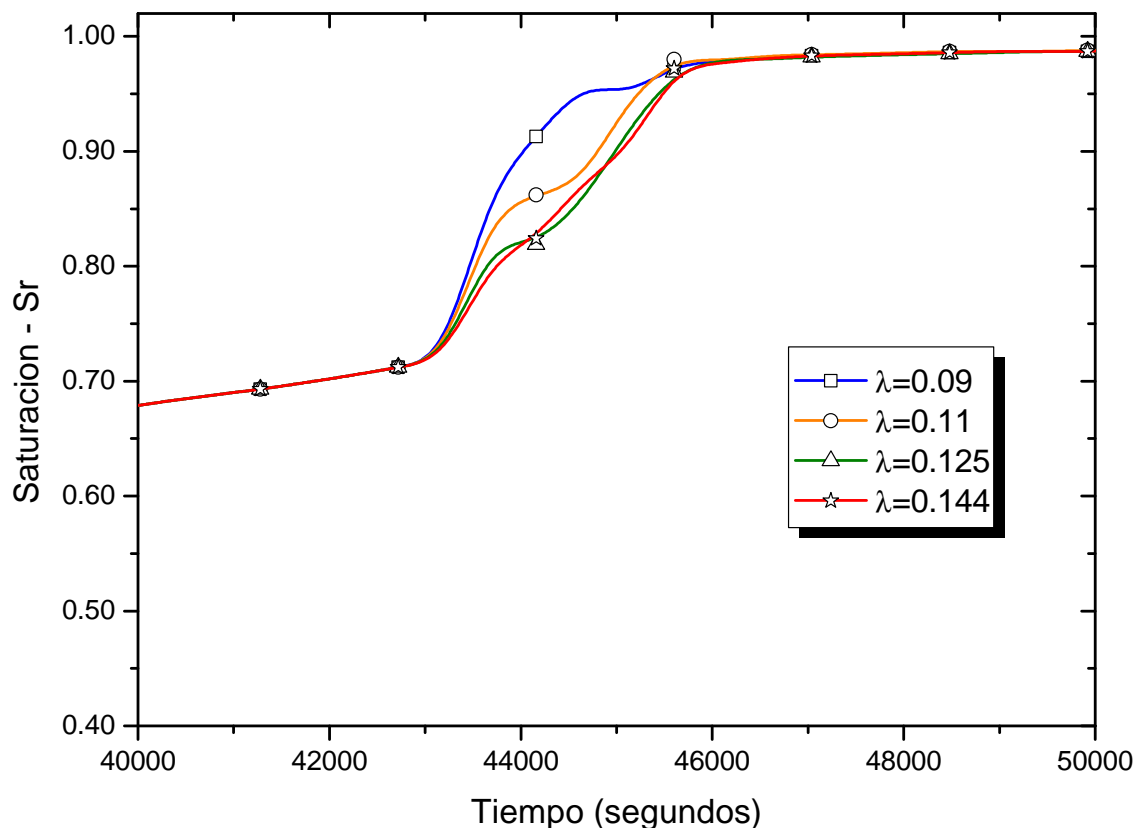


Figura 4.16: Distribución temporal del grado de saturación (S_r) para el elemento 405 bajo los distintos niveles de λ .

El valor del índice de compresión puede estar atribuido al contenido de finos que contenga el material de relleno. Tal como lo demuestra Yeo et al. [125], encontrando una relación lineal entre el contenido de finos y el índice de compresión para rellenos con suelos compuestos de arcilla y arena. De ahí que la permeabilidad del suelo pueda reducirse por el incremento en el contenido de finos dado por los valores de λ . El incremento en el contenido de finos y por ende en el índice de compresión; también genera reducción en la permeabilidad no saturada del suelo [126]. Según Aldaood [126] este comportamiento es por causa de la reducción en la porosidad y el refinamiento de la estructura del suelo al incrementar el contenido de finos, resultando que el efecto es más evidente en bajos niveles de succión, condición característica

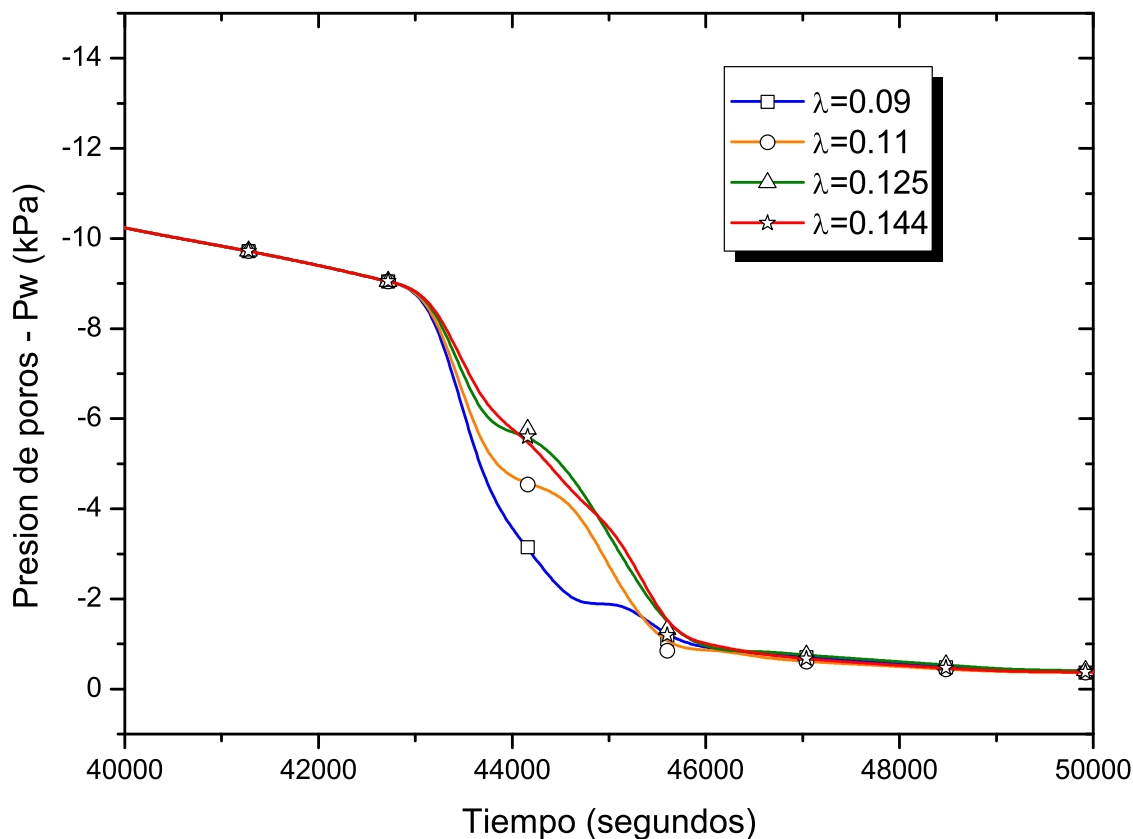


Figura 4.17: Distribución temporal de la presión de poros (P_w) para el elemento 405 bajo los distintos niveles de λ .

en el comportamiento hidráulico descrito por el suelo ubicado por debajo del geotextil ante la inminente ruptura de la barrera, producto del descenso del agua acumulada en la capa de refuerzo. Por lo tanto, la influencia del índice de compresión en el desempeño y efectividad de la barrera capilar podría estar relacionado con la gradación y contenido de finos que se tenga en el material de relleno a emplear, consistente con lo planteado por Tami [127].

Con base en la relación entre el índice de compresión y el grado de saturación; algunos autores resaltan la necesidad de considerar las variaciones en la compresibilidad debido a los esfuerzos y la succión, los cuales presentan diferencias según el grado de saturación, particularmente en suelos compactados [128], [129] y [32].

Componente hidráulico

La selección de las propiedades hidráulicas corresponden a los parámetros que controlan la selección de los materiales a emplear para obtener un desempeño apropiado de la barrera capilar.

Relación de anisotropía - k_r

El efecto de la anisotropía en la conductividad hidráulica es establecida como la relación entre los coeficientes de permeabilidad saturada del suelo en dirección vertical y horizontal ($k_r = k_h^W / k_v^W$). Las cargas de compactación generan que el flujo paralelo sea mayor en comparación con el flujo vertical, a causa de las imperfecciones en la interfaz entre las capas o la orientación de partículas [130], [131]. Por tal razón, la anisotropía de la permeabilidad se establece con el incremento de k_h^w mientras k_v^W permanece constante, los niveles se ajustan a la evaluación del efecto de la anisotropía en la conductividad hidráulica en la estabilidad de taludes bajo un enfoque acoplado realizado por Yeh y Tsai [132]. Las relaciones de anisotropía corresponden a $k_r=1, 10, 50$ y 100 , en las Figuras 4.18 y 4.19 se muestra la respuesta hidráulica del elemento de análisis considerando los diferentes valores de permeabilidad en dirección horizontal.

Cuando se considera la anisotropía en la permeabilidad ($k_r > 1$) se observa que el incremento del flujo difiere del comportamiento súbito presentado por $k_r=1$ en donde las variables de flujo son gobernadas principalmente por el gradiente de infiltración vertical. A partir de la Figura 4.18 se observa que cuando k_h^W es mayor que k_v^W ; el flujo a través del elemento ubicado por debajo del refuerzo se genera de forma lineal hasta alcanzar condiciones de flujo estacionario. En estos escenarios ($k_r=10, 50$ y 100) no se identifica el momento de ruptura, de ahí que los niveles de saturación completa se alcanzaron en un tiempo mayor ($t=60000s$ aproximadamente) en comparación con las condiciones exhibidas en $k_r=1$ al superar la frontera hidráulica,

CAPÍTULO IV. 4.2. ANÁLISIS DE INFLUENCIA

desencadenando el flujo del agua acumulada en la zona de refuerzo, y por ende un acelerado incremento en las condiciones de humedad.

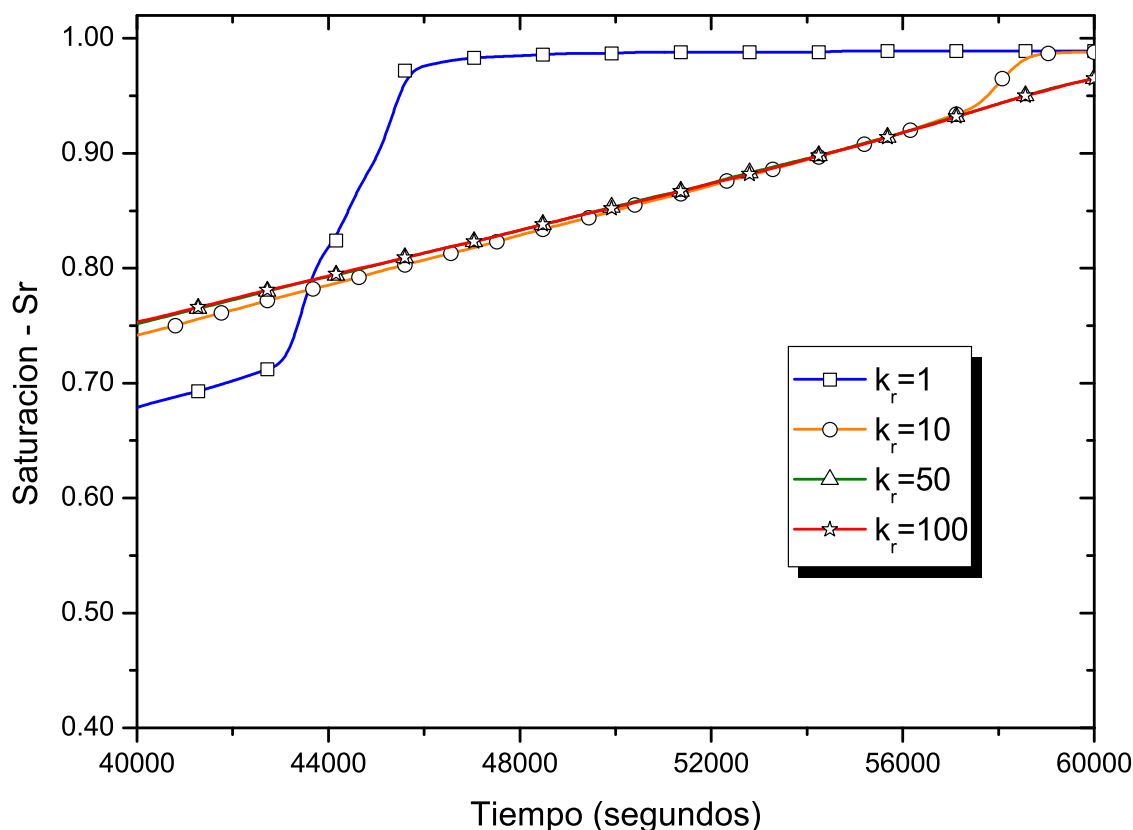


Figura 4.18: Distribución temporal del grado de saturación (S_r) para el elemento 405 bajo los distintos niveles de k_r .

El anterior comportamiento es atribuido a la reducción en la tasa de infiltración vertical a causa de la anisotropía en la permeabilidad, que a su vez tiende a infiltrar el agua lluvia en dirección horizontal [133], [134]. Por tal razón, es posible inferir que el incremento en k_r genera unas condiciones de humedad casi uniformes en el suelo ubicado en medio de las capas de refuerzo, producto del agua que ingresa por la pendiente del talud, y la posterior distribución del flujo en dirección lateral preferente. Por lo cual el análisis del flujo dado por el mecanismo de la barrera capilar se restringe y presenta limitaciones cuando existen condiciones de anisotropía

CAPÍTULO IV. 4.2. ANÁLISIS DE INFLUENCIA

en el material de relleno.

Por otra parte, en las Figuras 4.18 y 4.19 se observa un comportamiento similar para los valores de $k_r=10, 50$ y 100 , presentando diferencias leves antes de alcanzar la saturación completa para la relación de 10 en comparación con k_r de 50 y 100 . Lo anterior es acorde al resultado presentado por Yeh y Tsai [132] en suelos limosos y arcillosos, al observar que el incremento en la anisotropía no afecta la saturación y la estabilidad del suelo para materiales con valores de permeabilidad saturada muy bajos, concluyendo que el flujo de infiltración es menos sensible a los cambios en la anisotropía de la permeabilidad para materiales con bajos valores de permeabilidad saturada. De manera que la influencia sobre el incremento de la anisotropía en el proceso de infiltración y la barrera capilar debe contemplar materiales con valores de conductividad mayores.

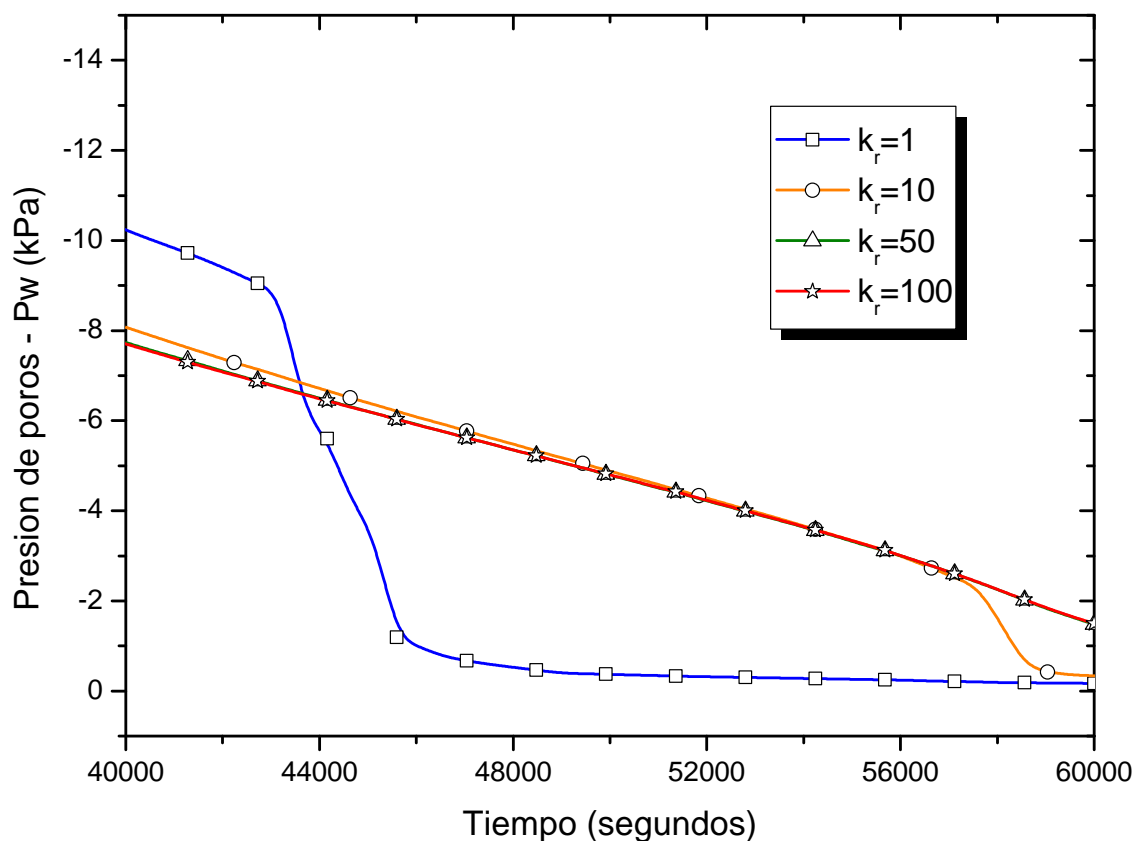


Figura 4.19: Distribución temporal de la presión de poros (P_w) para el elemento 405 bajo los distintos niveles de k_r .

Succión inicial - ψ_i

El efecto de las condiciones iniciales en el desempeño de la barrera capilar se realizó con cuatro valores de succión inicial de 30, 40, 50 y 100 kPa, respectivamente. Los valores son implementados en ambos materiales (suelo y geotextil), estos escenarios corresponden a las condiciones iniciales empleadas en el material base (DL clay) sometido a procesos de secado y humedecimiento (*Drainage/water absorption process*) durante la evaluación experimental realizada por Oka et al. [108].

La distribución temporal en el grado de saturación y la presión de poros sujeta a las condi-

CAPÍTULO IV. 4.2. ANÁLISIS DE INFLUENCIA

ciones iniciales son presentadas en la Figuras 4.20 y 4.21, respectivamente. La variación en la succión inicial (ψ_i) modifica las condiciones de humedad iniciales obtenidas a partir de la curva de retención, los valores de saturación inicial corresponden a 0.39, 0.33, 0.28 y 0.18 para los niveles de $\psi_i=30, 40, 50$ y 100 kPa, respectivamente.

Igualmente, las condiciones iniciales afectan el desempeño de la barrera capilar en términos del tiempo que permanece la frontera hidráulica en la interfaz. El escenario de mayor permanencia corresponde a la condición mas seca ($\psi_i=100$ kPa), en la Figura 4.20 se observa que la efectividad de la barrera se reduce a medida que la succión inicial establecida es menor. La diferencia en el tiempo de ruptura de la barrera para los valores extremos de succión inicial (30 y 100 kPa) es de 3.8 horas aproximadamente (Figura 4.21). El desempeño de la barrera capilar y la influencia observada por las condiciones iniciales es coherente con el análisis de la barrera capilar presentado por Tami et al. [71], en el cual se evalúa la capacidad de la barrera capilar bajo condiciones húmedas o secas según el nivel de succión inicial. Los resultados indican que la efectividad de la barrera capilar es menor para la condición húmeda, esta condición es definida por niveles de succión bajos generando un movimiento de infiltración mas rápido. Por lo tanto, se infiere que las condiciones iniciales afectan directamente el desempeño de la barrera capilar, siendo una condición critica niveles de succión bajos en relación con la permanencia de la frontera hidráulica.

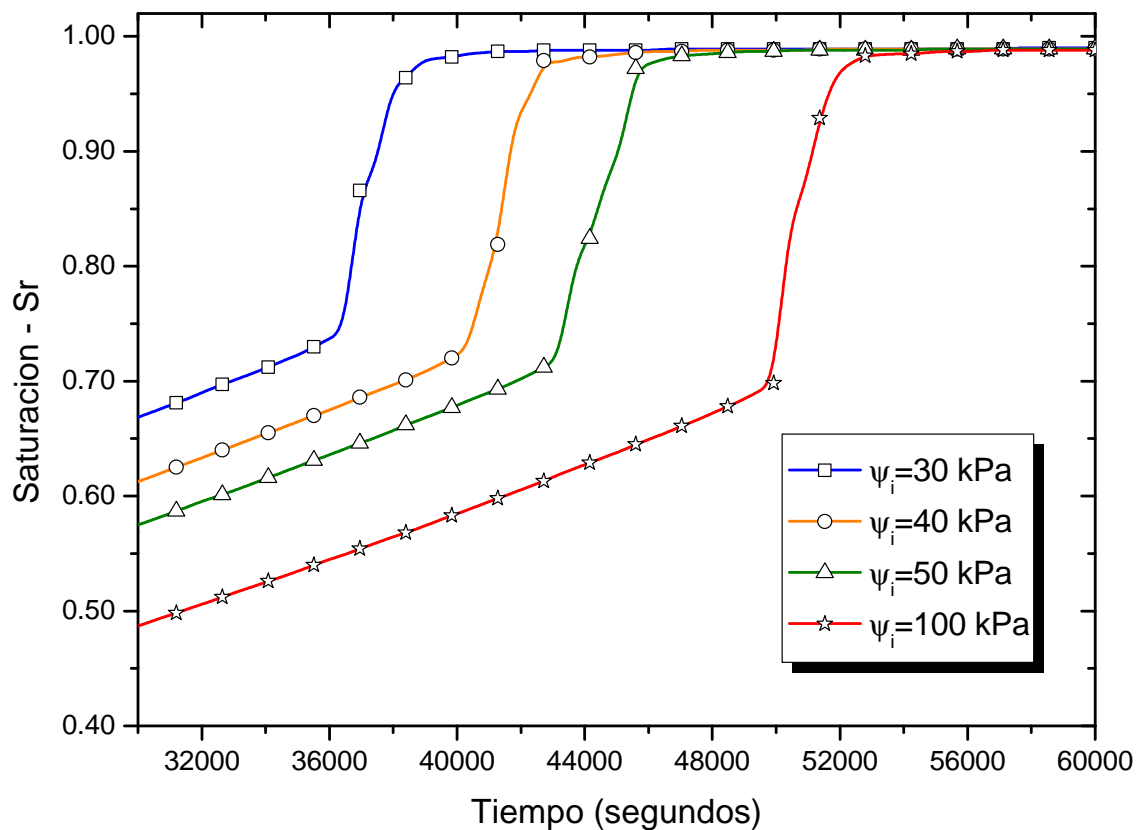


Figura 4.20: Distribución temporal del grado de saturación (Sr) para el elemento 405 bajo los distintos niveles de ψ_i .

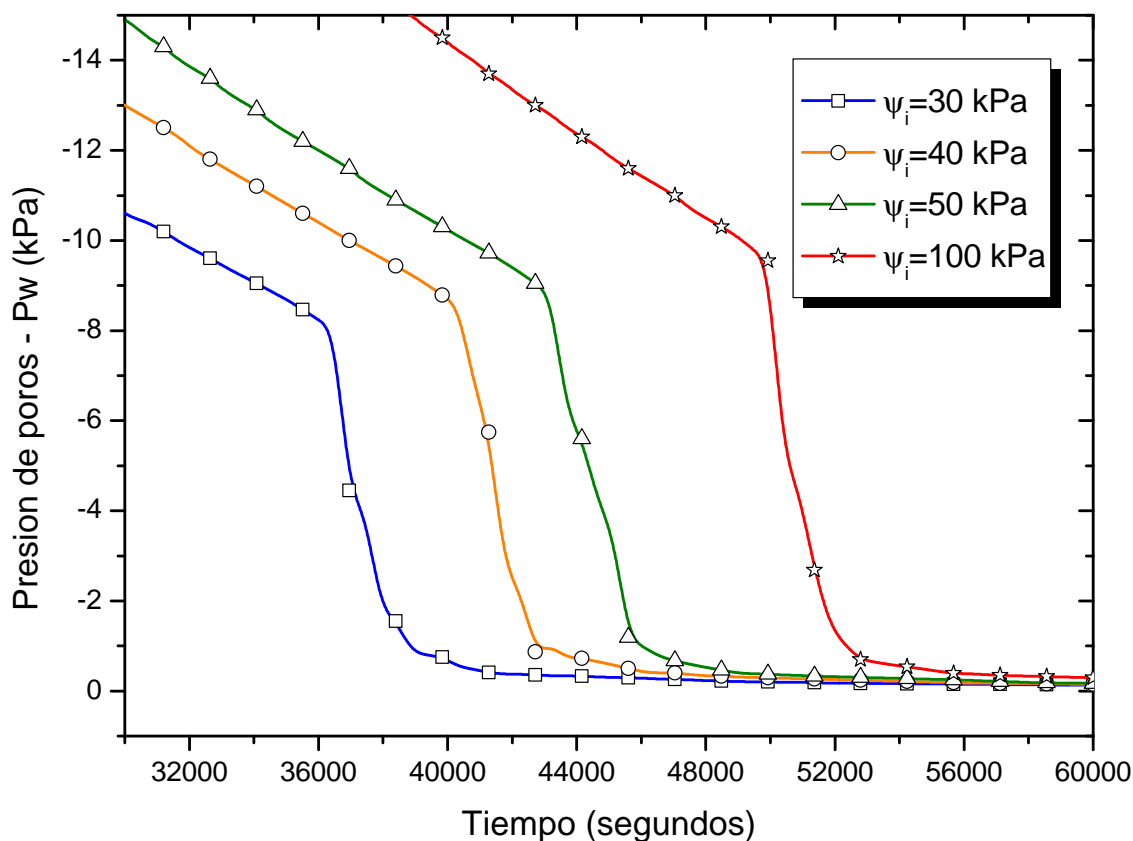


Figura 4.21: Distribución temporal de la presión de poros (P_w) para el elemento 405 bajo los distintos niveles de ψ_i .

De igual modo, en las Figuras 4.20 y 4.21 se observan diferencias en el inicio del incremento súbito en las condiciones de humedad según el nivel de succión inicial, los valores de saturación y presión de poros oscilan entre 0.7 - 0.74 y -9.55 a -8 kPa, respectivamente. A partir de los resultados se observa una tendencia en aumentar el grado de saturación que se requiere para iniciar el proceso de ruptura en niveles de succión menores. Sin embargo, se considera que el anterior resultado requiere de validación experimental.

Parámetros de ajuste de la curva de retención - α y n

Los parámetros α y n corresponden a los parámetros de ajuste empleados por el modelo de van Genuchten [85] para cuantificar la relación entre el contenido volumétrico de agua y la succión dada por la curva de retención de agua (*water retention curve-WRC*). El análisis de estos parámetros consiste en evaluar la influencia del material de refuerzo (geotextil no-tejido) en el desempeño de la barrera capilar a partir del comportamiento previsto por la curva de retención. Los valores de α y n fueron determinados por Stormont [135] y empleados por Zornberg [99] para evaluar experimentalmente el desempeño de la barrera capilar bajo la interacción de distintos geotextiles no tejidos, los valores corresponden a $\alpha= 5, 8.46, 9.07$ y 11.21 (1/kPa) y $n= 4.37, 5.25, 5.73$ y 7 .

El parámetro α representa el punto de inflexión de la curva de retención, relacionado con el tamaño de poro mas grande que presente el material [109]. Mientras que el parámetro n expresa la rata de decrecimiento en el contenido de agua y está ligado a la distribución del tamaño de partículas [136].

En la Figura 4.22 se puede observar que ante un incremento en el parámetro α ; la tasa de incremento en el grado de saturación aumenta hasta alcanzar el estado estacionario. La principal diferencia en el tiempo requerido para alcanzar valores de saturación cercanos a 1.0 se presenta entre $\alpha=5$ y los demás valores ($\alpha= 8.46, 9.07$ y 11.21), estos últimos exhiben un tiempo similar en alcanzar dicha condición. Así que, los efectos del parámetro α se generan en el gradiente de humedad, al coincidir en el inicio del crecimiento de la presión de poros (Figura 4.23)

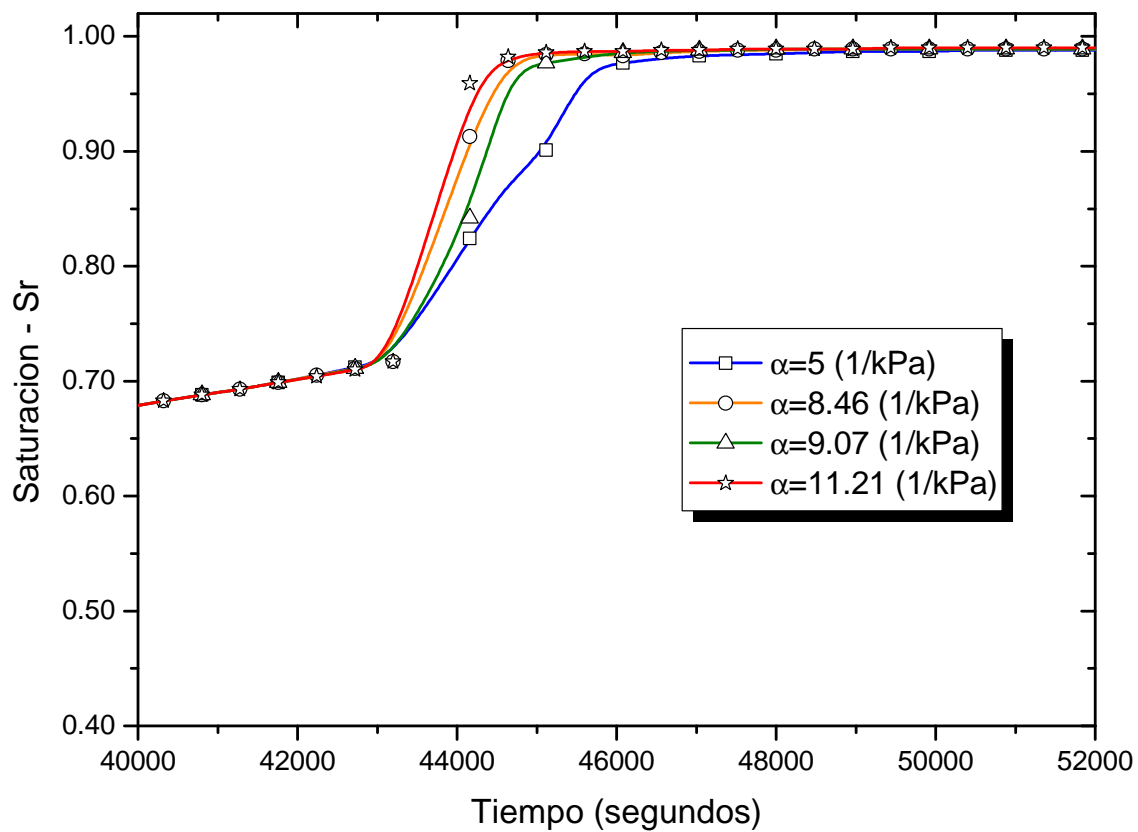


Figura 4.22: Distribución temporal del grado de saturación (Sr) para el elemento 405 bajo los distintos niveles de α .

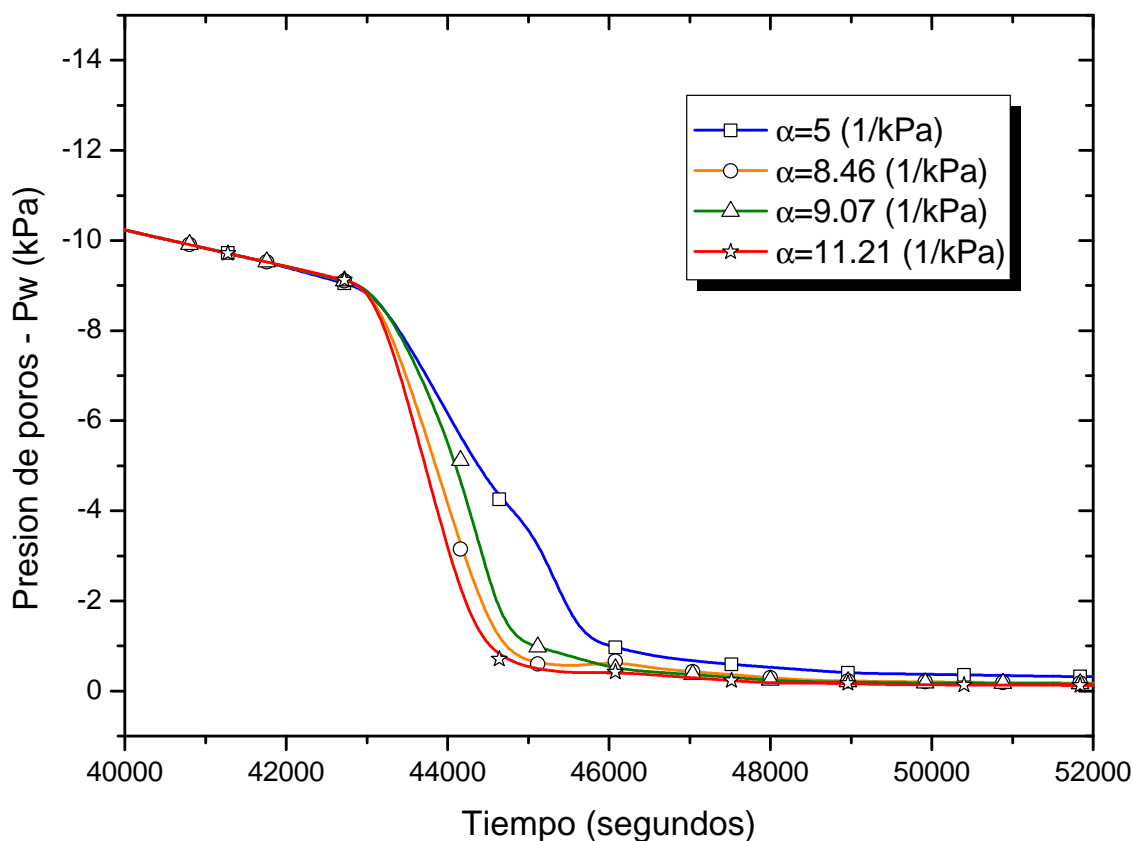


Figura 4.23: Distribución temporal de la presión de poros (P_w) para el elemento 405 bajo los distintos niveles de α .

En cuanto al parámetro n se observa que la frontera hidráulica permanece por más tiempo a medida que el parámetro disminuye. Como se muestra en la Figura 4.24 el escenario crítico corresponde al valor de $n=7$ donde la ruptura ocurre en menor tiempo entre los niveles, sin embargo este tiempo de ruptura supera el desempeño de la barrera presentado por las distintas variaciones de α , es decir, que el desempeño de la barrera capilar presenta mayor sensibilidad con las variaciones de n en comparación con α . De manera puntual se observa que la mayor efectividad de la barrera es cuando el material de refuerzo se le asigna el valor de $n=4.37$; prolongándose hasta 48000s de lluvia (Figura 4.25).

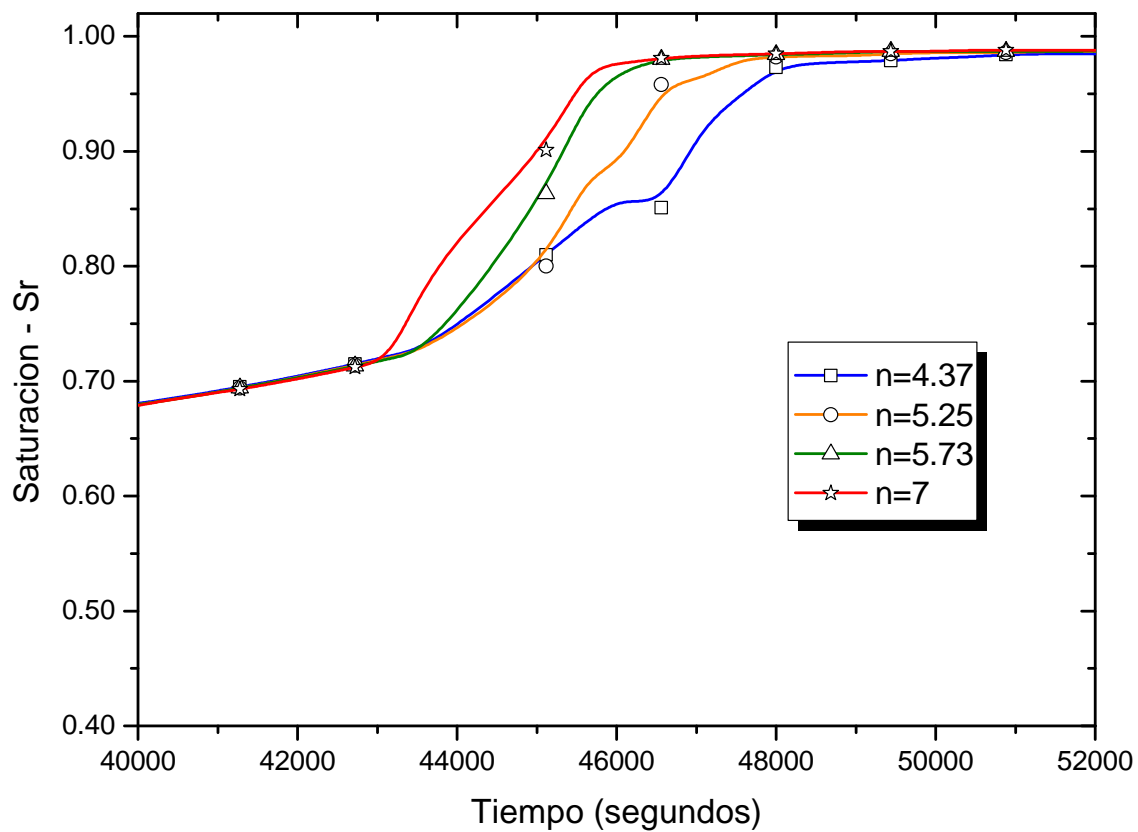


Figura 4.24: Distribución temporal del grado de saturación (Sr) para el elemento 405 bajo los distintos niveles de n .

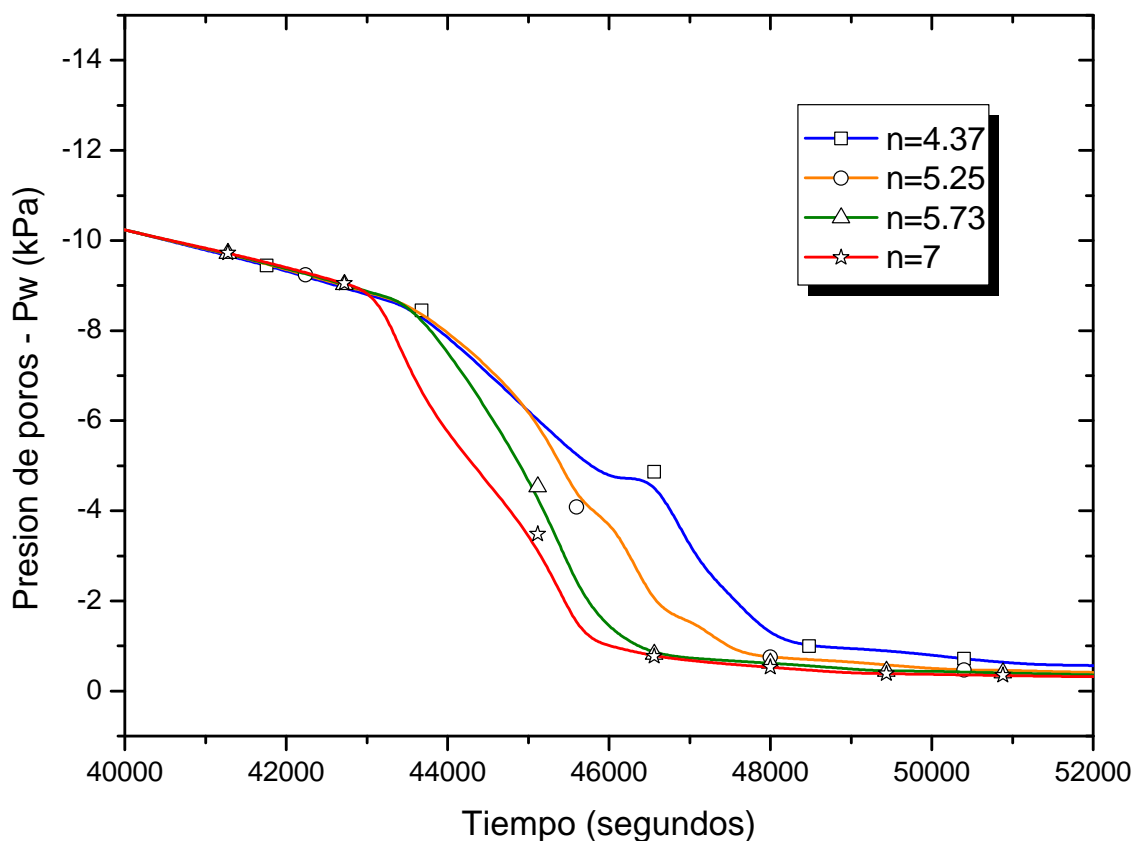


Figura 4.25: Distribución temporal de la presión de poros (P_w) para el elemento 405 bajo los distintos niveles de n .

El resultado con respecto a las variaciones del parámetro α para el material de refuerzo es consistente lo presentado por Chinkulkijniwat et al. [98]. Este estudio presenta la respuesta hidráulica de un muro mecánicamente estabilizado (MSE wall) con el uso de un geocompuesto conformado por geotextiles no tejidos y un geonet. Los resultados indican que el incremento en el grado de saturación en la zona de interacción con el geocompuesto es potencializado cuando el valor de α para el geotextil aumenta. Sin embargo, el efecto de n es menor en relación con lo presentado por α en términos de los cambios generados en el grado de saturación, Chinkulkijniwat et al. [98] concluyen que: “el parámetro g_n (n) no afecta el tamaño del poro del material y así la barrera capilar (*The parameter g_n does not affect the pore size of the material*

and thus the capillary barrier)” . Esto es contradictorio con el efecto significativo observado por n en el presente estudio, las diferencias presentadas entre los estudios podrían ser atribuidas a los diferentes materiales de refuerzo empleados, los cuales podrían presentar variaciones en las condiciones de flujo en la interfaz con un geocompuesto o un geotextil no-tejido, igualmente estas diferencias podrían aludirse a las funciones de conductividad hidráulica no saturada adoptados por los modelos numéricos implementados.

Cabe destacar que el modelo utilizado en la presente investigación considera el papel del parámetro n en la construcción de la curva de retención de agua como también en la función de conductividad con respecto al grado de saturación (ecuación 3.29), con el propósito de evitar inestabilidad numérica debido a grandes gradientes que se pueden presentar cuando la saturación se aproxima a valores cercanos a 1.0, tal como se menciona en Garcia [137]. Esta formulación obedece a lo mencionado por Zhan [138] con respecto a la influencia del parámetro n definido como coeficiente de desaturación (*Desaturation Coefficient*) en la distribución de la presión de poros durante procesos de infiltración. Zhan concluye que los principales efectos en la respuesta de la presión de poros son dados por n y el coeficiente de permeabilidad saturada (k_s), resaltando que ante condiciones con bajos valores de presión de poros negativa; k_s predomina en el control del coeficiente de permeabilidad de agua, definido en el modelo COMVI considerando el efecto de la relación de vacíos y los parámetros de ajuste a, n y m . La condición de presión de poros expuesta por Zhan es característica de lo observado en el fenómeno hidráulico dado en la interfaz suelo y geotextil no tejido (Figura 4.25).

Comparación de resultados

Mediante el análisis paramétrico se pudo detectar las diferencias en el desempeño de la barrera capilar debido a las variaciones en los distintos parámetros hidro-mecánicos seleccio-

CAPÍTULO IV. 4.2. ANÁLISIS DE INFLUENCIA

nados. En términos generales, la respuesta del proceso de infiltración dado por el elemento ubicado por debajo de la interfaz suelo-geotextil presenta un comportamiento súbito en el flujo de filtración en concordancia con la naturaleza del fenómeno, producto del incremento generado por el descenso del agua estancada en la interfaz suelo-geotextil.

Con el análisis de los resultados se logra identificar la influencia de cada parámetro con base en la distribución de las variables respuesta y las condiciones necesarias para generar la ruptura del fenómeno, el cual ocurre en presiones de poros y grado de saturación cercanos a 0 y 1.0, respectivamente.

Las principales diferencias se obtuvieron en los factores correspondientes a la relación de vacíos, succión inicial y el parámetro n del modelo de van Genuchten. Mediante los diferentes niveles empleados en cada uno de estos factores se observó la influencia en la distribución del flujo y el tiempo de permanencia de la barrera hidráulica dado por las condiciones en la ruptura. Mientras que en los demás parámetros las diferencias observadas se centran en la distribución de las variables respuesta. Por lo tanto, el análisis paramétrico describe una mayor sensibilidad en la efectividad de la barrera capilar por las propiedades destacadas anteriormente, lo cual plantea considerar los valores de estas propiedades en la selección de los materiales a emplear en los sistemas de barrera capilar, como también en las posibles variaciones de estas propiedades a través de los distintos procesos inmersos en la construcción y desarrollo de las estructuras de suelo reforzado con materiales permeables, tales como el proceso de compactación.

Cabe destacar que el efecto del proceso de compactación se consideró en las variaciones de los parámetros de relación de vacíos, modulo de rigidez y relación de anisotropía. Acorde a la influencia de este proceso en el comportamiento hidro-mecánico del suelo evidenciada por varios investigadores de manera experimental y numérica [111], [113], [132]. Igualmente, el estado de esfuerzos fue contemplado en la relación de sobreconsolidación, al evidenciar la influencia de

la componente mecánica en el comportamiento hidráulico bajo condiciones parcialmente saturadas, resaltando que el desempeño del geotextil como material drenante es dependiente de las condiciones de saturación en la interfaz suelo-geotextil [135], [19], [139]. Por consiguiente, se destaca la implementación de un modelo acoplado en el estudio del fenómeno contemplando la interdependencia entre el proceso de infiltración y desarrollo de deformaciones en el comportamiento hidráulico de las estructuras de suelo.

A continuación, se presenta los resultados del análisis estadístico con el propósito de abordar y comprobar las diferencias observadas en el análisis paramétrico con el uso de modelos de inferencia.

4.2.3. Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó con base en la respuesta temporal de las variables contempladas por el modelo COMVI durante el proceso de infiltración. La disponibilidad de vacíos a ocupar en el medio poroso es descrita por la relación de vacíos (VOID), el desarrollo de deformaciones es dado por la variable GMP, al indicar la acumulación de deformaciones cortantes viscoplásticas generadas durante el proceso de infiltración. Mientras que el contenido de agua y las condiciones del flujo son definidas por el grado de saturación (S_r) y presión de poros (PW), respectivamente.

Análisis descriptivo

En la Figura 4.26 se presenta la estructura de dependencia entre las variables respuesta arrojadas por el modelo con el material base (sección 4.2.1), la diagonal principal corresponde a la distribución de las variables representado por histogramas, en el cual se observa un rango estrecho para las variables VOID y GMP a partir de las variaciones en el comportamiento me-

CAPÍTULO IV. 4.2. ANÁLISIS DE INFLUENCIA

cánico, en cuanto a las variables de flujo (S_r y P_w) se observa una mayor concentración en valores extremos producto del incremento súbito de agua posterior a la ruptura de la barrera capilar. La Figura 4.26 también presenta la dispersión (la línea roja presenta la tendencia en la dispersión) y correlación existente entre las variables dada por el costado inferior y superior de la matriz de correlación, respectivamente. Los valores de correlación resaltan la dependencia entre las variables conforme con la interacción e influencia entre los procesos de infiltración y deformación contemplados en el modelo acoplado.

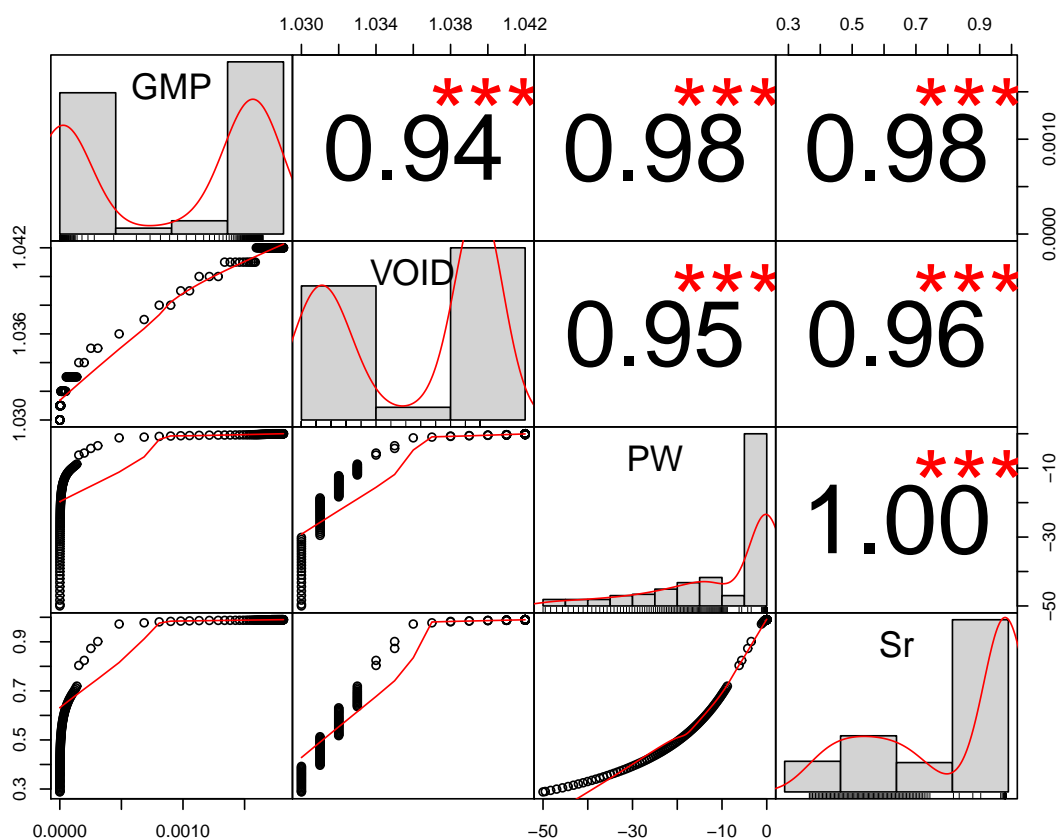


Figura 4.26: Matriz de correlación con histogramas de las variables respuesta.

La Figura 4.27 muestra la distribución de las variables en las dimensiones definidas a partir

CAPÍTULO IV. 4.2. ANÁLISIS DE INFLUENCIA

de las componentes principales, resaltando la orientación preferencial de las variables en la dimensión 1, la cual es la componente que aporta en mayor proporción en el porcentaje de varianza explicada (94.5 %). De igual manera la variable que presenta mayor contribución es la relación de vacíos (VOID), siendo la variable que por su naturaleza permite considerar la interdependencia entre el proceso de infiltración y deformación, en términos de los cambios que se pueden dar en la estructura de suelo.

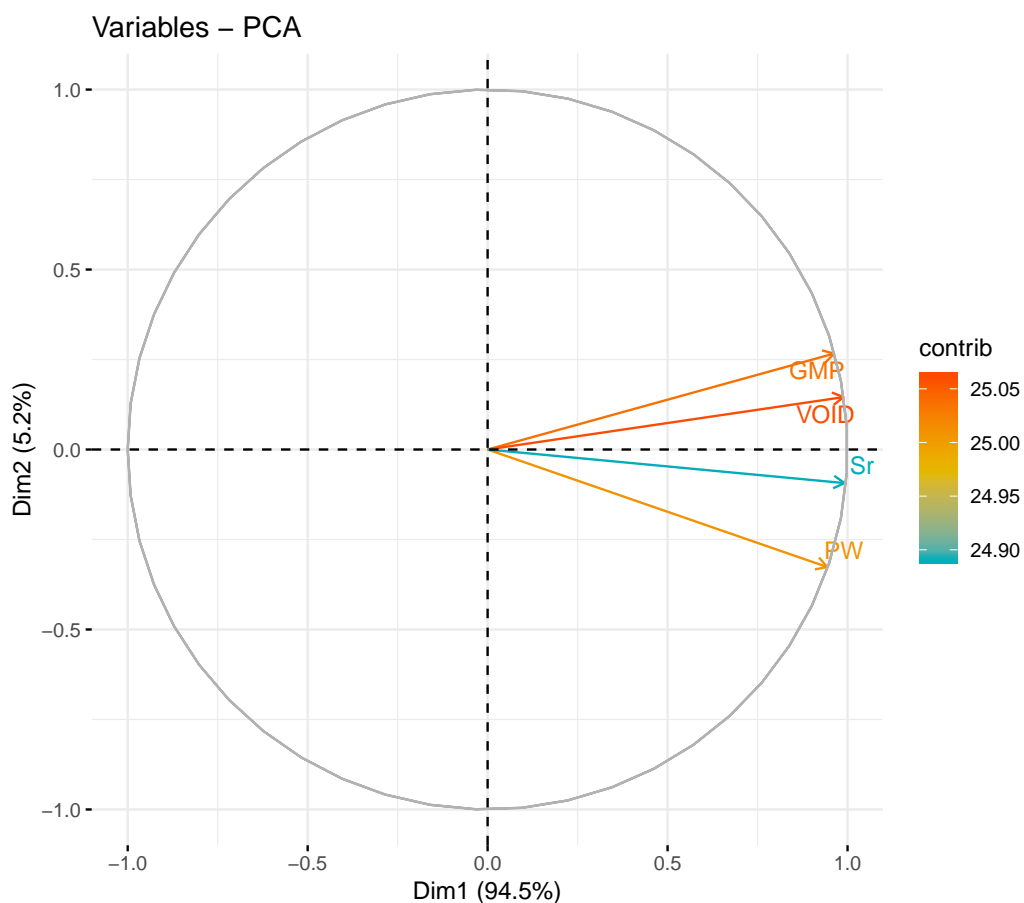


Figura 4.27: Análisis de componentes principales con la contribución de cada variable.

Análisis de varianza

El análisis de varianza consistió en determinar las diferencias en las variables dependientes concernientes a las variables de flujo (S_r y P_w) a partir de las variaciones en los factores definidos en el diseño factorial empleado anteriormente en el análisis paramétrico (Tabla 4.3).

Las variables dependientes son la respuesta del modelo en términos del proceso de infiltración determinado en cada unidad de tiempo ($\Delta t = 30s$), en el presente análisis se utilizan observaciones cada 480 segundos. Lo que equivale a 226 observaciones por cada nivel del factor durante 30 horas de simulación.

Previo a examinar los resultados de la prueba F; en la Tabla 4.5 se presentan estadísticos de tendencia central (media, desviación estándar y mediana) en cada uno de los grupos dados por los valores empleados en las propiedades hidro-mecánicas de los materiales, ya que es justamente las diferencias entre las medias de los grupos; el criterio de análisis considerado en la prueba de hipótesis establecida por los modelos paramétricos. En términos generales, las variables respuesta presentan valores similares en la mayoría de los factores. No obstante, las mayores diferencias en la media y la mediana se presentan en la componente hidráulica; siendo la succión inicial (ψ_i) el factor con las principales diferencias. Cabe destacar, que estas diferencias son mas notorias en términos de la presión de poros (P_w).

CAPÍTULO IV. 4.2. ANÁLISIS DE INFLUENCIA

Tabla 4.5: Estadísticos de tendencia central para la presión de poros (Pw) y grado de saturación (Sr) para cada factor y sus respectivos niveles.

Factor	Niveles	Media		Desviación estándar		Mediana	
		Pw	Sr	Pw	Sr	Pw	Sr
e_0	1.03	-9.33	0.78	13.16	0.25	-0.27	0.98
	1.1	-9.60	0.78	13.27	0.25	-0.30	0.98
	1.2	-10.02	0.77	13.38	0.25	-0.36	0.98
	1.3	-10.35	0.76	13.47	0.25	-0.44	0.98
OCR	1	-9.33	0.78	13.16	0.25	-0.27	0.98
	2	-9.32	0.78	13.17	0.25	-0.27	0.98
	5.9	-9.30	0.78	13.17	0.25	-0.26	0.98
G_0 (kPa)	13000	-9.30	0.78	13.18	0.25	-0.24	0.98
	20000	-9.33	0.78	13.16	0.25	-0.27	0.98
	22500	-9.34	0.78	13.15	0.25	-0.27	0.98
	36100	-9.35	0.78	13.15	0.25	-0.27	0.98
λ	0.09	-9.26	0.78	13.20	0.25	-0.26	0.98
	0.11	-9.32	0.78	13.17	0.25	-0.27	0.98
	0.125	-9.33	0.78	13.16	0.25	-0.27	0.98
	0.144	-9.33	0.78	13.16	0.25	-0.27	0.98
k_r	1	-9.33	0.78	13.16	0.25	-0.27	0.98
	10	-9.28	0.78	12.68	0.23	-3.66	0.89
	50	-9.15	0.78	12.60	0.23	-3.63	0.89
	100	-9.15	0.79	12.61	0.23	-3.64	0.89
ψ_i	30	-5.92	0.84	8.79	0.21	-0.16	0.98
	40	-7.72	0.81	11.07	0.23	-0.21	0.98
	50	-9.33	0.78	13.16	0.25	-0.27	0.98
	100	-15.35	0.73	22.59	0.29	-0.55	0.98
n	4.37	-9.45	0.78	13.09	0.25	-0.48	0.98
	5.25	-9.41	0.78	13.11	0.25	-0.33	0.98
	5.73	-9.30	0.78	13.18	0.25	-0.28	0.98
	7.00	-9.33	0.78	13.16	0.25	-0.27	0.98
α	5.00	-9.33	0.78	13.16	0.25	-0.27	0.98
	8.46	-9.28	0.78	13.20	0.25	-0.15	0.98
	9.07	-9.25	0.79	13.21	0.25	-0.11	0.98
	11.21	-9.23	0.79	13.22	0.25	-0.11	0.98

Mediante la prueba F no se identifican diferencias significativas entre los grupos de los

CAPÍTULO IV. 4.2. ANÁLISIS DE INFLUENCIA

factores empleados, a excepción de la succión inicial (ψ_i) tanto en el grado de saturación como en la presión de poros, lo cual es consistente con lo descrito previamente con los estadísticos de tendencia central. Sin embargo, los supuestos requeridos por el modelo paramétrico no se cumplen, debido al comportamiento exhibido por los residuos del modelo en términos de la normalidad y la igualdad de varianzas. De igual modo, el valor p ($\alpha > 2.2e-16$) presentado por la prueba de Durbin Watson para la independencia no permite concluir que los residuos no están autocorrelacionados considerando un nivel de significancia del 95 % ($\alpha = 0,05$). Por lo tanto, los resultados del modelo paramétrico son restringidos y limitados a partir de la naturaleza del fenómeno a estudiar, caracterizada por una distribución atípica de las variables respuesta debido a cambios drásticos en el comportamiento hidráulico como efecto de la existencia y posterior ruptura de la barrera capilar descrito por el elemento de análisis.

En el anexo A se muestra el resultado de la prueba F y la distribución de los residuos del modelo, así como la representación de las variables dependientes en cada factor mediante gráficos boxplot y las diferencias en las medias entre los grupos correspondientes a la succión inicial.

Considerando la limitación en la interpretación del fenómeno mediante modelos de inferencia que requieren normalidad, se plantea realizar el análisis de varianza mediante la prueba de Kruskal-Wallis (Prueba H) como alternativa a la prueba F, lo cual se había contemplado como metodología de análisis. En la Tabla 4.6 se observa que el valor p definido para cada factor es mayor que α , por lo tanto se infiere que las variables dependientes exhiben homogeneidad en la varianza entre los grupos, cumpliendo con el supuesto de homocedasticidad requerido en la prueba H a excepción de la succión inicial ψ_i limitando el análisis de este factor derivado de los modelos no paramétricos.

CAPÍTULO IV. 4.2. ANÁLISIS DE INFLUENCIA

Tabla 4.6: Prueba de homocedasticidad mediante la prueba de Barlett

Factor	Presión de poros (Pw)			Grado de saturación (Sr)		
	K-cuadrado	df	valor-p	K-cuadrado	df	valor-p
e_0	0.1362	3	0.987	0.069	3	0.995
OCR	5.538e-05	2	1	0.0009	2	0.999
G_0	0.001	3	1	0.002	3	1
λ	0.002	3	1	0.001	3	1
k_r	0.596	3	0.897	2.058	3	0.560
ψ_i	234.32	3	2.2e-16	23.581	3	3.055e-05
n	0.014	3	0.999	0.019	3	0.999
α	0.004	3	0.999	0.005	3	0.999

Los resultados de la prueba H y las pruebas post-hoc respecto a Pw y Sr son presentadas por las Tablas 4.7 y 4.8, respectivamente. Basado en el análisis de varianza dado por valor p ($\alpha = 0,05$) se infiere que los efectos de los factores definidos por las propiedades hidromecánicas en la presión de poros (Pw) son estadísticamente significativos, con excepción del factor OCR en el cual no se identifican diferencias significativas entre los niveles, el anterior resultado podría estar relacionado con el estrecho rango de valores empleados en el análisis, siendo el factor con menos niveles definidos en el diseño factorial.

Los efectos principales de cada factor son definidos por los niveles que presentan diferencias significativas identificados por las pruebas post-hoc, los valores de los factores que presentan diferencias son exhibidos en la última columna (Diferencia sig.) en las Tablas 4.7 y 4.8. El mayor número de diferencias entre los niveles corresponden a la componente hidráulica con respecto a Pw como se muestra la Tabla 4.7, dentro de esta componente se destaca el parámetro n ; con diferencias significativas entre todos los niveles considerados, resultado consistente con la influencia en el tiempo de permanencia de la barrera hidráulica y en la distribución del flujo mencionado en el análisis paramétrico. Igualmente, con el análisis de varianza considerando como variable dependiente la presión de poros; se pudo comprobar la influencia del proceso

CAPÍTULO IV. 4.2. ANÁLISIS DE INFLUENCIA

de compactación en el desempeño de la barrera capilar a partir de los efectos estadísticamente significativos de factores como la relación de vacíos inicial e_0 , modulo de rigidez G_0 y relación de anisotropía k_r .

Tabla 4.7: Análisis de varianza para presión de poros (Pw) mediante la prueba H

Factor	K-cuadrado	df	valor-p	Diferencia sig.
e_0	10.739	3	0.013	1.03-1.3
OCR	5.168	2	0.075	-
G_0	11.205	3	0.0106	20000-22500
λ	14.614	3	0.002	0.09-0.11 0.09-0.144
k_r	15.002	3	0.001	1-50 10-50 50-100
ψ_i	7.956	3	0.046	40-50 4.37-5.73
n	19.059	3	0.0002	5.25-5.73 5.73-7
α	20.287	3	0.0001	5-9.07 8.46-9.07 9.07-11.21

Los efectos del analisis de varianza en terminos del grado de saturación (Sr) solamente se generaron por los factores de relación de anisotropía k_r y succión inicial ψ_i , tal como se indica en la Tabla 4.8. Cabe destacar que las diferencias presentadas por ψ_i son restringidos al no cumplir el supuesto de homocedasticidad. Por otro lado, las mayores diferencias en k_r observadas en el analisis paramétrico se presentan con respecto a $k_r=1$, mientras que la diferencia entre los niveles de $k_r=10$ y 50 es levemente detectada durante el incremento progresivo de la saturación.

Por lo tanto, se infiere que las diferencias entre los grupos de los factores presenta mayor sensibilidad en términos de la presión de poros (Pw) en comparación con el grado de saturación (Sr) a partir de los resultados con el análisis de varianza no paramétrico. Lo anterior podría in-

CAPÍTULO IV. 4.2. ANÁLISIS DE INFLUENCIA

dicar que la presión de poros representa de mejor manera las condiciones de flujo en la interfaz suelo-geotextil sujetos a cambios en las propiedades hidro-mecánicas de los materiales, lo cual podría relacionarse con lo detectado por Albino et al. [105], en el cual se opta por seleccionar la presión de poros como variable respuesta en el análisis numérico en vez del contenido volumétrico de agua, al considerar un ajuste del modelo con mayor precisión en relación con los registros de presión de poros en un muro reforzado con geotextiles no-tejidos e instrumentado con sensores FDR y tensiometros, el modelo a escala y el reporte de los registros fue presentado por Portelina et al. [140].

Tabla 4.8: Análisis de varianza para el grado de saturación (S_r) mediante la prueba H

Factor	K-cuadrado	df	valor-p	Diferencia sig.
e_0	3.444	3	0.328	-
OCR	0.364	2	0.833	-
G_0	2.345	3	0.503	-
λ	0.722	3	0.867	-
k_r	10.354	3	0.015	1-50 10-50
ψ_i	19.631	3	0.0002	30-100 40-100
n	2.617	3	0.454	-
α	2.393	3	0.494	-

En conclusión, se resalta la potencia de la prueba de Kuskal Wallis para identificar diferencias entre los grupos mediante la segmentación de las observaciones por rangos, presentando compatibilidad con la naturaleza del fenómeno abordado, en donde las principales diferencias se centran en el intervalo de tiempo que se genera la ruptura de la barrera capilar y la condición de flujo estacionario. A diferencia del modelo paramétrico en el que se pudo identificar un solo factor con diferencias estadísticamente significativas, siempre y cuando se cumpla las suposiciones sobre la naturaleza y forma de la población estudiada, contrastante con la distribución

temporal de las variables de flujo estudiadas en el fenómeno hidráulico.

4.3. Desempeño de la ruptura capilar

En las Figuras 4.28 y 4.29 se presentan las funciones de conductividad del suelo y el geotextil con las distintas variaciones en los parámetros de ajuste n y α , respectivamente. En la Figura 4.28 se exhibe la influencia del parámetro n en el desempeño de la barrera capilar a partir de los valores de la conductividad hidraulica no saturada bajo distintos niveles de succión, observando una disminución en la succión de avance (*breakthrough suction*) a medida que n aumenta, dado por el nivel de succión donde la conductividad hidráulica de los materiales alcanza el mismo valor. Igualmente, para los valores de α existe una reducción en la succión de avance, siendo $\alpha=11.21$ el escenario con menor valor de succión (0.15 aproximadamente), como se muestra en la Figura 4.29. El anterior resultado con respecto al parametro α es acorde a lo presentado por Chinkulkijniwat et al. [98], al establecer que el incremento en el valor de α genera bajos valores de succión de avance, definida como succión critica (*critical suction*).

CAPÍTULO IV. 4.3. DESEMPEÑO DE LA RUPTURA CAPILAR

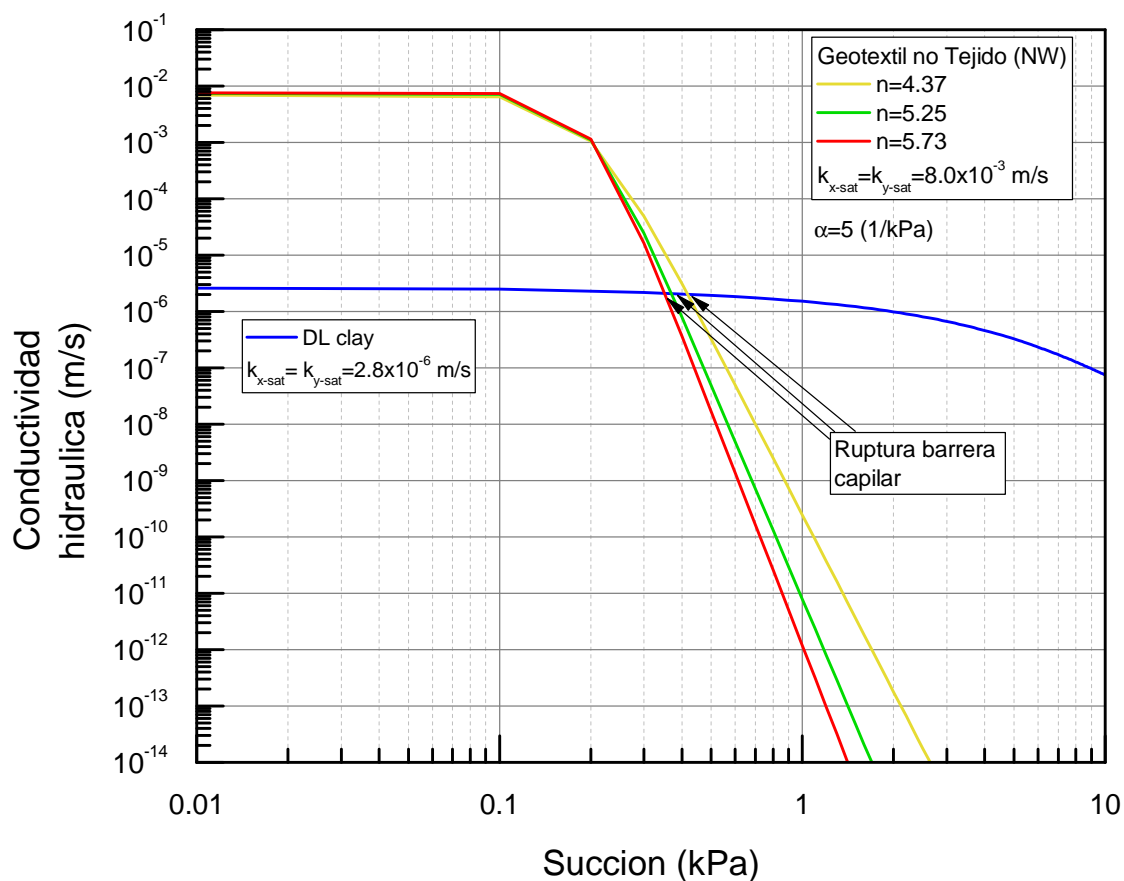


Figura 4.28: Funciones de conductividad hidráulica del suelo y el geotextil con distintos valores de n.

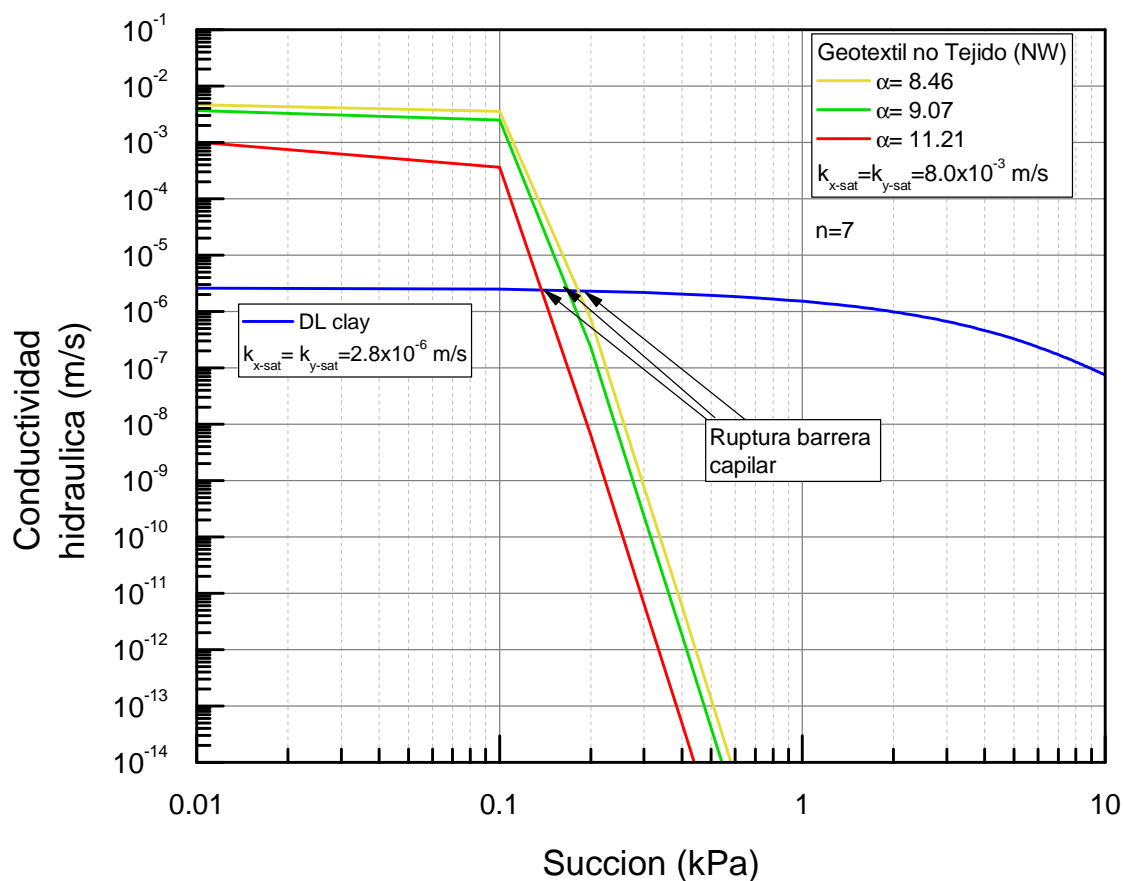


Figura 4.29: Funciones de conductividad hidráulica del suelo y el geotextil con distintos valores de α .

La Tabla 4.9 presenta los valores de succión de avance para los distintos valores de n y α , comparando los valores obtenidos a partir de las funciones de conductividad y el modelo numérico. El rango de valores de la succión de avance es inferior a 1 kPa tanto para los valores estimados por las funciones de conductividad como para los valores determinados por el modelo, el cual es un comportamiento típico en los geotextiles permeables o materiales granulares empleados en sistemas de barrera capilar, al determinar que el geotextil actúa de manera efectiva como material drenante bajo presiones de poros positivas o cercanas a cero [19], [20], [69], [141]. En cuanto a los valores de succión determinados por el modelo; estos presentan leves diferencias

CAPÍTULO IV. 4.3. DESEMPEÑO DE LA RUPTURA CAPILAR

con los obtenidos por las funciones de conductividad, sin embargo el ajuste entre estos valores permite inferir sobre la consistencia y compatibilidad entre ambas metodologías, en las cuales se puede identificar la tendencia entre los valores de succión de avance y las variaciones en los parámetros de ajuste n y α .

Tabla 4.9: Succión de ruptura estimada y observada según función de conductividad y modelo numérico, respectivamente.

Parámetro	Valor	Succión (kPa) Estimada	Succión (kPa) Observada	tiempo(s)
n	5.73	0.35	0.359	46600
	5.25	0.37	0.399	47500
	4.37	0.42	0.573	48000
α	8.46	0.18	0.136	45100
	9.07	0.17	0.407	44600
	11.21	0.15	0.137	44600

Con respecto al desempeño temporal de la barrera capilar; se observa una mayor tiempo para alcanzar la succión de avance con las variaciones del parametro n en comparación con los tiempos obtenidos con el parámetro α , como se puede ver en la Tabla 4.9. Con el valor de $n=4.37$ se obtiene el mayor tiempo de duración de la frontera hidráulica, observando una reducción en el tiempo de permanencia al aumentar n . Mientras que el tiempo presentado por los valores de α es similar, con una ligera diferencia en el valor de $\alpha=8.46$. El comportamiento exhibido por el elemento de refuerzo (409) es consistente con lo determinado en el análisis paramétrico, al tener como unidad de análisis un elemento de suelo (405) ubicado por debajo de la capa de refuerzo. Concluyendo una representación continua del fenómeno con el uso de elementos finitos y la discretización de la malla empleada.

Igualmente, el uso de la succión de avance como criterio de evaluación sobre el desempeño de la barrera capilar permite soportar el resultado presentado en el análisis estadístico; al considerar una mejor representación del fenómeno y su desarrollo mediante la distribución de la

CAPÍTULO IV. 4.3. DESEMPEÑO DE LA RUPTURA CAPILAR

presión de poros y su relación con la succión. No obstante, se aclara la necesidad de ampliar el rango de valores para los factores, con el propósito de ampliar la tendencia observada para otros materiales empleados en estructuras de suelo reforzado con materiales permeables.

Finalmente, se destaca la implementación de la función de conductividad para predecir de forma previa las condiciones y desempeño de la barrera capilar, lo que permite contrastar la evaluación del fenómeno ya sea mediante modelos numéricos o experimentalmente, tal como lo resalta Zornberg et al. [99] sobre el ajuste del método (*K-function method*) con los resultados experimentales. No obstante, se deben considerar las limitaciones teóricas de la función de conductividad generando posibles discrepancias con resultados experimentales [142], al igual de los efectos de la ecuación de la curva de retención de agua (SWCC) en la estimación de las funciones de conductividad [143].

Capítulo V

CONCLUSIONES

5.1. Conclusiones

Mediante un análisis numérico se evaluó el desempeño de las estructuras de suelo reforzado con geosintéticos permeables bajo un enfoque acoplado de infiltración-deformación. La influencia de las propiedades hidro-mecánicas en el desarrollo y eficiencia de la barrera capilar fue evaluada en la interfaz suelo-geotextil durante el proceso de infiltración bajo condiciones parcialmente saturadas. A continuación, se presentan las principales conclusiones derivadas de los análisis realizados.

† La comparación de la distribución temporal del contenido volumétrico y presión de poros registrados en el modelo experimental permitió validar la capacidad del modelo numérico (COMVI) para representar el proceso de infiltración en estructuras de suelo reforzado con geotextil no tejido, con principal énfasis en la presencia, desarrollo y desempeño de la barrera capilar.

† El ajuste en relación con la distribución de las variables respuesta (Contenido volumétrico

CAPÍTULO V. 5.1. CONCLUSIONES

y presión de poros) se obtuvo con mayor precisión cuando se emplearon los parámetros de la *scanning curve* para el suelo. No obstante, se presentaron algunas diferencias en el inicio de la distribución de las variables con respecto a los registros experimentales, atribuidas a condiciones particulares y complejas que se pueden presentar en la interfaz suelo-geotextil durante la experimentación.

† Con respecto al análisis de influencia; inicialmente se pudo identificar el efecto de las propiedades hidro-mecánicas en el desempeño de la barrera capilar mediante un análisis paramétrico, destacando que las principales variaciones en el desempeño se obtuvieron con los parámetros dados por la relación de vacíos, succión inicial y n . Al presentar influencia en la distribución del flujo y el tiempo de permanencia de la barrera capilar. De manera que la variabilidad de estos factores puede jugar un papel importante en el desempeño del fenómeno hidráulico a partir de las propiedades y condiciones presentadas por los materiales a interactuar.

† Igualmente, la influencia del proceso de compactación fue evaluado mediante las variaciones en los parámetros hidro-mecánicos, tales como; la relación de vacíos inicial e_0 , modulo de rigidez G_0 y relación de anisotropía k_r . Al mencionar que el proceso de compactación puede modificar las condiciones presentadas en la interfaz suelo-geotextil. Por lo tanto, los resultados presentados en el análisis paramétrico plantea abordar el desempeño de la barrera capilar considerando la interacción de distintos materiales caracterizados por sus propiedades hidro-mecánicas y las posibles variaciones en estas propiedades. Al determinar que tanto las propiedades hidráulicas como mecánicas tienen influencia en el fenómeno de la barrera capilar.

† La implementación de modelos de inferencia estadística permitió determinar las diferen-

CAPÍTULO V. 5.1. CONCLUSIONES

cias presentadas por los distintos grupos de cada factor, consistente con lo presentado en el análisis paramétrico. Conforme a esto; se podría mencionar la capacidad de integrar e incorporar ambos análisis (paramétrico y estadístico) con el propósito de abordar y sustentar la posible influencia de distintos parámetros en la respuesta hidráulica de estructuras de suelo reforzado.

† Mediante las pruebas de varianza empleados en el análisis estadístico se logra determinar que los efectos inducidos por las propiedades hidro-mecánicas presentan diferencias estadísticamente significativas. Este resultado fue obtenido para casi todos los factores (excepto *OCR*) mediante la prueba no paramétrica Kruskal Wallis a diferencia de lo presentado por la prueba paramétrica (prueba F), en la cual solo se pudo identificar diferencias con la succión inicial. Basado en los resultados, se puede concluir un mejor desempeño del modelo no paramétrico con respecto a la compatibilidad y adaptación de los criterios empleados en la identificación de diferencias y naturaleza del fenómeno estudiado, resaltando la flexibilidad del modelo no paramétrico sobre la forma de la población y validez en los supuestos. Por ende, se destaca la implementación del enfoque no paramétrico como alternativa viable en la determinación de diferencias estadísticas para variables de flujo en medios porosos.

† A partir de los resultados de la prueba Kruskal Wallis se infiere que las diferencias identificadas entre los grupos de los factores presenta mayor sensibilidad en términos de la presión de poros (P_w) en comparación con el grado de saturación (S_r). Lo cual podría implicar una mejor representación de las variaciones en las condiciones de flujo en la interfaz suelo-geotextil debido a cambios en las propiedades hidro-mecánicas. Este resultado se podría considerar en la instrumentación empleada en futuras investigaciones

CAPÍTULO V. 5.1. CONCLUSIONES

experimentales sobre el desempeño de sistemas de barrera capilar bajo condiciones parcialmente saturadas.

† Finalmente, un análisis sobre el desempeño de la ruptura capilar considerando la interacción con distintos materiales de refuerzo fue desarrollado. El análisis se centra en la influencia de los parámetros de ajuste n y α de la curva de retención para el geotextil no tejido. Los resultados muestra una mayor permanencia de la barrera capilar con las variaciones en el parámetro n en comparación con los tiempos de ruptura obtenidos con el parámetro α , acorde con la tendencia en el comportamiento descrito previamente sobre la influencia de estas variables en el fenómeno.

† Adicionalmente, se consideró el comportamiento hidráulico previsto por las funciones de conductividad de los materiales a interactuar y la comparación de la succión de avance con respecto a los valores desarrollados por el modelo numérico en el tiempo de ruptura. Los resultados reflejan consistencia entre ambas metodologías, al mostrar que los diferentes geotextiles empleados se comportan como un material drenante en bajos niveles de succión, dado que la succión de avance para los distintos escenarios fue inferior a 1 kPa. Conforme a esto, se destaca la implementación de la función de conductividad como método para determinar de forma preliminar las condiciones y desempeño de la barrera capilar, lo que permite contrastar la evaluación del fenómeno mediante modelos numéricos o experimentalmente.

† Con base en los diferentes análisis empleados en la presente investigación se pudo determinar la influencia de las propiedades hidro-mecánicas de los materiales en la presencia, desarrollo y desempeño de la barrera capilar. Tomando relevancia en la selección de los materiales a partir de las propiedades y criticidad en el desempeño considerando los po-

sibles cambios en dichas propiedades, al igual que establecer las condiciones propicias y susceptibilidad para el desarrollo de la barrera capilar.

La evaluación del fenómeno de barrera capilar mediante un modelo acoplado de infiltración-deformación plantea la necesidad de abordar problemáticas de interés hidro-geotécnico relacionadas con el proceso de infiltración e interacción de materiales en condiciones parcialmente saturados bajo un enfoque acoplado hidro-mecánico, y de esta manera aportar en la implementación e incorporación de este enfoque y la mecánica de suelos no-saturados en la Ingeniería practica. A continuación, se plantean futuros análisis en el estudio del fenómeno que permitan mejorar el conocimiento sobre comportamiento bajo distintas condiciones y consideraciones inmersos en la complejidad e incertidumbre que plantea el estudio del suelo y la interacción con materiales permeables.

5.2. Futuros análisis

- † Evaluación en la distribución espacial y localización de la ruptura capilar, en mención de este análisis se destaca el aporte presentado en el estudio del fenómeno desarrollado por Albino [142].
- † Incorporación de la densidad del suelo y el estado de esfuerzos en la determinación de las curvas de retención de agua en la formulación acoplada del modelo COMVI.
- † Evaluación de la influencia de las propiedades hidro-mecánicas en el desempeño del fenómeno bajo procesos de humedecimiento y secado, al igual que considerar la histeresis durante estos escenarios.
- † Evaluación de la respuesta hidro-mecánica de los materiales en la interfaz, abarcando

CAPÍTULO V. 5.2. FUTUROS ANÁLISIS

el proceso de infiltración y desarrollado de deformaciones, que permitan considerar las variaciones en el comportamiento de suelos deformables empleados como material de relleno en estructuras de suelo.

- † Ampliar la evaluación de la influencia y variaciones de las propiedades hidro-mecánicas en distintas estructuras de suelo, tales como; muros mecánicamente estabilizado, considerando las diferencias presentadas por la geometría del contorno dadas por la pendiente y cara vertical para el talud y el muro, respectivamente.
- † Evaluación de las condiciones del fenómeno con distintos materiales de refuerzo, como geocompuestos, geodrenes, geomallas, y en general con materiales permeables, incluso el uso de materiales reciclables del sector de la construcción como lo desarrollado por Rahardjo et al. [144].
- † Implementación y adaptación del avance tecnológico e investigativo del fenómeno de la barrera capilar en problemáticas relacionadas con sistemas de control de humedad, ya sea en sistemas de rellenos y cobertura, diseño y división de las distintas capas del pavimento, diseño de estructuras de drenaje en obras civiles, entre otras.

REFERENCIAS

- [1] L. Isabel and R. Bello, “El Modelo Argumentativo De Toulmin En La Escritura De Artículos De Investigación Educativa Resumen the Argumentative Model of Toulmin in the Article Writing of Educative Investigation,” pp. 1–18, 2004.
- [2] A. Gens, “Soil-environment interactions in geotechnical engineering,” *Geotechnique*, vol. 60, no. 1, pp. 3–74, 2010.
- [3] E. F. Garcia, C. P. K. Gallage, and T. Uchimura, “Function of permeable geosynthetics in unsaturated embankments subjected to rainfall infiltration,” *Geosynthetics International*, vol. 14, no. 2, pp. 89–99, 2007.
- [4] V. B. Silvente and R. Hurtado, “Classificació de proves no paramètriques. Com aplicar-les en SPSS,” *Revista d’Innovació i Recerca en Educació*, vol. 5, no. 2, pp. 101–113, 2012.
- [5] Á. R. Buitrago Martín, N. M. Mejía Cuenca, and R. Hernández Barbosa, “La argumentación: de la retórica a la enseñanza de las ciencias,” *Innovación educativa (México, DF)*, vol. 13, no. 63, pp. 17–39, 2013.

CAPÍTULO V. REFERENCIAS

- [6] R. D. Holtz, “46th Terzaghi Lecture: Geosynthetic reinforced soil: From the experimental to the familiar,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 143, no. 9, pp. 1–21, 2017.
- [7] J. Giroud, “Criteria for Granular and Geotextile Filters,” *IGS News*, vol. 20, pp. 12–14, 2004.
- [8] E. M. Palmeira, “Sustainability and innovation in geotechnics: Contributions from geosynthetics,” *Soils and Rocks*, vol. 39, no. 2, pp. 113–135, 2016.
- [9] A. Jana and A. Dey, “Effectiveness of Geotextile in Reinforced Soil Walls Backfilled With Fine Soil,” in *6th Asian Regional Conference in Geosynthetics - Geosynthetics for Infrastructure Development*, no. November, pp. 8–11, 2016.
- [10] R. M. Koerner and G. R. Koerner, “A data base, statistics and recommendations regarding 171 failed geosynthetic reinforced mechanically stabilized earth (MSE) walls,” *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 40, pp. 20–27, 2013.
- [11] F. Saidin, *Behavior of geosynthetic reinforced soil walls with poor quality backfills on yielding foundations*, vol. 68. 2007.
- [12] B. C. Chattopadhyay and S. Chakravarty, “Application of jute geotextiles as facilitator in drainage,” *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 27, no. 2, pp. 156–161, 2009.
- [13] J. G. Zornberg and J. Mitchell, “Reinforced Soil Structures with Poorly Draining Backfills Part II: Case Histories and Applications,” *Geosynthetics International*, vol. 2, no. 1, pp. 265–307, 1995.

CAPÍTULO V. REFERENCIAS

- [14] S. A. Tan, S. H. Chew, C. C. Ng, S. L. Loh, G. P. Karunaratne, P. Delmas, and K. H. Loke, “Large-scale drainage behaviour of composite geotextile and geogrid in residual soil,” *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 19, no. 3, pp. 163–176, 2001.
- [15] D. Bhattacharjee and B. V. S. Viswanadham, “Numerical studies on the performance of hybrid-geosynthetic-reinforced soil slopes subjected to rainfall,” *Geosynthetics International*, vol. 22, no. 6, pp. 411–427, 2015.
- [16] H.-T. Chen, W.-Y. Hung, C.-C. Chang, Y.-J. Chen, and C.-J. Lee, “Centrifuge modeling test of a geotextile-reinforced wall with a very wet clayey backfill,” *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 25, no. 6, pp. 346–359, 2007.
- [17] F. H. M. Portelinha and J. G. Zornberg, “Development of capillary barriers during water infiltration in a geotextile-reinforced soil wall,” no. 2005, 2010.
- [18] C. D. Shackelford, C. K. Chang, and T. F. Chiu, “The capillary barrier effect in unsaturated flow through soil barriers,” in *1st ICEG Conference, Edmonton, CA*, pp. 789–793, 1994.
- [19] R. J. Bathurst, G. Siemens, and A. F. Ho, “Experimental investigation of infiltration ponding in one-dimensional sand–geotextile columns,” *Geosynthetics International*, vol. 16, no. 3, pp. 158–172, 2009.
- [20] T. Iryo and R. K. Rowe, “Infiltration into an embankment reinforced by nonwoven geotextiles,” *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 42, no. 4, pp. 1145–1159, 2005.
- [21] H. Rahardjo, N. Gofar, A. Satyanaga, E. C. Leong, C. L. Wang, and L. H. Johnny Wong, “Effect of Rainfall Infiltration on Deformation of Geobarrier Wall,” *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 37, no. 3, pp. 1383–1399, 2019.

CAPÍTULO V. REFERENCIAS

- [22] H. Yang, H. Rahardjo, E. C. Leong, and D. G. Fredlund, “A study of infiltration on three sand capillary barriers,” *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 41, no. 4, pp. 629–643, 2004.
- [23] H. Rahardjo, T. H. Ong, R. B. Rezaur, and E. C. Leong, “Factors controlling instability of homogeneous soil slopes under rainfall,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 133, no. 12, pp. 1532–1543, 2007.
- [24] A. Chinkulkijniwat, S. Horpibulsuk, D. Bui Van, A. Udomchai, R. Goodary, and A. Arulrajah, “Influential factors affecting drainage design considerations for mechanical stabilised earth walls using geocomposites,” *Geosynthetics International*, vol. 24, no. 3, pp. 224–241, 2016.
- [25] U. R. Albino, F. H. Portelinha, J. G. Zornberg, and M. M. Futai, “Numerical simulation of infiltration into the fill of a wall reinforced with nonwoven geotextiles,” *Computers and Geotechnics*, vol. 108, no. December 2018, pp. 27–39, 2019.
- [26] D. G. Fredlund, “Unsaturated soil mechanics in engineering practice,” *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 132, no. 3, pp. 286–321, 2006.
- [27] E. Liu, H. S. Yu, G. Deng, J. Zhang, and S. He, “Numerical analysis of seepage–deformation in unsaturated soils,” *Acta Geotechnica*, vol. 9, no. 6, pp. 1045–1058, 2014.
- [28] S. E. Toulmin, *The uses of argument*. Cambridge Univ. Press (Cambridge), 1958.
- [29] C. Mora and G. Carreto, “Aplicación del modelo de Toulmin para la comprensión del campo eléctrico en estudiantes de ingeniería,” *Latin-American Journal of Physics Education*, vol. 6, no. 4, 2012.

CAPÍTULO V. REFERENCIAS

- [30] L. I. R. Bello, *Procesos retóricos y literarios en cuentos escritos por niños*, vol. 42. Ediciones La Casa de Bello, 1992.
- [31] Y. Kim, S. Jeong, and J. Kim, “Coupled infiltration model of unsaturated porous media for steady rainfall,” *Soils and Foundations*, vol. 56, no. 6, pp. 1071–1081, 2016.
- [32] D. Gallipoli, A. Gens, R. Sharma, and J. Vaunat, “An elasto-plastic model for unsaturated soil incorporating the effects of suction and degree of saturation on mechanical behaviour,” *Géotechnique.*, vol. 53, no. 1, pp. 123–136, 2003.
- [33] I. M. Lee, S. G. Sung, and G. C. Cho, “Effect of stress state on the unsaturated shear strength of a weathered granite,” *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 42, no. 2, pp. 624–631, 2005.
- [34] C. W. W. Ng and Y. W. Pang, “Influence of stress state on soil-water characteristics and slope stability,” *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 126, no. 2, pp. 157–166, 2000.
- [35] S. J. Wheeler, R. S. Sharma, and M. S. Buisson, “Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behaviour in unsaturated soils,” *Geotechnique*, vol. 53, no. 1, pp. 41–54, 2003.
- [36] G. Pande and S. Pietruszczak, “On Unsaturated Soil Mechanics – Personal Views on Current Research,” *Studia Geotechnica et Mechanica*, vol. 37, no. 3, pp. 73–84, 2015.
- [37] Y. Nakata, D. Liu, M. Hyodo, N. Yoshimoto, and Y. Kato, “Numerical simulation of an expressway embankment slope failure,” *Proc. of Theoretical and Numerical Advances in Unsaturated Soil Mechanics*, pp. 719–724, 2010.

CAPÍTULO V. REFERENCIAS

- [38] R. W. Day and G. W. Axten, “Surficial stability of compacted clay slopes,” *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 115, no. 4, pp. 577–580, 1989.
- [39] E. Aristizábal and J. Gómez, “Inventario de emergencias y desastres en el Valle de Aburrá,” *Gestión y Ambiente. Medellín, Colombia.*, vol. 10, no. 2, pp. 17–30, 2007.
- [40] L. L. Zhang, J. Zhang, L. M. Zhang, and W. H. Tang, “Stability analysis of rainfall-induced slope failure: a review,” *Proceedings of the ICE - Geotechnical Engineering*, vol. 164, no. 5, pp. 299–316, 2011.
- [41] F. Cartaud, N. Touze-Foltz, and Y. Duval, “Experimental investigation of the influence of a geotextile beneath the geomembrane in a composite liner on the leakage through a hole in the geomembrane,” *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 23, no. 2, pp. 117–143, 2005.
- [42] P. R. Vaughan, “Mechanical and hydraulic properties of in-situ soils. General Report. Sess,” in *2 Proc. 1st Int. Conf. in Geomech. in Tropical Lateritic and saprolitic Soils, Brasilia*, 1985.
- [43] D. G. Fredlund and H. Rahardjo, *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons, 1993.
- [44] M. Kutílek and D. R. Nielsen, *Soil hydrology: textbook for students of soil science, agriculture, forestry, geoecology, hydrology, geomorphology and other related disciplines*. Catena Verlag, 1994.
- [45] S. L. Houston, “Applied unsaturated soil mechanics, state of the art report,” *Unsaturated soils*, vol. 3, pp. 1127–1134, 2002.

CAPÍTULO V. REFERENCIAS

- [46] E. E. Alonso, A. Gens, and A. Josa, “A constitutive model for partially saturated soils,” *Géotechnique*, vol. 40, no. 3, pp. 405–430, 1990.
- [47] A. Gens, “Constitutive modelling: application to compacted soils,” in *PROCEEDINGS OF THE FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS/UNSAT’95/PARIS/FRANCE/6-8 SEPTEMBER 1995. VOLUME 3*, 1996.
- [48] A. Gens, L. N. Do Guimarães, M. Sánchez, and D. Sheng, “Developments in modelling the generalised behaviour of unsaturated soils,” *Unsaturated Soils: Advances in Geo-Engineering - Proceedings of the 1st European Conference on Unsaturated Soils, E-UNSAT 2008*, no. June, pp. 53–61, 2008.
- [49] S. J. Wheeler, “Constitutive modelling of unsaturated soils,” in *Keynote Lecture presented at 4th International Conference on Unsaturated Soil, PDF presentation, Arizona, USA*, 2006.
- [50] Y. J. Cui and D. A. Sun, “Constitutive modelling: From isothermal to non-isothermal behaviour of unsaturated soils,” 2009.
- [51] A. Raveendraraj, “Coupling of mechanical behaviour and water retention behaviour in unsaturated soils,” 2009.
- [52] F. Geiser, L. Laloui, and L. Vulliet, “Elasto-plasticity of unsaturated soils: laboratory test results on a remoulded silt,” *Soils and Foundations*, vol. 46, no. 5, pp. 545–556, 2006.
- [53] D. Sheng, “Review of fundamental principles in modelling unsaturated soil behaviour,” *Computers and Geotechnics*, vol. 38, no. 6, pp. 757–776, 2011.

CAPÍTULO V. REFERENCIAS

- [54] J. Vaunat, E. Romero, and C. Jommi, “An elastoplastic hydromechanical model for unsaturated soils,” *Experimental evidence and theoretical approaches in unsaturated soils*, vol. 20, no. 0, p. 0, 2000.
- [55] D. Sheng, “Review of fundamental principles in modelling unsaturated soil behaviour,” *Computers and Geotechnics*, vol. 38, no. 6, pp. 757–776, 2011.
- [56] D. Sheng, S. W. Sloan, and A. Gens, “A constitutive model for unsaturated soils: thermomechanical and computational aspects,” *Computational Mechanics*, vol. 33, no. 6, pp. 453–465, 2004.
- [57] F. Oka, T. Kodaka, S. Kimoto, Y.-S. Kim, and N. Yamasaki, “An elasto-viscoplastic model and multiphase coupled FE analysis for unsaturated soil,” in *Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soils*, pp. 2039–2050, 2006.
- [58] X. S. Li, “Thermodynamics-based constitutive framework for unsaturated soils. 1: Theory,” *Géotechnique*, vol. 57, no. 5, pp. 411–422, 2007.
- [59] D. Sun, D. Sheng, and S. W. Sloan, “Elastoplastic modelling of hydraulic and stress-strain behaviour of unsaturated soils,” *Mechanics of Materials*, vol. 39, no. 3, pp. 212–221, 2007.
- [60] M. Nuth and L. Laloui, “Advances in modelling hysteretic water retention curve in deformable soils,” *Computers and Geotechnics*, vol. 35, no. 6, pp. 835–844, 2008.
- [61] D. Sheng and A. N. Zhou, “Coupling hydraulic with mechanical models for unsaturated soils,” *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 48, no. 5, pp. 826–840, 2011.

CAPÍTULO V. REFERENCIAS

- [62] R. R. Berg, B. R. Christopher, and N. C. Samtani, *Design and construction of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes*. US Department of Transportation, Federal Highway Administration, National Highway Institute, 2009.
- [63] F. Schlosser, “La terre armée.,” *NOTE D’INF TECH*, 1973.
- [64] J. R. Bell and J. E. Steward, “Construction and observation of fabric retained soil walls,” in *Proceedings of the International Conference on the Use of Fabrics in Geotechnics*, vol. 1, pp. 23–128, 1977.
- [65] J. G. Zornberg, “Geosynthetic Capillary Barriers,” *The 1st International GSI-Asia Geosynthetics Conference*, pp. 13–28, 2010.
- [66] J. Zornberg, A. Bouazza, and J. McCartney, “Geosynthetic capillary barriers: current state of knowledge,” *Geosynthetics International*, vol. 17, no. 5, pp. 273–300, 2010.
- [67] I. R. Clough and W. J. French, “Laboratory and field work relating to the use of geotextiles in arid regions,” in *Proceedings of the 2nd International Conference on Geotextiles, Las Vegas, Nev*, pp. 1–6, 1982.
- [68] G. N. Richardson, “Fundamental mistakes in slope design,” *Geotechnical Fabrics Report*, vol. 15, no. 2, pp. 15–17, 1997.
- [69] E. F. García-Aristizábal, C. A. Vega-Posada, and A. N. Gallego-Hernández, “Experimental study of water infiltration on an unsaturated soil-geosynthetic system,” *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, no. 78, pp. 112–118, 2015.

CAPÍTULO V. REFERENCIAS

- [70] J. N. Thuo, K. H. Yang, and C. C. Huang, “Infiltration into unsaturated reinforced slopes with nonwoven geotextile drains sandwiched in sand layers,” *Geosynthetics International*, vol. 22, no. 6, pp. 457–474, 2015.
- [71] D. Tami, H. Rahardjo, E. C. Leong, and D. G. Fredlund, “Design and laboratory verification of a physical model of sloping capillary barrier,” *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 41, no. 5, pp. 814–830, 2004.
- [72] F. R. Harnas, H. Rahardjo, E. C. Leong, and J. Y. Wang, “Experimental study on dual capillary barrier using recycled asphalt pavement materials,” *Canadian geotechnical journal*, vol. 51, no. 10, pp. 1165–1177, 2014.
- [73] H. Rahardjo, “Capillary barrier as a slope protection,” *Unsaturated Soil Mechanics from Theory to Practice - Proceedings of the 6th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils*, pp. 23–36, 2016.
- [74] H. Rahardjo, A. Satyanaga, F. R. Harnas, J. Y. Wang, and E. C. Leong, “Capillary barrier system for landfill capping,” *Multilevel Modeling of Secure Systems in QoP-ML*, p. 425, 2015.
- [75] A. Jana and A. Dey, “Combined Functioning of Geotextile as Barrier and Drainage Material in Unsaturated Earth Retaining Structures,” *Indian Geotechnical Journal*, vol. 48, no. 2, pp. 342–359, 2018.
- [76] F. Oka, S. Kimoto, N. Takada, and Y. Higo, “A multiphase elasto-viscoplastic analysis of an unsaturated river embankment associated with seepage flow,” in *Proceedings of the International Symposium on Prediction and Simulation Methods for Geohazard Mitigation. Kyoto, Japan*, pp. 127–132, 2009.

CAPÍTULO V. REFERENCIAS

- [77] R. De Boer, “Theory of porous media—past and present,” *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, vol. 78, no. 7, pp. 441–466, 1998.
- [78] E. Garcia, F. Oka, and S. Kimoto, “Numerical analysis of a one-dimensional infiltration problem in unsaturated soil by a seepage–deformation coupled method,” *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 35, no. 5, pp. 544–568, 2011.
- [79] S. Kimoto, F. Oka, and E. García, “Numerical simulation of the rainfall infiltration on unsaturated soil slope considering a seepage flow,” *Geotech. Eng.*, vol. 44, no. 3, pp. 1–13, 2013.
- [80] C. Jommi, “Remarks on the constitutive modelling of unsaturated soils,” *Experimental evidence and theoretical approaches in unsaturated soils*, pp. 139–153, 2000.
- [81] L. Laloui and M. Nuth, “On the use of the generalised effective stress in the constitutive modelling of unsaturated soils,” *Computers and Geotechnics*, vol. 36, no. 1, pp. 20–23, 2009.
- [82] S. Kimoto and F. Oka, “An elasto-viscoplastic model for clay considering destructuration and consolidation analysis of unstable behavior,” *Soils and Foundations*, vol. 45, no. 2, pp. 29–42, 2005.
- [83] F. Oka, S. Kimoto, N. Takada, H. Gotoh, and Y. Higoiv, “A seepage-deformation coupled analysis of an unsaturated river embankment using a multiphase elasto-viscoplastic theory,” *Soils and Foundations*, vol. 50, no. 4, pp. 483–494, 2010.

CAPÍTULO V. REFERENCIAS

- [84] S. Kimoto, “Constitutive models for geomaterials considering structural changes and anisotropy,” 2003.
- [85] M. T. van Genuchten, “A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils,” *Soil science society of America journal*, vol. 44, no. 5, pp. 892–898, 1980.
- [86] D. G. Fredlund and H. Rahardjo, *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons, 1993.
- [87] G. C. P. Kumara, *Real-time prediction of rain-induced embankment failure by minimum measurements with back-analysis for SWCC parameters*. PhD thesis, 2006.
- [88] S. Sidney, *Nonparametric statistics for the behavioral sciences*, vol. 125. LWW, 1957.
- [89] R. C. Blair and J. J. Higgins, “A comparison of the power of Wilcoxon’s rank-sum statistic to that of student’s t statistic under various nonnormal distributions,” *Journal of Educational Statistics*, vol. 5, no. 4, pp. 309–335, 1980.
- [90] L. E. Toothaker, M. Banz, C. Noble, J. Camp, and D. Davis, “N= 1 designs: The failure of ANOVA-based tests,” *Journal of educational statistics*, vol. 8, no. 4, pp. 289–309, 1983.
- [91] G. E. P. Box, “Non-Normality and Tests on Variances,” *Biometrika*, vol. 40, no. 3/4, p. 318, 1953.
- [92] L. M. Lix, J. C. Keselman, and H. J. Keselman, “Consequences of assumption violations revisited: A quantitative review of alternatives to the one-way analysis of variance F test,” *Review of Educational Research*, vol. 66, no. 4, pp. 579–619, 1996.

CAPÍTULO V. REFERENCIAS

- [93] Y. Chan and R. P. Walmsley, “Learning and Understanding the Kruskal-Wallis One-Way Analysis-of-Variance-by-Ranks Test for Differences Among Three or More Independent Groups,” *Physical Therapy*, vol. 77, no. 12, pp. 1755–1761, 1997.
- [94] J. D. Gibbons, *Nonparametric statistical inference, 2nd edn. M*, vol. 7. 1985.
- [95] W. H. Kruskal, “A nonparametric test for the several sample problem,” *The Annals of Mathematical Statistics*, vol. 23, no. 4, pp. 525–540, 1952.
- [96] F. C. Andrews, “Asymptotic behavior of some rank tests for analysis of variance,” *The Annals of Mathematical Statistics*, pp. 724–736, 1954.
- [97] T. C. Oshima and J. Algina, “A SAS program for testing the hypothesis of the equal means under heteroscedasticity: James’s second-order test,” *Educational and Psychological Measurement*, vol. 52, no. 1, pp. 117–118, 1992.
- [98] A. Chinkulkijniwat, S. Horpibulsuk, D. Bui Van, A. Udomchai, R. Goodary, and A. Arulrajah, “Influential factors affecting drainage design considerations for mechanical stabilised earth walls using geocomposites,” *Geosynthetics International*, pp. 1–18, 2016.
- [99] J. Zornberg, M. Azevedo, and C. Pickles, “Evaluation of the Development of Capillary Barriers at the Interface between Fine-Grained Soils and Nonwoven Geotextiles,” *Geotechnical Special Publication*, vol. 2016-Janua, no. 275 GSP, pp. 15–17, 2016.
- [100] T. Iryo and R. K. Rowe, “Numerical study of infiltration into a soil–geotextile column,” *Geosynthetics International*, vol. 11, no. 5, pp. 377–389, 2004.

CAPÍTULO V. REFERENCIAS

- [101] M. Mavroulidou and M. J. Gunn, “Numerical modelling of flow in variably saturated porous media with fluctuating shallow water tables,” in *Theoretical and Numerical Unsaturated Soil Mechanics*, pp. 143–149, Springer, 2007.
- [102] Y. Lins, Y. Zou, and T. Schanz, “Physical modeling of SWCC for granular materials,” in *Theoretical and numerical unsaturated soil mechanics*, pp. 61–74, Springer, 2007.
- [103] C. Gallage, J. Kodikara, and T. Uchimura, “Laboratory measurement of hydraulic conductivity functions of two unsaturated sandy soils during drying and wetting processes,” *Soils and Foundations*, vol. 53, no. 3, pp. 417–430, 2013.
- [104] L. HANDOKO, N. YASUFUKU, and H. DANANJAYA, “Unsaturated Hydraulic Properties of Non-woven Geotextile Based on Tilted Capillary Test,” *Geosynthetics Engineering Journal*, vol. 27, pp. 19–24, 2012.
- [105] U. R. Albino, F. H. M. Portelinha, J. G. Zornberg, and M. M. Futai, “Numerical simulation of infiltration into the fill of a wall reinforced with nonwoven geotextiles,” vol. 108, no. April 2018, pp. 27–39, 2019.
- [106] E. M. Palmeira and M. G. Gardoni, “The influence of partial clogging and pressure on the behaviour of geotextiles in drainage systems,” *Geosynthetics International*, vol. 7, no. 4-6, pp. 403–431, 2000.
- [107] A. Miskowska, S. Lenart, and E. Koda, “Changes of permeability of nonwoven geotextiles due to clogging and cyclic water flow in laboratory conditions,” *Water*, vol. 9, no. 9, p. 660, 2017.

CAPÍTULO V. REFERENCIAS

- [108] F. Oka, T. Kodaka, H. Suzuki, Y. S. Kim, N. Nishimatsu, and S. Kimoto, “Experimental study on the behavior of unsaturated compacted silt under triaxial compression,” *Soils and Foundations*, vol. 50, no. 1, pp. 27–44, 2010.
- [109] N. Lu and W. J. Likos, *Unsaturated soil mechanics*. Wiley, 2004.
- [110] E. Aristizábal, Y. V. González, A. Guerra, P. M. V. Vargas, and O. E. Ramírez, “Caracterización geotécnica de perfiles de meteorización desarrollados sobre rocas ígneas en ambientes tropicales,” *Boletín de Ciencias de la Tierra*, no. 30, pp. 93–106, 2011.
- [111] A. Zhou and D. Sheng, “An advanced hydro-mechanical constitutive model for unsaturated soils with different initial densities,” *Computers and Geotechnics*, vol. 63, pp. 46–66, 2015.
- [112] Y.-P. Yao, W. Hou, and A.-N. Zhou, “UH model: three-dimensional unified hardening model for overconsolidated clays,” *Geotechnique*, vol. 59, no. 5, pp. 451–469, 2009.
- [113] J. McCartney, L. Villar, and J. Zornberg, “Estimation of the Hydraulic Conductivity Function of Unsaturated Clays Using Infiltration Column Tests,” *VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados 2007/ Salvador-Bahia*, vol. 1, pp. 321–328, 2007.
- [114] J. G. Zornberg, A. Bouazza, and J. S. McCartney, “Geosynthetic capillary barriers: Current state of knowledge,” *Geosynthetics International*, vol. 17, no. 5, pp. 273–300, 2010.
- [115] S. Wu, A. Zhou, J. Li, J. Kodikara, and W. C. Cheng, “Hydromechanical behaviour of overconsolidated unsaturated soil in undrained conditions,” *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 56, no. 11, pp. 1609–1621, 2019.

CAPÍTULO V. REFERENCIAS

- [116] D. A. Sun and D. C. Sheng, “Collapse Behavior of Unsaturated Compacted Soils,” in *Advances in Unsaturated Soil, Seepage, and Environmental Geotechnics*, pp. 102–110, 2006.
- [117] T. W. Lambe, “The engineering behavior of compacted clay,” *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, vol. 84, no. 2, pp. 1–35, 1958.
- [118] S. Yokohama, S. Miura, and S. Matsumura, “Change in the hydromechanical characteristics of embankment material due to compaction state conditions,” *Soils and Foundations*, vol. 54, no. 4, pp. 731–747, 2014.
- [119] I. Zakaria, “Yielding of unsaturated soil,” 1994.
- [120] V. Sivakumar, “A critical state framework for unsaturated soil,” 1993.
- [121] D. Gallipoli, S. J. Wheeler, and M. Karstunen, “Modelling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil,” *Geotechnique*, vol. 53, no. 1, pp. 105–112, 2003.
- [122] E. Gholizadeh and M. Latifi, “A coupled hydro-mechanical constitutive model for unsaturated frictional and cohesive soil,” *Computers and Geotechnics*, vol. 98, no. September 2017, pp. 69–81, 2018.
- [123] D. Sun, D. Sheng, and Y. Xu, “Collapse behaviour of unsaturated compacted soil with different initial densities,” *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 44, no. 6, pp. 673–686, 2007.
- [124] A. Uchaipichat, *Experimental investigation and constitutive modelling of thermo-hydro-mechanical coupling in unsaturated soils*. University of New South Wales, 2005.

CAPÍTULO V. REFERENCIAS

- [125] S.-S. Yeo, C. D. Shackelford, and J. C. Evans, “Consolidation and hydraulic conductivity of nine model soil-bentonite backfills,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 131, no. 10, pp. 1189–1198, 2005.
- [126] A. Aldaood, “Impact of fine materials on the saturated and unsaturated behavior of silty sand soil,” *Ain Shams Engineering Journal*, no. xxxx, 2019.
- [127] D. Tami, H. Rahardjo, and E.-C. Leong, “Characteristics of scanning curves of two soils,” *Soils and foundations*, vol. 47, no. 1, pp. 97–108, 2007.
- [128] D. G. Toll, “A framework for unsaturated soil behaviour,” *Géotechnique*, vol. 40, no. 1, pp. 31–44, 1990.
- [129] E. Romero, A. Gens, and A. Lloret, “Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted Boom clay,” *Engineering Geology*, vol. 54, no. 1-2, pp. 117–127, 1999.
- [130] K.-J. Witt and J. Brauns, “Permeability-anisotropy due to particle shape,” *Journal of geotechnical engineering*, vol. 109, no. 9, pp. 1181–1187, 1983.
- [131] H. Kim, *Anisotropic properties of compacted silty clay*. PhD thesis, 1996.
- [132] H. F. Yeh and Y. J. Tsai, “Analyzing the effect of soil hydraulic conductivity anisotropy on slope stability using a coupled hydromechanical framework,” *Water (Switzerland)*, vol. 10, no. 7, 2018.
- [133] R. L. Burger and K. Belitz, “Measurement of anisotropic hydraulic conductivity in unconsolidated sands: A case study from a shoreface deposit, Oyster, Virginia,” *Water Resources Research*, vol. 33, no. 6, pp. 1515–1522, 1997.

CAPÍTULO V. REFERENCIAS

- [134] R. A. dos Santos and E. R. Esquivel, “Saturated anisotropic hydraulic conductivity of a compacted lateritic soil,” *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 10, no. 5, pp. 986–991, 2018.
- [135] J. C. Stormont, K. S. Henry, and T. M. Evans, “Water retention functions of four nonwoven polypropylene geotextiles,” *Geosynthetics International*, vol. 4, no. 6, pp. 661–672, 1997.
- [136] J. R. Philip, “Theory of infiltration,” in *Advances in hydroscience*, vol. 5, pp. 215–296, Elsevier, 1969.
- [137] E. Garcia, *Numerical analysis of the rainfall infiltration problem in unsaturated soil*. PhD thesis, 2010.
- [138] T. L. Zhan and C. W. Ng, “Analytical analysis of rainfall infiltration mechanism in unsaturated soils,” *International Journal of Geomechanics*, vol. 4, no. 4, pp. 273–284, 2004.
- [139] A. Bouazza, “A simple method to assess the wettability of nonwoven geotextiles,” *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 42, no. 4, pp. 417–419, 2014.
- [140] F. H. M. Portelinha and J. G. Zornberg, “Effect of infiltration on the performance of an unsaturated geotextile-reinforced soil wall,” *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 45, no. 3, pp. 211–226, 2017.
- [141] E. F. García-Aristizábal, J. C. Guzmán-Martínez, A. N. Gallego-Hernández, and C. A. Vega-Posada, “Análisis Numérico Unidimensional del Proceso de Infiltración en Suelos Parcialmente Saturados Reforzados con Geosintéticos Permeables,” *Scientia et Technica*, vol. 24, no. 1, pp. 46–56, 2019.

CAPÍTULO V. REFERENCIAS

- [142] U. d. R. Albino, *The climatic effects on infiltration and stability of geotextile reinforced walls*. PhD thesis, 2018.
- [143] A. Rahimi, H. Rahardjo, and E. C. Leong, “Effects of soil-water characteristic curve and relative permeability equations on estimation of unsaturated permeability function,” *Soils and Foundations*, vol. 55, no. 6, pp. 1400–1411, 2015.
- [144] H. Rahardjo, V. A. Santoso, E. C. Leong, Y. S. Ng, C. P. H. Tam, and A. Satyanaga, “Use of recycled crushed concrete and Secudrain in capillary barriers for slope stabilization,” *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 50, no. 6, pp. 662–673, 2013.

Anexos

Anexos A

Prueba F

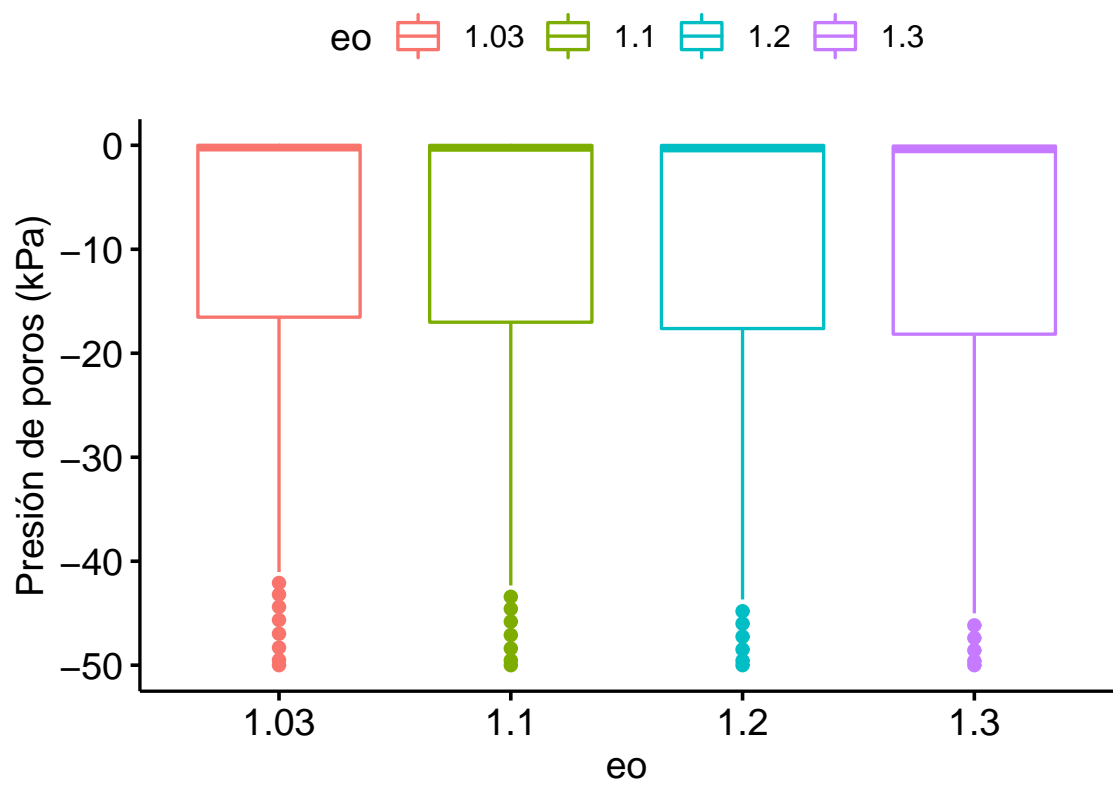


Figura 1.1: Boxplot para los niveles de e_0

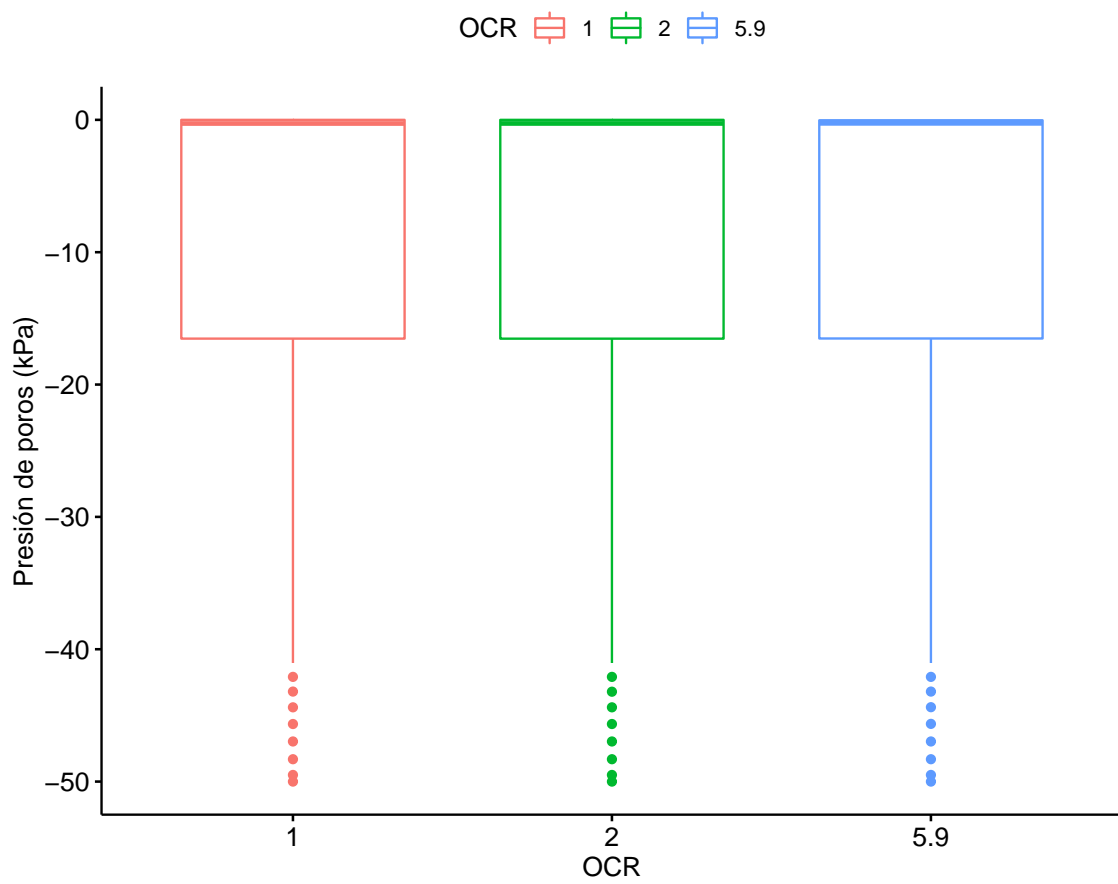


Figura 1.2: Boxplot para los niveles de *OCR*

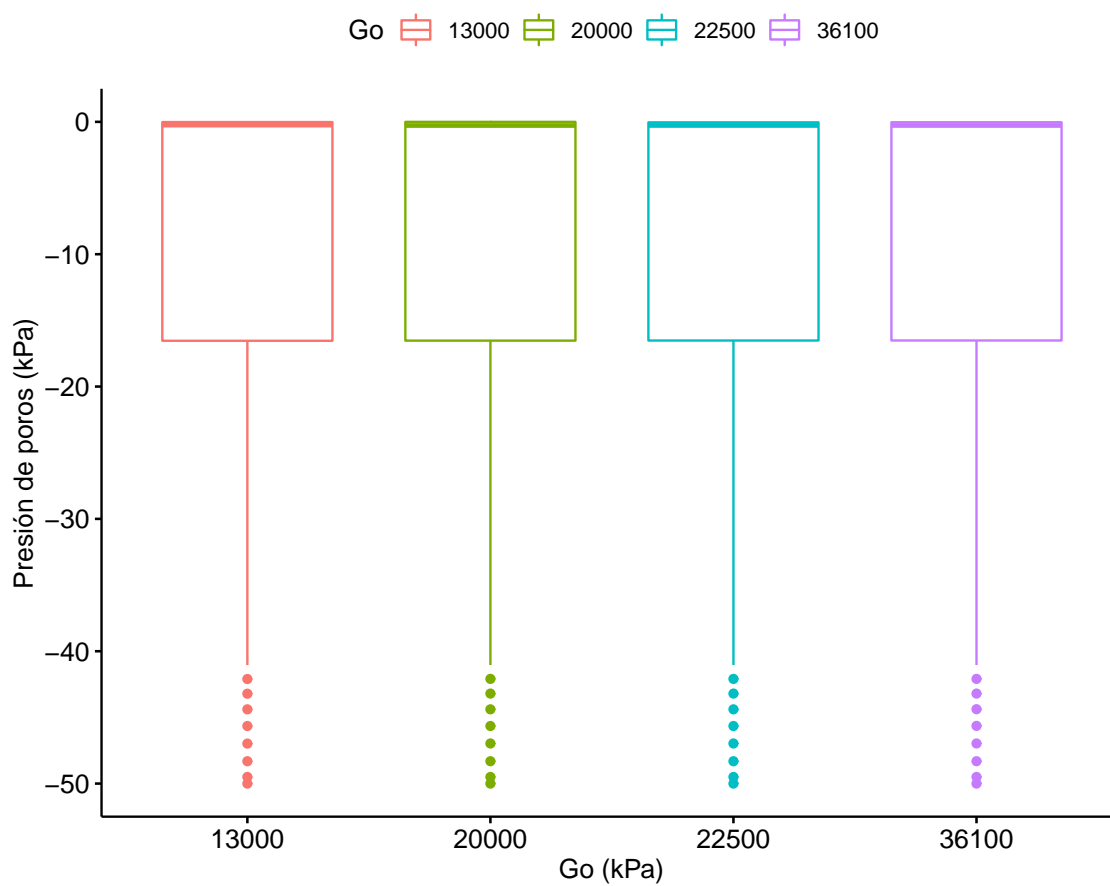


Figura 1.3: Boxplot para los niveles de G_0

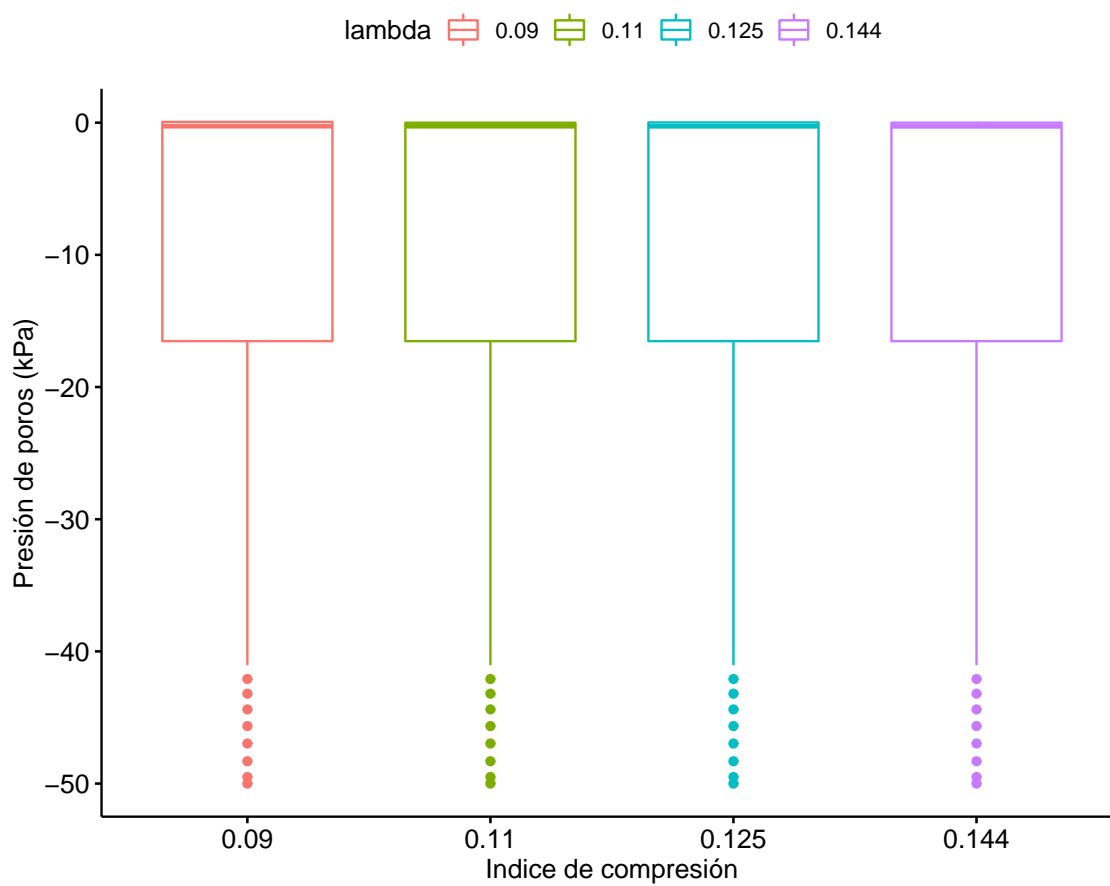


Figura 1.4: Boxplot para los niveles de λ

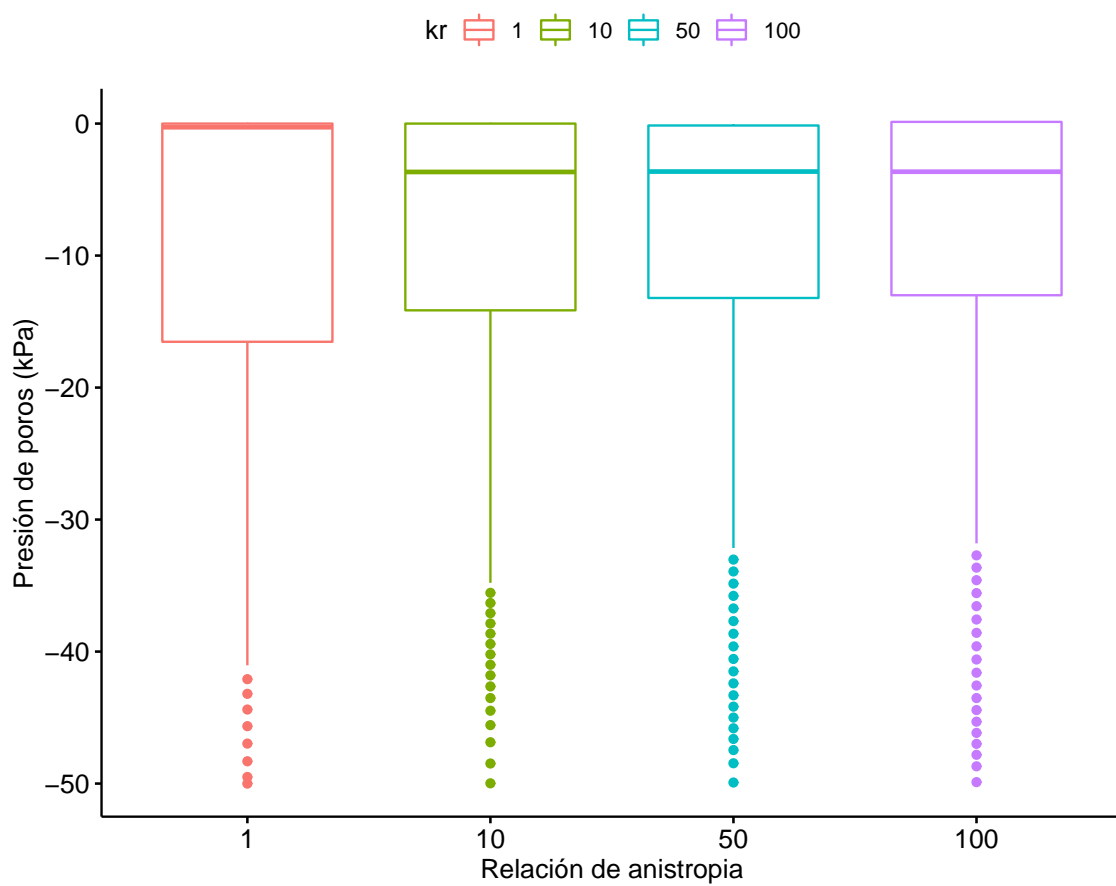


Figura 1.5: Boxplot para los niveles de k_r .

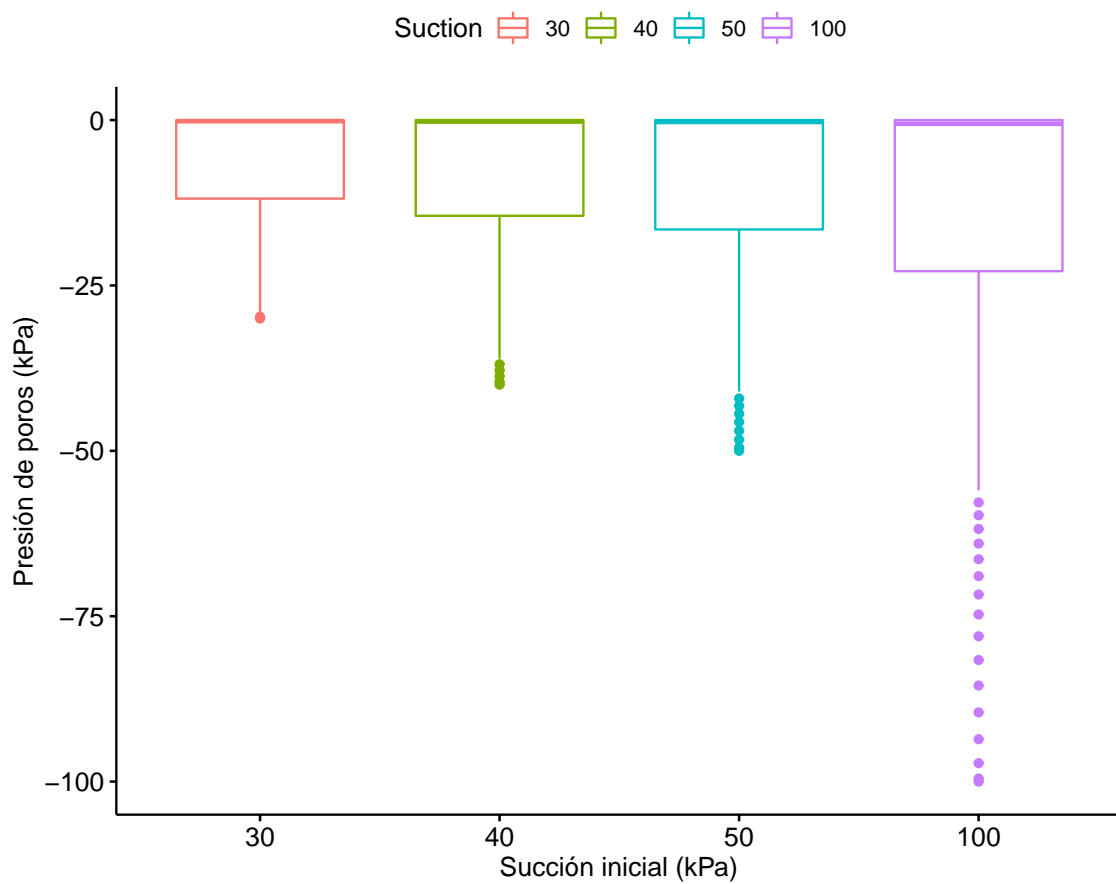


Figura 1.6: Boxplot para los niveles de ψ_i

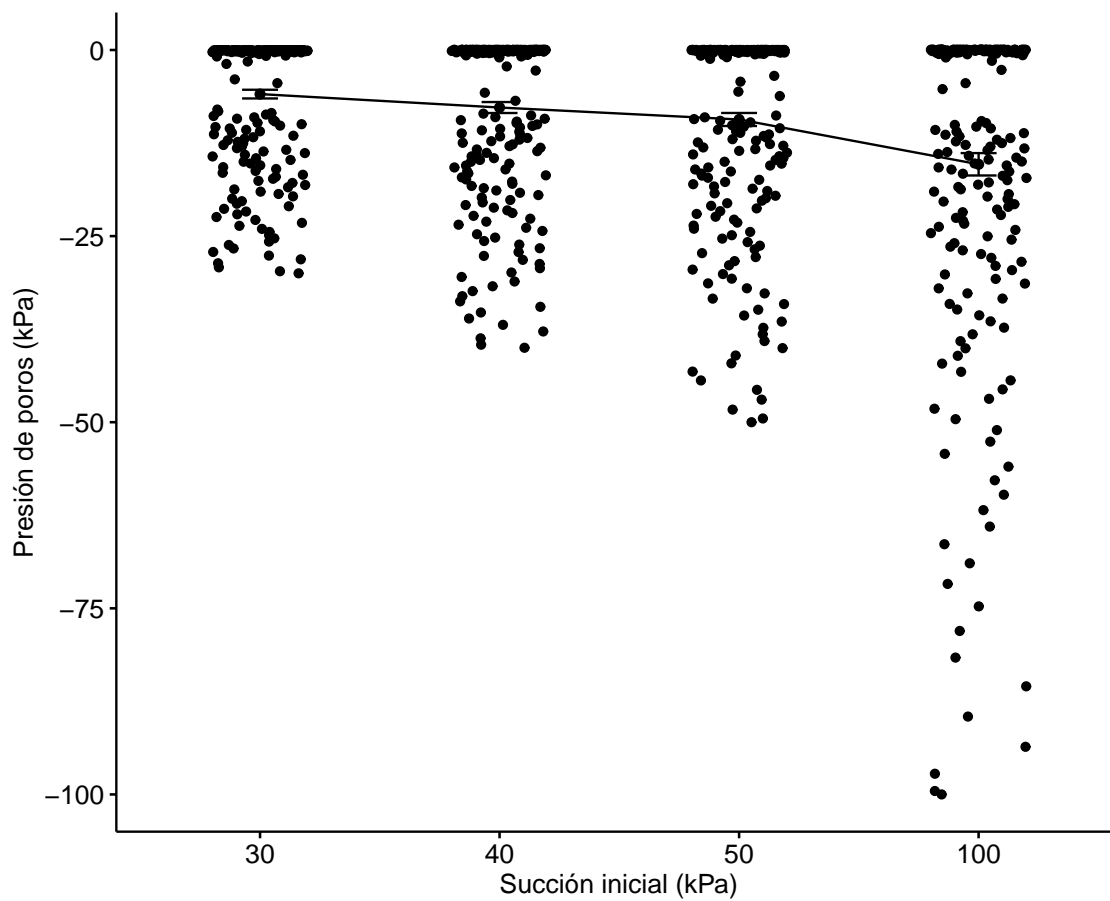


Figura 1.7: Digramas de dispersión y sus respectivas medias para los niveles de ψ_i

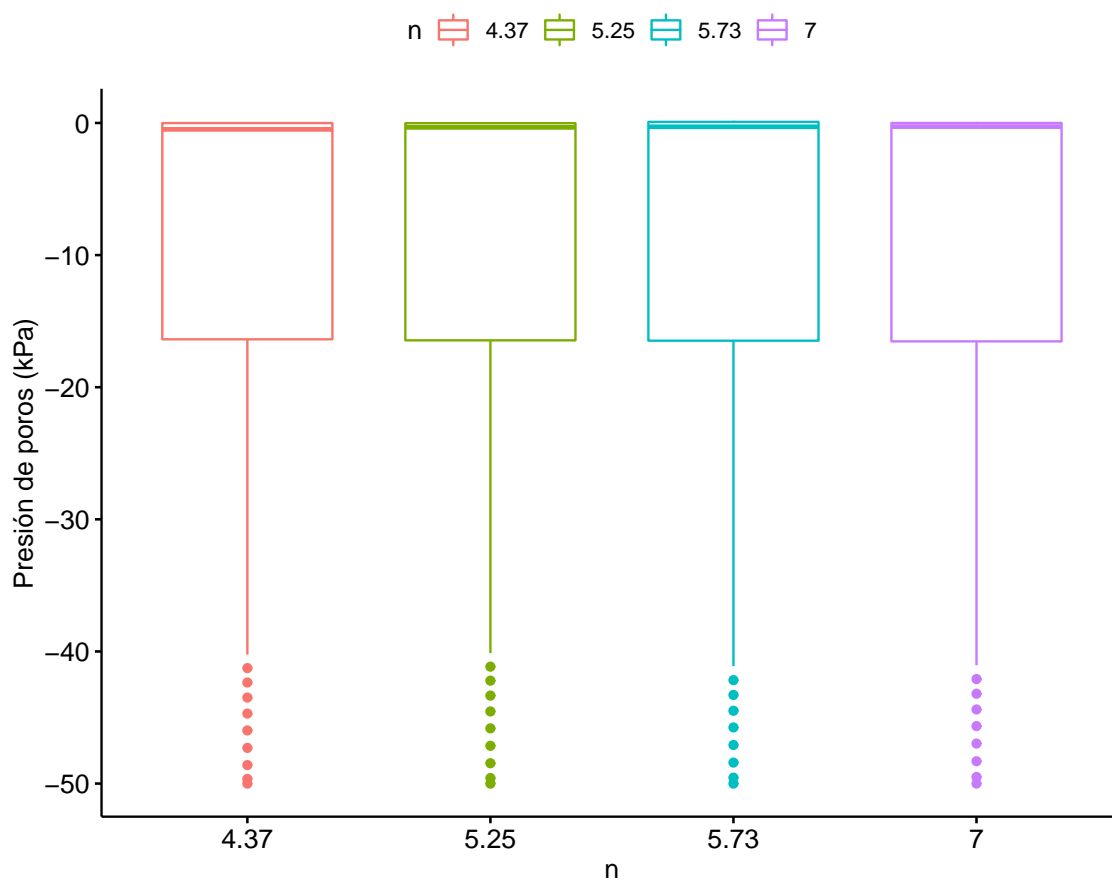


Figura 1.8: Boxplot para los niveles de n

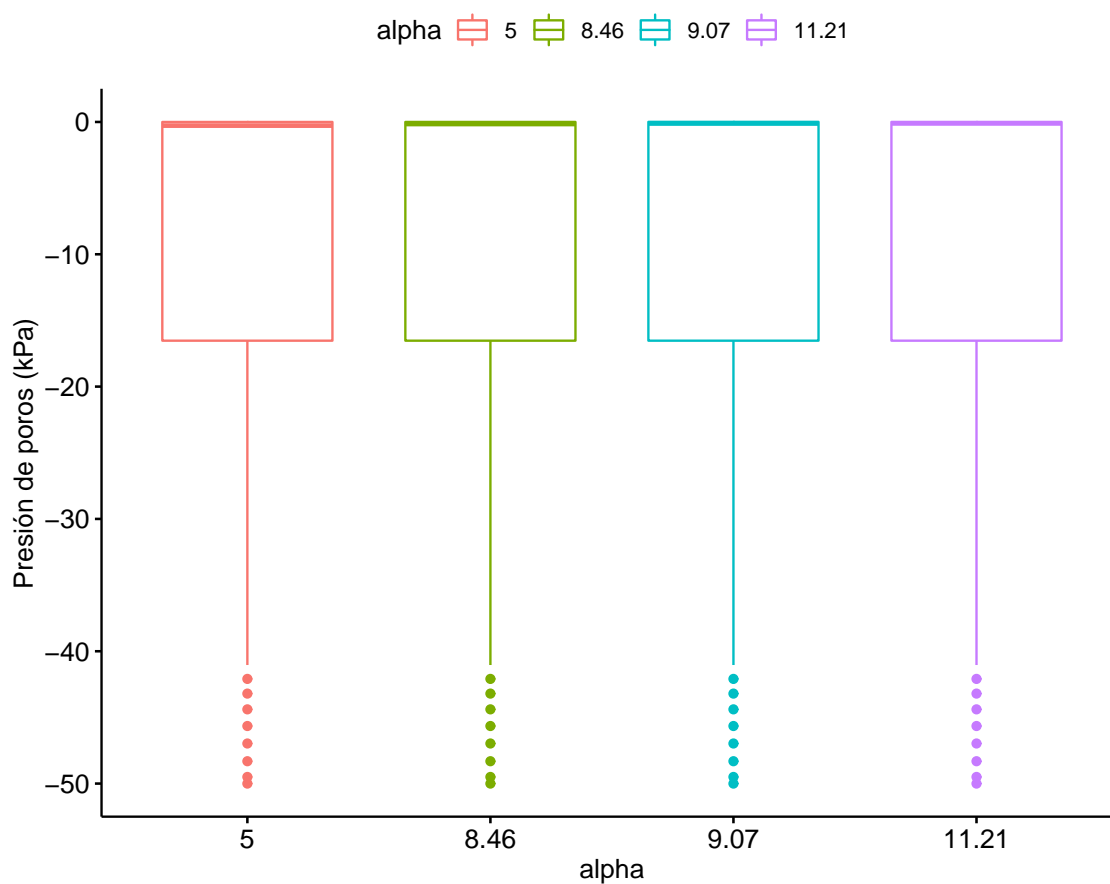


Figura 1.9: Boxplot para los niveles de α

Tabla 1.1: Análisis de varianza para presión de poros (P_w) mediante la prueba F

Factor	Df	suma sq	Media Sq	valor F	valor-p
e_0	1	321	321	1.792	0.181
OCR	1	0	0	0.002	0.964
G_0	1	0	0	0.001	0.978
λ	1	1	1	0.008	0.927
k_r	1	40	40	0.223	0.637
ψ_i	1	11202	11202	62.615	2.95e-15 ***
n	1	19	19	0.107	0.744
α	1	1	1	0.006	0.941
Residuales	6319	1130459	179		

CAPÍTULO A.

Tabla 1.2: Análisis de varianza para el grado de saturación (Sr) mediante la prueba F

Factor	Df	suma sq	Media Sq	valor F	valor-p
e_0	1	0.2	0.1632	2.598	0.107
OCR	1	0.0	0.0000	0.001	0.979
G_0	1	0.0	0.0003	0.005	0.941
λ	1	0.0	0.0000	0.000	1.000
k_r	1	0.0	0.0000	0.000	0.996
ψ_i	1	1.3	1.2870	20.492	6.1e-06 ***
n	1	0.0	0.0166	0.264	0.607
α	1	0.0	0.0013	0.021	0.886
Residuales	6319	396.9	0.0628		

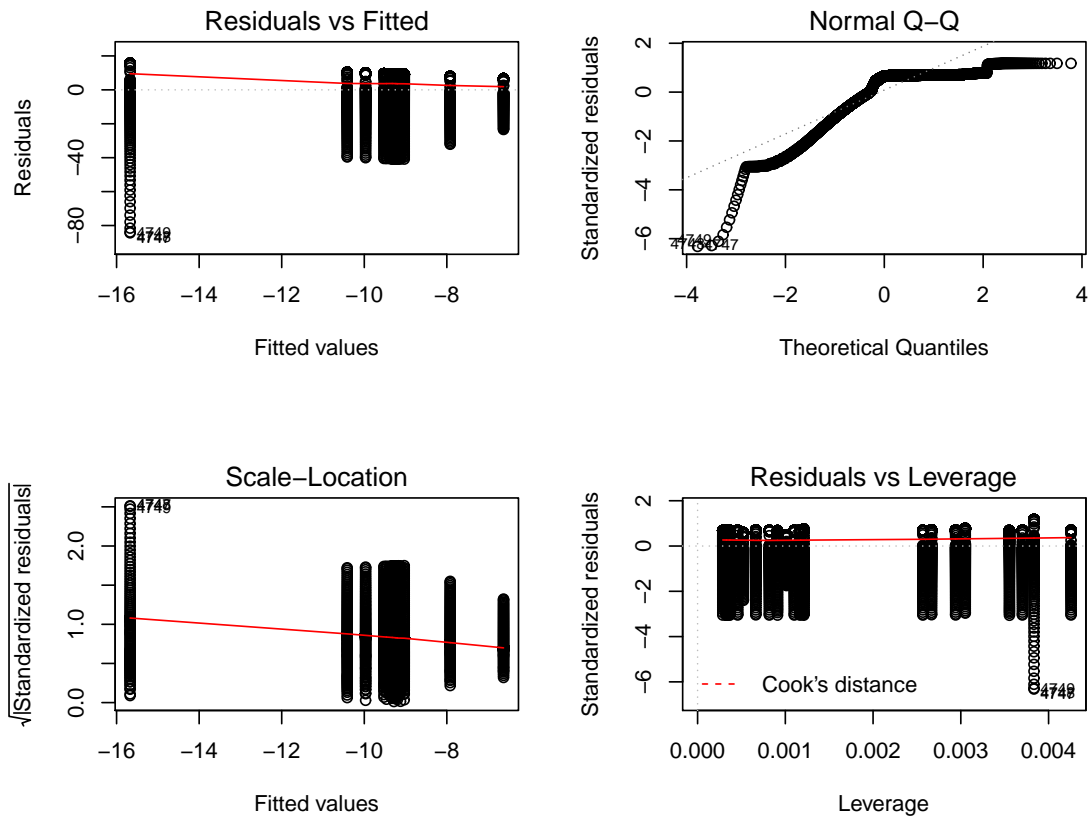


Figura 1.10: Residuos del modelo ANOVA mediante la prueba F